

**VALIDACIÓN, COMPLEMENTACIÓN Y REPRESENTACIÓN DE PLANES DE  
CONTINGENCIA PARA FALLAS DE SUBESTACIONES**

Autor

**JORGE OLMEDO ARIZA CASTILLO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA, MARZO DE 2005**

**VALIDACIÓN, COMPLEMENTACIÓN Y REPRESENTACIÓN DE PLANES DE  
CONTINGENCIA PARA FALLAS DE SUBESTACIONES**

Autor

**JORGE OLMEDO ARIZA CASTILLO**

Trabajo de investigación para optar al título de  
Magíster en Potencia Eléctrica

Director de la Investigación

**DR. GILBERTO CARRILLO CAICEDO**

DOCTOR INGENIERO INDUSTRIAL DE LA ESCUELA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES DE  
LA UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS

Codirectores

**Ing. JUAN JOSÉ MORA FLÓREZ**

MAGÍSTER EN POTENCIA ELECTRICA UIS

**Ing. JORGE ANTONIO JAIMES**

MAGÍSTER EN POTENCIA ELECTRICA UIS

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**

**FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICO MECÁNICAS**

**ESCUELA DE INGENIERIA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

**BUCARAMANGA, MARZO DE 2005**

***DIOS, esperanza mía, castillo mío;  
mi dios en quien confío. Nunca tu  
amparo me ha faltado.***

***A mi familia: mi madre Emperatriz,  
mi padre Manuel Antonio, mis  
hermanas Rita y Esperanza, mis  
hermanos Víctor, Carlos, Eccehomo  
y Edgar, por su apoyo.***

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Dr. Gilberto Carrillo Caicedo por su paciencia y colaboración, quien con su espíritu orientador permitió la culminación de este trabajo aportando su sabiduría y ofreciéndome su apoyo y amistad.

A los Ing. Juan José Mora Flórez y Jorge Antonio Jaimes por su constante motivación y por su amistad.

A los miembros del grupo GISEL por su colaboración y asistencia que facilitaron el desarrollo de este trabajo.

A los ingenieros Edwin, Jaime y Wilson quienes me hacen sentir el verdadero valor de la amistad.

## TABLA DE CONTENIDO

### INTRODUCCIÓN

1. SUBESTACIONES ELÉCTRICAS Y SU CONFIABILIDAD.....	5
1.1    SUBESTACIONES DE TRANSMISIÓN.....	5
1.2    DESCRIPCIÓN DE LA SUBESTACIÓN.....	6
1.3    SISTEMA DE POTENCIA.....	9
1.3.1.    CONFIGURACIÓN DE LA SUBESTACIÓN.....	9
1.3.2.    ENCLAVAMIENTOS.....	11
1.3.3.    ÁREAS DE LA SUBESTACIÓN.....	12
1.3.4.    EQUIPOS PRIMARIOS DE POTENCIA (EQUIPOS DE PATIO).....	12
1.3.4.1.    Conductores, barras y conectores.....	13
1.3.4.2.    Interruptores.....	13
1.3.4.3.    Seccionadores.....	14
1.3.4.4.    Transformador de Potencia.....	15
1.3.4.5.    Transformadores de medida.....	15
1.3.4.6.    Pararrayos.....	16
1.3.4.7.    Trampas de onda.....	16
1.4    SISTEMAS FUNCIONALES.....	16
1.4.1.    SISTEMA DE PROTECCIONES.....	16
1.4.2.    SISTEMAS DE COMUNICACIONES.....	17
1.4.3.    SISTEMA DE CONTROL DE LOS EQUIPOS.....	18
1.4.3.1.    Clases de Control.....	18
1.4.3.2.    Niveles de control.....	19
1.4.3.3.    Equipos de control remoto.....	21
1.4.3.4.    Conmutadores de mando.....	21
1.4.4.    SISTEMA DE MEDIDA.....	22
1.4.5.    SISTEMA DE ALARMAS Y SEÑALIZACIÓN.....	24
1.4.6.    SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO.....	24
1.5    SISTEMAS ESENCIALES.....	26
1.5.1.    SISTEMA DE SOPORTE (SERVICIOS AUXILIARES).....	26
1.5.2.    ESQUEMATIZACIÓN.....	28
1.6    CONFIABILIDAD DE LAS SUBESTACIONES.....	29
1.6.1.    ALGORITMOS PARA CUANTIFICAR LA CONFIABILIDAD.....	30
1.6.1.1.    Espacio de estados.....	31
1.6.1.2.    Árbol de fallas.....	32

1.6.1.3.	Conjuntos de corte .....	32
1.6.1.4.	Métodos de frecuencia y duración .....	33
1.6.2.	CONFIABILIDAD DE LAS SUBESTACIONES ELÉCTRICAS .....	33
1.6.2.1.	Mantenimiento .....	34
1.6.2.2.	Estrategias de atención de fallas .....	34
1.6.2.3.	Habilidades y destrezas del personal de operación .....	35
1.6.2.4.	Forma en que se opera el sistema .....	35
2.	OPERACIÓN DE SUBESTACIONES ELÉCTRICAS .....	37
2.1	MANUAL DE OPERACIÓN .....	39
2.1.1.	CONSIGNA OPERATIVA .....	39
2.1.1.1.	Consignas operativas para equipos de patio .....	41
2.1.1.2.	Consignas operativas para equipos de soporte .....	43
2.2	FALLAS EN LAS SUBESTACIONES DE TRANSMISIÓN .....	44
2.2.1.	METODOLOGÍA .....	46
2.2.1.1.	Análisis .....	46
2.2.1.2.	Elaboración de propuestas de estrategias de atención de fallas .....	48
2.2.1.3.	Validación .....	49
2.2.2.	FALLAS NO DESTRUCTIVAS DE SUBESTACIONES DE TRANSMISIÓN .....	49
2.2.2.1.	Consignas bajo falla .....	50
2.2.2.2.	Consignas bajo falla asociadas a consignas operativas .....	52
2.2.2.3.	Consignas bajo falla asociadas a alarmas .....	57
2.2.3.	FALLAS DESTRUCTIVAS DE EQUIPOS DE SUBESTACIONES .....	59
2.2.3.1.	Plan de contingencias .....	60
2.2.3.2.	Metodología para la elaboración del PDC .....	61
2.2.3.3.	Procedimiento para la elaboración del PDC .....	62
2.2.3.4.	Planes de contingencia para fallas destructivas .....	63
3.	VALIDACIÓN Y COMPLEMENTACIÓN DE LOS PLANES DE CONTINGENCIA .....	68
3.1	INTRODUCCIÓN .....	68
3.2	VALIDACIÓN .....	69
3.2.1.	OBJETIVOS DEL PROCESO DE VALIDACIÓN .....	70
3.2.1.1.	Objetivo general .....	70
3.2.1.2.	Objetivos específicos .....	70
3.2.2.	FILOSOFÍA DE LA VALIDACIÓN .....	71
3.2.3.	METODOLOGÍA DEL PROCESO DE VALIDACIÓN .....	71
3.2.3.1.	Análisis .....	73
3.2.3.2.	Verificación .....	75
3.2.3.3.	Simulación .....	76
3.2.3.4.	Corrección .....	79
3.2.4.	RESULTADOS DEL PROCESO DE VALIDACIÓN .....	80

3.3	COMPLEMENTACIÓN DE LOS PLANES DE CONTINGENCIA.....	80
3.3.1.	FALLAS DESTRUCTIVAS EN EQUIPOS DE CONTROL Y PROTECCIÓN .....	81
3.3.1.1.	Plan Estratégico .....	81
3.3.1.2.	Plan Operativo.....	83
3.3.1.3.	Plan Administrativo.....	86
3.3.1.4.	Resultados de las estrategias .....	87
3.3.2.	FALLAS NO DESTRUCTIVAS EN EQUIPOS DE MEDIDA.....	87
3.3.2.1.	Sistema de medida de las subestaciones eléctricas.....	88
3.3.2.2.	Red de medidores de energía.....	89
3.3.2.3.	Medidores de Energía Multifuncionales. ....	89
3.3.2.4.	Consignas bajo falla para equipos de medición.....	91
3.3.2.5.	Resultados .....	92
3.3.3.	FALLAS NO DESTRUCTIVAS EN EQUIPOS DE COMUNICACIONES .....	92
3.3.4.	FALLAS NO DESTRUCTIVAS EN EQUIPOS DE TELECOMUNICACIONES PLP .....	94
3.3.4.1.	Trampas de Onda .....	95
3.3.4.2.	Cable de alta frecuencia .....	96
3.3.4.3.	Equipo terminal PLP.....	96
3.3.4.4.	Consignas Bajo Falla para Equipos PLP .....	96
3.3.5.	EQUIPOS DE COMUNICACIÓN POR FIBRA OPTICA.....	97
3.3.5.1.	Elementos principales en la comunicación por fibra óptica .....	98
3.3.5.2.	Equipos utilizados en un enlace con fibra óptica .....	99
3.3.5.3.	Consignas para los equipos de comunicación conectados por fibra óptica.....	101
3.3.5.4.	Eventos causantes de fallas .....	101
3.3.5.5.	Resultados .....	103
3.3.6.	FALLAS NO DESTRUCTIVAS EN EQUIPOS DE REGISTRO .....	103
3.3.6.1.	Consignas bajo falla de los equipos registradores de falla .....	104
3.3.6.2.	Eventos causantes de fallas .....	105
3.3.6.3.	Resultados .....	106
4.	REPRESENTACIÓN Y MODELADO DEL CONOCIMIENTO PARA PLANES DE CONTINGENCIA.....	107
4.1	INTRODUCCIÓN.....	107
4.2	TÉCNICAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL .....	108
4.2.1.	SISTEMAS BASADOS EN EL CONOCIMIENTO .....	108
4.2.2.	SISTEMAS DIFUSOS (FUZZY).....	109
4.2.3.	REDES NEURONALES.....	111
4.2.4.	ALGORITMOS GENÉTICOS.....	112
4.2.5.	RAZONAMIENTO BASADO EN CASOS (RBC).....	113
4.3	CONOCIMIENTO Y ADQUISICIÓN DEL CONOCIMIENTO .....	115
4.3.1.	SISTEMAS EXPERTOS Y SISTEMAS BASADOS EN CONOCIMIENTO .....	116
4.3.1.1.	Estructura de los sistemas basados en conocimiento. ....	117
4.3.2.	LENGUAJES DE PROGRAMACIÓN DE SISTEMAS EXPERTOS .....	120

4.3.2.1.	Lisp.....	120
4.3.2.2.	Prolog.....	122
4.4	REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO.....	123
4.4.1.	ESQUEMAS DE REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO .....	124
4.4.1.1.	Esquemas declarativos .....	124
4.4.1.2.	Esquemas procedimentales.....	129
4.5	FORMULACIÓN DE LA REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO.....	132
4.5.1.	CONOCIMIENTO DECLARATIVO DE LAS CONSIGNAS .....	134
4.5.1.1.	Marcos.....	136
4.5.1.2.	Redes semánticas.....	137
4.5.1.3.	Reglas de producción.....	140
4.5.2.	CONOCIMIENTO PROCEDIMENTAL DE LAS CONSIGNAS.....	146
5.	ESTRUCTURA DEL SISTEMA DE APOYO AL ASISTENTE DE SUBESTACIONES.....	148
5.1	INTRODUCCIÓN.....	148
5.2	SIMULACIÓN .....	149
5.2.1.	SISTEMA.....	152
5.2.2.	MODELADO DE SISTEMAS .....	153
5.2.3.	ESTRUCTURA DE LOS MODELOS DE SIMULACIÓN .....	155
5.2.3.1.	Metodología aplicable más fácilmente a sistemas continuos .....	156
5.2.3.2.	Metodología aplicable más fácilmente a sistemas discretos .....	156
5.2.4.	ETAPAS DE UN PROCESO DE SIMULACIÓN.....	156
5.3	MODELO FUNCIONAL DEL SISTEMA DE ENTRENAMIENTO Y SIMULACIÓN .....	157
5.3.1.	PROPÓSITO DEL SISTEMA.....	159
5.3.2.	MODELO DEL SISTEMA Y DE SUS COMPONENTES .....	160
5.3.2.1.	Primeras aproximaciones al sistema .....	160
5.3.2.2.	Estructura implementada .....	161
5.4	MÓDULO DE SIMULACIÓN: MODELO DEL FUNCIONAMIENTO DE UNA S/E .....	164
5.4.1.	SISTEMA DE POTENCIA.....	165
5.4.1.1.	Configuración .....	166
5.4.1.2.	Interruptor .....	168
5.4.1.3.	Seccionadores.....	168
5.4.1.4.	Barras.....	168
5.4.1.5.	Líneas.....	169
5.4.1.6.	Puestas a tierra .....	169
5.4.1.7.	Transformadores de tensión .....	169
5.4.1.8.	Consideraciones generales del modelo del sistema de potencia .....	169
5.4.2.	SISTEMAS FUNCIONALES .....	174
5.4.2.1.	Sistema de Protecciones .....	174
5.4.2.2.	Sistema de Medida.....	178
5.4.2.3.	Sistema de Alarmas .....	178

5.4.2.4.	Sistema de Control.....	179
5.4.2.5.	Sistema de Comunicaciones.....	187
5.4.2.6.	Sistema de Registro de Fallas .....	188
5.4.3.	SERVICIOS AUXILIARES .....	189
5.5	SISTEMA DE SIMULACIÓN .....	194
5.5.1.	MOTOR DE SIMULACIÓN.....	194
5.5.2.	ESCENARIOS DE SIMULACIÓN.....	195
5.5.3.	REGISTRO DE EVENTOS.....	195
5.5.4.	INTERFASE DE USUARIO .....	196
5.6	SISTEMA DE CONSIGNAS .....	196
5.6.1.	BASE DE DATOS DE CONSIGNAS .....	197
5.6.2.	PROCEDIMIENTOS .....	197
5.6.3.	FALLAS .....	197
5.6.4.	MODELO BÁSICO DEL ASISTENTE DE CONOCIMIENTO .....	199
5.7	SISTEMA DE ENTRENAMIENTO.....	201
5.7.1.	MODELO FUNCIONAL DEL “SISTEMA DE ENTRENAMIENTO” .....	202
5.7.1.1.	Evaluación.....	203
5.7.1.2.	Formación .....	203
5.7.1.3.	Normas de competencia .....	205
5.7.1.4.	Secuencias de entrenamiento.....	205
5.7.1.5.	Casos base .....	205
5.7.2.	UTILIZACIÓN DEL SIMULADOR.....	205
6.	IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA EN LOS PROTOTIPOS .....	207
6.1	ARQUITECTURA DEL SISTEMA .....	207
6.1.1.	CAPA DE CLIENTE O PRESENTACIÓN .....	208
6.1.2.	CAPA DEL DOMINIO DE LA APLICACIÓN.....	208
6.1.3.	CAPA DE DATOS.....	208
6.1.4.	SISTEMAS OPERATIVOS .....	209
6.1.5.	MANEJADORES DE BASES DE DATOS.....	209
6.1.5.1.	Microsoft SQL Server 2000 .....	209
6.1.5.2.	Microsoft Access 2000 .....	209
6.2	LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN: JAVA .....	209
6.3	DESARROLLO ORIENTADO A OBJETOS .....	211
6.3.1.	DIAGRAMA DE CLASES .....	211
6.3.2.	DIAGRAMAS DE CLASE PARA EL DESARROLLO DEL SIMULADOR.....	212
6.3.2.1.	Diagrama de clases del circuitos de control de interruptores y seccionadores .....	212
6.3.2.2.	Diagrama de clases y agregación de interruptores y seccionadores.....	214
6.3.2.3.	Árbol de herencia y agregación de los equipos de patio .....	215
6.3.3.	DIAGRAMA DE CASOS DE USO .....	216
6.4	FUNCIONAMIENTO DEL “SOFTWARE” .....	218

6.4.1.	ACCIONES CON EL RATÓN SOBRE EL PANEL “NIVEL 2 GUATIGUARA” .....	218
6.4.2.	ACCIONES CON EL RATÓN SOBRE EL ÁRBOL DE NAVEGACIÓN.....	220
6.4.3.	ACCIONES CON EL RATÓN SOBRE EL PANEL “NIVEL 2 AREA” .....	220
6.4.4.	ACCIONES CON EL RATÓN SOBRE EL PANEL “NIVEL 1” .....	221
6.4.5.	ACCIONES CON EL RATÓN SOBRE LAS VENTANAS “SECCIONADOR”.....	222
6.4.6.	ACCIONES CON EL RATÓN SOBRE LA VENTANA “INTERRUPTOR” .....	224
6.4.7.	ACCIONES CON EL RATÓN SOBRE LA VENTANA “CIRCUITO DEL GABINETE”.....	224
6.4.8.	CORRER CONSIGNAS.....	225
7. RESULTADOS CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....		228
7.1	RESULTADOS .....	228
7.2	CONCLUSIONES.....	229
7.3	RECOMENDACIONES .....	232
ANEXO A .....		238
ANEXO B.....		242
ANEXO C .....		246
ANEXO D .....		268

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Desagregación funcional de una Subestación Eléctrica.....	7
Figura 2: Interrelación entre el sistema de potencia y las subestaciones .....	7
Figura 3: Esquema funcional de un campo en una subestación .....	9
Figura 4: Principales funciones de una Subestación para el sistema de Potencia. ....	10
Figura 5: Desagregación básica de los Sistemas Primarios de Potencia.....	10
Figura 6: Disposición típica de los equipos de potencia en un campo de línea. ....	13
Figura 7: Circuito de control de un interruptor.....	14
Figura 8: Esquema funcional del sistema de protecciones.....	17
Figura 9: Desagregación operacional del control de una subestación .....	19
Figura 10: Jerarquización del sistema de control de la subestación. ....	20
Figura 11: Sistema de medida de una S/E de transmisión.....	23
Figura 12: Esquema funcional del sistema de señalización y alarmas.....	24
Figura 13: Sistema de registro, diagrama general.....	25
Figura 14: Desagregación de los sistemas esenciales.....	26
Figura 15: Configuración típica del sistema de servicios auxiliares.....	27
Figura 16: Curva bañera .....	30
Figura 17: Diagrama de estados de un sistema de dos componentes independientes .....	31
Figura 18: Árbol de fallas de un sistema de alimentación .....	32
Figura 19: Conjunto mínimo de cortes para un sistema de dos alimentadores.....	33
Figura 20: Diagrama unifilar del un campo de una subestación.....	42
Figura 21: Diagrama de flujo para la energización de un campo de la S/E Guatiguará.....	43
Figura 22: Diagrama unifilar del sistema de servicios auxiliares a operar.....	43
Figura 23: Metodología básica de elaboración de las estrategias de atención de fallas.....	46
Figura 24: Metodología de elaboración de las estrategias de falla.....	48
Figura 25: Formato de presentación de las consignas bajo falla.....	51
Figura 26: Procedimiento de las consignas de falla asociadas a consignas operativas .....	53
Figura 27: Esquema funcional de un interruptor u el sistema de control.....	54
Figura 28: Circuitos de control de un interruptor SF6 .....	55

Figura 29: Circuito típico de control de un seccionador.....	55
Figura 30: Fallas en los equipos de seccionamiento y corte.....	57
Figura 31: Procedimiento seguido en fallas asociadas al sistema de alarmas.....	58
Figura 32: Esquema funcional del sistema de señalización y alarmas.....	59
Figura 33: Fases básicas para desarrollar el plan de contingencias.....	64
Figura 34: Diagrama de flujo de acciones previas a condiciones de contingencia fase uno.....	65
Figura 35: Diagrama de flujo de acciones previas a condiciones de contingencia fase dos.....	65
Figura 36: Diagrama de flujo para el desarrollo del plan bajo condiciones de contingencia.....	67
Figura 37: Proceso metodológico para la validación de las consignas bajo falla.....	72
Figura 38: Fases básicas para desarrollar el plan de contingencias.....	81
Figura 39: Sistema de medida de las subestaciones de transmisión.....	89
Figura 40: Esquema general del sistema de comunicaciones PLP.....	94
Figura 41: Elementos principales en un sistema de comunicación por fibra óptica.....	98
Figura 42: Conjunto difuso.....	109
Figura 43: Conjuntos difusos para la activación de fallas en los sistemas de control.....	110
Figura 44: representación esquemática de una neurona.....	111
Figura 45: Estructura de los sistemas basados en casos.....	114
Figura 46: Estructura de los sistemas basados en el conocimiento.....	118
Figura 47: Software para sistemas expertos: lenguajes Vs herramientas.....	120
Figura 48: Pasos para alcanzar la mejor técnica de representar el conocimiento.....	133
Figura 49: Operaciones generales en los procedimientos operativos.....	134
Figura 50: Diagrama unifilar de una subestación.....	136
Figura 51: Representación de consignas mediante Marcos.....	137
Figura 52: Estructura de las consignas operativas.....	138
Figura 53: Representación de consignas mediante Redes Semánticas.....	139
Figura 54: Diagrama entidad-relación de las consignas.....	140
Figura 55: Reglas de inferencia: Modus Ponens – Modus Tollens.....	142
Figura 56: Estructura de las consignas bajo falla.....	143
Figura 57: Condiciones de falla.....	144
Figura 58: Matriz de decisión.....	145
Figura 59: Conocimiento declarativo: Consignas operativas.....	146
Figura 60: Conocimiento declarativo: Consignas bajo falla.....	147
Figura 61: Tipos de modelos comunes.....	154
Figura 62: Estructura causal entre operadores y los sistemas.....	158
Figura 63: Modelo Inicial Proyecto Simulador.....	160

Figura 64: Diagrama General de Componentes del Sistema .....	161
Figura 65: Estructura del sistema de simulación de procesos operativos .....	162
Figura 66: Modelo Funcional Proyecto Simulador .....	162
Figura 67: Estructura general del modelo de la subestación.....	165
Figura 68: Representación matemática de los cables .....	167
Figura 69: Representación del modelo B.....	167
Figura 70: Procedimiento seguido para actualizar el parámetro de tensión en la configuración ...	170
Figura 71: Procedimiento para especificar los flujos de corriente en las líneas .....	171
Figura 72: Perfil de carga asociado a una salida en una subestación.....	172
Figura 73: Impedancia que representa el perfil de carga de la figura anterior .....	172
Figura 74: Modelo circuital para determinar los flujos de corriente .....	173
Figura 75: Protecciones Principales de Línea.....	175
Figura 76: Esquema genera de conexión del sistema de protecciones de la S/E.....	177
Figura 77: Modelo general del sistema de protecciones asociado a un elemento de corte.....	177
Figura 78: Estructura del Modelo de los Equipos de Medida .....	178
Figura 79: Esquema básico del Modelo de Alarmas.....	179
Figura 80: Jerarquización y estructura del sistema de control.....	179
Figura 81: Modos de operación de sistema de control .....	180
Figura 82: Esquema general del interruptor.....	181
Figura 83: Diagrama funcional del polo del interruptor .....	181
Figura 84: Representación de las bobinas.....	181
Figura 85: Representación de los selectores de mando.....	182
Figura 86: Representación del pulsador .....	182
Figura 87: Representación de contactos auxiliares .....	183
Figura 88: Diagrama de control de un polo de un interruptor y modelo de simulación .....	183
Figura 89: Modelo del funcionamiento del motor del seccionador.....	184
Figura 90: Esquema de control de un seccionador y modelo de simulación.....	184
Figura 91: Representación del sistema de control del mímico de servicios auxiliares.....	185
Figura 92: Esquema funcional del modelo del Nivel de Control Uno.....	186
Figura 93: Esquema de un mímico de nivel de control uno de un campo de línea.....	187
Figura 94: Modelo general del Sistema de Comunicaciones.....	188
Figura 95: Estructura del Modelo del Sistema de Registro de Fallas .....	189
Figura 96: Representación de un Alimentador asociado a la red de servicios públicos.....	190
Figura 97: Representación de un Alimentador asociado a una planta generadora.....	190
Figura 98: Representación de un Alimentador asociado los bancos de baterías.....	191

Figura 99: Modelo de representación de las barras de distribución de corriente .....	192
Figura 100: Modelo Rectificador de Tensión .....	192
Figura 101: Modelo Inversor de Tensión .....	193
Figura 102: Configuración de los Servicios Auxiliares .....	193
Figura 103: Unidades funcionales del sistema de simulación .....	194
Figura 104: Elementos básicos del sistema de consignas .....	197
Figura 105: Elementos básicos del Asistente del Conocimiento o Sistema de Consignas .....	200
Figura 106: Unidades funcionales del sistema de capacitación .....	203
Figura 107: Arquitectura de Aplicaciones de Tres Capas.....	208
Figura 108: Arquitectura de Aplicaciones de Tres Capas usando Java .....	210
Figura 109: Representación de una clase .....	211
Figura 110: Diagrama de clases de los circuitos de control de interruptores y seccionadores.....	213
Figura 111: Diagrama de clases y agregación del circuito de control .....	214
Figura 112: Árbol de herencia y agregación de los equipos de patio.....	215
Figura 113: Casos de uso .....	217
Figura 114: Pantalla principal del programa (nivel 2) .....	218
Figura 115: Ingreso al campo de una subestación en el nivel 2.....	219
Figura 116: Acceso al patio de la subestación.....	219
Figura 117: Acceso al nivel uno de los campos de la subestación (casetas de control o mímicos) .....	220
Figura 118: Desplazamiento por los niveles de la S/E desde el árbol de navegación .....	220
Figura 119: Operación de equipos de patio desde nivel 2.....	220
Figura 120: Acceso al nivel 1 desde el nivel 2 (mímicos o casetas de control).....	221
Figura 121: Acceso al nivel 0 a desde el nivel 1 (patio de la S/E).....	221
Figura 122: Operación de los equipos de patio desde nivel 1 .....	222
Figura 123: Selectores de control de nivel 1 .....	222
Figura 124: Circuito de control del seccionador L137 .....	223
Figura 125: Gabinete de control del seccionador (nivel 0) .....	223
Figura 126: Gabinete de control del interruptor (nivel 0) .....	224
Figura 127: Circuito de disparo del polo R del interruptor L150 .....	224
Figura 128: Circuito de control del seccionador L157.....	225
Figura 129: Activación de fallas en los elementos del circuito de control.....	225
Figura 130: Ventana para la selección de consignas operativas.....	226
Figura 131: Asociar fallas a las respectiva consigna operativa .....	226
Figura 132: Despliegue de acciones de la consigna.....	227

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Criterios generales de evaluación de Técnicas de Representación del Conocimiento[44] .....	124
Tabla 2: Sintaxis de la lógica propositiva.....	126
Tabla 3: Tabla de verdad proposicional.....	127
Tabla 4: Conocimiento declarativo de primer nivel: Codificación de grupos, campos y elementos .....	135

**TÍTULO\***: VALIDACIÓN, COMPLEMENTACIÓN Y REPRESENTACIÓN DE PLANES DE CONTINGENCIA PARA FALLAS DE SUBESTACIONES

**AUTOR:** JORGE OLMEDO ARIZA CASTILLO \*\*

**PALABRAS CLAVES:**

Fallas en subestaciones.  
Plan de contingencia.  
Modelado de conocimiento.  
Simulación.  
Entrenamiento.

**DESCRIPCIÓN:**

La continuidad del suministro energía en el Sistema de Transmisión se constituye en factor reglamentario a partir de la reglamentación 061 de 2000 de la CREG, requiriendo establecer los parámetros para la atención de fallas en subestaciones.

Como primera respuesta a estos requerimientos, se desarrolla el proyecto “Desarrollo del plan de contingencias para fallas de equipos críticos principales y sistemas de control y de protección de subestaciones de Interconexión Eléctrica S.A. correspondientes al CTE Oriente”, para desarrollar e implementar las estrategias de atención de falla en la subestaciones, que consideró la necesidad de un complemento posterior.

Con este trabajo, se proponen la complementación y la validación de las estrategias de atención de fallas destructivas en las subestaciones de transmisión y el planteamiento de un sistema de entrenamiento para la adquisición de habilidades y destrezas en la operación de subestaciones.

El desarrollo del trabajo recoge dos alternativas metodológicas que se semejan a las planteadas en el método científico: una enfocada en la investigación del proceso de operación de subestaciones (consignas operativas y de falla) y la otra en la elaboración de la representación de los procedimientos y en la propuesta del sistema de entrenamiento.

El trabajo se estructuró en dos partes: una enfocada a la validación y complementación de los planes de contingencia y otra a la representación y modelado del conocimiento y al planteamiento del sistema de entrenamiento.

Se obtuvo: los planes de contingencia para fallas destructivas en salas de control, las consignas bajo falla para equipos de medida, comunicaciones y registradores de fallas, por un lado, y por otro, la estructura del conocimiento operativo, la base de datos de consignas y la estructura del sistema de simulación para el entrenamiento en la operación de subestaciones

---

\* Proyecto de grado

\*\* Facultad de Ciencias Físico – Mecánicas, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Gilberto Carrillo Caicedo.

**TITLE<sup>1</sup>:** VALIDATION, COMPLEMENTATION AND REPRESENTATION OF PLANS OF CONTINGENCY FOR FAULTS OF TRANSMISSION SUBSTATIONS

**AUTHORS:** JORGE OLMEDO ARIZA CASTILLO \*\*

**KEY WORDS:**

Substations faults.  
Contingency plan.  
Modeling of knowledge.  
Simulation.  
Training.

**DESCRIPTION:**

The continuity of the energy supply in transmission systems constitutes the regulation factor of law 061 of 2000 of the Colombian Energy and Gas Regulatory Commission–CREG, and it is required to establish the parameters for the attention of faults in substations.

As first answer to these requirements, the project " Development of the contingency plan of for faults of main critical equipment and control systems and of protection of substations of Electrical Interconnection ISA, corresponding to the East-CTE " was proposed. The aim of this project was to develop and to implement the strategies of fault attention in the substations and as result the necessity of a further study as later complement was identified.

In this latter work, the complementation and validation of the attention strategies of destructive faults in the transmission substations and the planning of a training system for the acquisition of abilities in substation operation was developed.

The development of the work considers two methodological alternatives that are looked like those outlined in the scientific method: one focused in the investigation of the operation of substations (operative and fault consign), and the other one in the elaboration of the procedures representation and in the proposal of the system of training.

The work here presented was organized in two parts: one focused to the validation and complementation of the contingency plans and another to the representation and modeling of the knowledge and to the planning of the training system.

As a result, was obtained the following: the contingency plans for destructive faults in control rooms, the under fault procedures for measurement equipment, communications and fault recorders, on one hand; and for other, the structure of the operative knowledge, the database of under fault procedures and the structure of the simulation system for training in the substation operation.

---

<sup>1</sup> Proyecto de grado

\*\* Facultad de Ciencias Físico – Mecánicas, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Gilberto Carrillo Caicedo.

## INTRODUCCIÓN

### Presentación del problema

La evolución de la tecnología ha traído como consecuencia la necesidad de usar la energía eléctrica. La requieren, la industria, el comercio, las comunicaciones y las actividades cotidianas, para su funcionamiento eficiente, por lo cual se exige una calidad adecuada en su suministro.

La confiabilidad, la seguridad y la calidad del servicio, se constituyen en factores preponderantes como lo establece la resolución 061 de 2000 de la CREG<sup>2</sup>. En ella se establecen las normas aplicables a los servicios de transporte de energía eléctrica en el STN<sup>3</sup> y de conexión al STN, como parte del reglamento de operación del SIN<sup>4</sup>.

La resolución en mención se aplica a todos los agentes económicos asociados a la transmisión de energía eléctrica. En esta resolución se definen los términos: “activos de conexión”, “activos de uso”, “disponibilidad” e “índice de disponibilidad”.

Otros factores dentro de la operación de las subestaciones de Interconexión Eléctrica S.A. (ISA) que influye en la continuidad del servicio, son los cambios en la estructura operacional de las subestaciones y la reducción de su personal. Actualmente, la operación de los equipos primarios de las subestaciones se realiza desde centros remotos de control, el personal en los sitios (subestaciones) se encuentra presente sólo en horarios de oficina. Esto exige de la operación de las subestaciones, nuevas habilidades, destrezas y aptitudes en el control supervisión y operación, además una mayor eficiencia y productividad.

Con esto, la operación de las subestaciones es un campo potencial para el desarrollo de sistemas enfocados en la optimización de sus procesos. Dada la importancia y número de subestaciones en el sistema eléctrico los esfuerzos en optimizar sus procesos y confiabilidad repercutirán en la calidad del servicio.

Como primera aproximación de respuesta a estas exigencias, se desarrolla el proyecto “Desarrollo del plan de contingencias para fallas de equipos críticos principales y sistemas de control y de protección de subestaciones de Interconexión Eléctrica S.A.

---

<sup>2</sup> CREG: Comisión de Regulación de Energía y Gas

<sup>3</sup> STN: Sistema de Transmisión Nacional

<sup>4</sup> SIN: Sistema Interconectado Nacional

correspondientes al CTE Oriente”, para implementar las acciones que se deben realizar en caso de falla destructiva de transformadores e interruptores, así como los pasos a seguir en caso de una falla no destructiva en los sistemas de control, protección y en los equipos de maniobra de interruptores y seccionadores de las diferentes subestaciones de ISA – CTE Oriente.

Con el desarrollo de este trabajo, los conocimientos operativos de las subestaciones, se registraron en documentos que contienen: las secuencias de acciones para una determinada operación en el sitio, las respuestas ante la inoperancia de la mayoría de equipos y las inspecciones necesarias ante fallas, recogiendo en parte la experiencia necesaria en la operación de los equipos. Sin embargo se requiere mayor cobertura en los conocimientos operativos tanto en condiciones normales como anormales de los sistemas de la subestación, y su revisión y validación para prevenir errores en las maniobras o procedimientos.

Este proyecto concluye con la necesidad de ampliar, evaluar y validar el desarrollo alcanzado. Con el desarrollo del trabajo de esta tesis, se proponen realizar los procedimientos operativos para solucionar fallas no destructivas para los equipos de telecomunicaciones, medición y registradores de falla, así como procedimientos para solucionar las fallas destructivas de los equipos de control y protección de las subestaciones de ISA CTE Oriente.

También se necesita establecer una metodología de validación, para probar que los procedimientos y maniobras operativas son efectivos, y no representan peligro para el funcionamiento de los sistemas y las personas que las realizan. Por otro lado, se busca completar el manual de operación en cada una de las subestaciones de ISA – CTE Oriente, para solucionar la necesidad de la organización de documentar la experiencia y los procedimientos operativos, esto es a perpetrar la experiencia.

Sin embargo, no solo la elaboración de procedimientos operativos de falla garantiza una respuesta adecuada a las fallas operativas, otros factores intervienen en la pronta recuperación de los equipos como la capacidad de respuesta y el conocimiento que tenga el personal de operación; Se requieren de los operadores, nuevas habilidades y conocimientos operativos.

Para lograr esto, en primera instancia se debe tener el modelado y la representación del conocimiento de los procesos operativos en subestaciones eléctricas, y además, plantear la estructura de un sistema que apoye la labor del operador de la subestación ante eventos de fallas de equipos. Este sistema será una herramienta para el operador de la subestación, permitiendo la simulación de maniobras, funciones y fallas. Dado que la simulación resume toda la teoría relacionada con un proceso, reproduciendo situaciones reales mediante situaciones semejantes creadas artificialmente. A través de la simulación se busca que el trabajador aprenda ciertas acciones y habilidades propias de su oficio para posteriormente aplicarlas con eficacia.

Por tanto se plantea en este trabajo la propuesta de un sistema de entrenamiento para la adquisición y la práctica de habilidades y destrezas necesarias para el manejo de equipos y sistemas en la operación de subestaciones. Esto es especialmente valido para aquellos procesos que implican mayor responsabilidad, y donde cualquier error pueda ocasionar salida del sistema, daño de equipos, o pérdidas de materia prima, entre otros.

Este documento corresponde al desarrollo del trabajo de investigación “Validación, complementación y representación de los planes de contingencia para fallas de subestaciones” desarrollado entre la Universidad Industrial de Santander e Interconexión Eléctrica S.A.

### **Objetivos y alcances del trabajo**

Los objetivos generales para este trabajo son:

Elaborar los planes de contingencia para fallas en los equipos de telecomunicaciones, medida y registros de fallas, y los planes de contingencia para el caso de fallas destructivas en los sistemas de control y protección de las subestaciones del CTE Oriente.

Elaborar una estructura de representación del conocimiento con base en las técnicas de la inteligencia artificial, y plantear la estructura de un sistema que apoye la labor del operador de la subestación ante eventos de fallas de equipos, mediante la simulación de consignas operativas y de fallas en los equipos. Esta herramienta para la capacitación del operador de la subestación, propugna por la realización de maniobras y la atención en caso de fallas en equipos más segura.

Complementar el plan de contingencia para caso de fallas de equipos de maniobra, control y protección de las subestaciones de interconexión eléctrica S.A.E.S.P ISA, CTE Oriente.

Continuar el fortalecimiento de la relación entre la universidad y las empresas del sector eléctrico colombiano para el desarrollo integral de la región.

### **Organización de la tesis**

El primer capítulo de este informe está dedicado a explicar el tema general que enmarca el trabajo. Presenta la descripción de las subestaciones eléctricas y los estudios de confiabilidad para la operación de las subestaciones eléctricas. La confiabilidad basada en la atención de fallas, tema poco tratado teóricamente pero que en la práctica tiene un desarrollado vertiginoso en muchos sistemas en los cuales se requiere una continuidad óptima. De igual manera se presenta el sistema de las subestaciones, y se presenta una desagregación que se ha establecido basados en la necesidad que se han presentado en el desarrollo del trabajo y que difiere enormemente de las concepciones que se tenían de la misma.

El capítulo dos se orienta a la descripción de la operación de las subestaciones eléctricas, se presenta la estructura de operación de subestaciones, se describen los procedimientos y estrategias de atención de fallas, planteadas inicialmente en su concepción fundamental. Este capítulo es indispensable para el desarrollo de los siguientes capítulos.

En el capítulo tres se describe el trabajo de complemento realizado a los procedimientos de fallas destructivas y no destructivas. Se presenta la metodología y aplicaciones del proceso de validación que contempla la revisión y corrección, el desarrollo de procedimientos operativos para los sistemas de comunicaciones, medida y registro en el caso de fallas no destructivas y para las salas de control en el caso de fallas destructivas.

En el capítulo cuatro se desarrolla la estructura de conocimiento planteado para la representación de los planes de contingencia, se presenta una visión de las herramientas de modelado de sistema diferentes a las convencionales, se desarrolla y destaca la técnica que se utilizó en la representación de los procedimientos operativos para las subestaciones.

En el capítulo cinco se plantea el modelo del sistema que apoye la labor del operador de la subestación ante los eventos propios de su operación. Este sistema será una herramienta para el operador de la subestación, permitiendo la simulación de maniobras, funciones y fallas, la consulta de procedimientos operativos en condiciones normales y de falla y la consulta de los requisitos del cargo del operador.

En el capítulo seis se describe la herramienta de “software” que se construyó basada en el modelo planteado en el capítulo cinco. Se describen los requerimientos de “software”, el diseño de la herramienta y su aplicación.

Por último, en el capítulo siete se presentan las conclusiones más relevantes de este trabajo, así como las recomendaciones que permiten continuar avanzando en el tema.

## **1. SUBESTACIONES ELÉCTRICAS Y SU CONFIABILIDAD**

Como parte integral del sistema, las subestaciones de transmisión funcionan como puntos de conmutación para líneas de transmisión y subtransmisión, alimentadores de circuitos de generación y transformadores elevadores y reductores. Esto implica que la optimización de su operación está relacionada ampliamente con el comportamiento de las subestaciones eléctricas frente a los factores que pueden afectar su comportamiento normal. Se debe evitar, por tanto, que estos factores afecten el sistema de transmisión y consecuentemente la calidad y confiabilidad deseada.

Para evitar los factores indeseables en las subestaciones hay dos puntos de vista, antes y durante su funcionamiento normal.

En primer lugar, en el diseño y selección de la configuración de la subestación se debe considerar aquella con mejores índices de confiabilidad. En la parte económica esto se puede considerar teniendo en cuenta los costos por energía no suministrada de cada configuración.

En segundo lugar, en el funcionamiento y operación, se deben implementar planes y acciones ante fallas, capacitación o entrenamiento de los operadores y mejora de los esquemas de operación con el ánimo de disminuir el tiempo de reemplazo de equipos, la recuperación de la operatividad en la subestación o la ejecución de maniobras.

Para considerar estos puntos de vista, en primera instancia es necesario describir los sistemas que integran una subestación y los factores que conllevan a su selección a través de un estudio de las subestaciones. En segundo lugar, como la confiabilidad del sistema está relacionada ampliamente con las subestaciones, es necesario profundizar la teoría de confiabilidad especialmente en mejorar la operatividad de sus sistemas.

En este capítulo se presentan estas dos consideraciones, se comienza con una descripción de las subestaciones de transmisión, tema principal de este proyecto, partiendo de una desagregación en los sistemas que la componen, y se sigue con la presentación de dos enfoques de confiabilidad aplicados a subestaciones, uno considerado en la etapa de valoración de la confiabilidad y el otro aplicado en la mejora de la disponibilidad operativa.

### **1.1 SUBESTACIONES DE TRANSMISIÓN**

En los grandes sistemas de energía eléctrica, los centros de consumo se encuentran alejados de los centros de generación, y por cuestiones técnicas, las tensiones a que se

genera electricidad son relativamente bajas. Si se quisiera transmitir la energía, a esos niveles de tensión, resultaría muy oneroso. Para que el transporte sea posible, se debe elevar la tensión en lugares denominados estaciones de transformación. También con el ánimo de mejorar la confiabilidad y de tener los parámetros del sistema en condiciones estables, es necesario de un sistema que conecte las partes generadoras con redes de distribución que atienden a los centros de consumo, este es el Sistema de Transmisión que comprende líneas de transmisión y subestaciones de conmutación, de elevación y de reducción de tensión.

Una subestación es un conjunto de equipos utilizados para dirigir el flujo de energía, cambiar el nivel de tensión y garantizar la seguridad, confiabilidad y flexibilidad del sistema de transmisión. Básicamente una subestación es un arreglo de interruptores seccionadores, transformadores de potencia, transformadores de medida y pararrayos, en forma de líneas de entrada y salida de flujo de energía (potencia) [39].

## **1.2 DESCRIPCIÓN DE LA SUBESTACIÓN**

A través del estudio de las diferentes subestaciones del CTE Oriente y de los libros de subestaciones [39], [49], [33] entre otros se ha encontrado que una subestación es más que una serie de equipos interconectados: es una serie de sistemas cooperando para garantizar los requerimientos de seguridad, flexibilidad y confiabilidad que el sistema requiere para un buen funcionamiento.

La desagregación funcional de la subestación muestra una visión global del sistema y una representación de su funcionamiento a través de la simplificación circuital y de conexión que presentan. Esta abstracción proporciona la identificación de funciones y la caracterización de sus elementos. En la Figura 1 se presentan las funciones que están presentes en una subestación, así como su jerarquización. En ella se pueden ver tres niveles, un nivel de sistema (equipos primarios de potencia), un nivel funcional (protección, control, etc.) y un nivel de sistemas básicos.

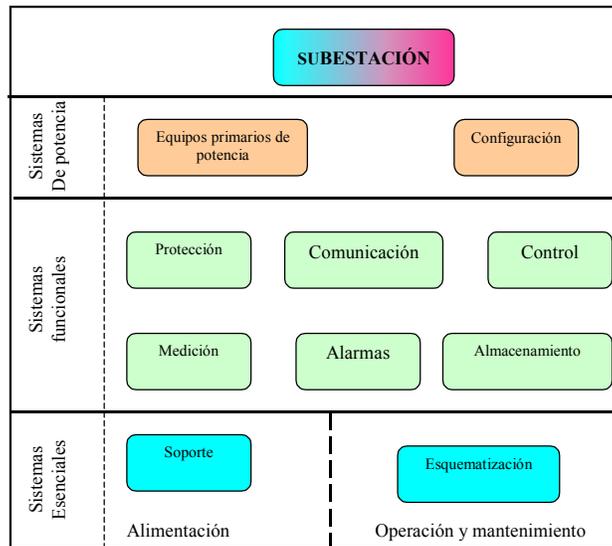


Figura 1: Desagregación funcional de una Subestación Eléctrica

En el primer nivel se agrupan las relaciones de una subestación con el sistema interconectado: flexibilidad, confiabilidad y seguridad.

El sistema de transmisión influye en el diseño de la subestación y la subestación influye en la operación y en el estado del sistema de transmisión. En la Figura 2 se pueden ver estas relaciones. Los factores relativos a la flexibilidad del sistema para posibilitar ampliaciones de subestaciones y configuración del sistema Interconectado, así como los factores de operación y mantenimiento de los elementos del sistema y de la subestación, son de gran importancia y quedan determinados en el arreglo o configuración que se hace en las subestaciones.

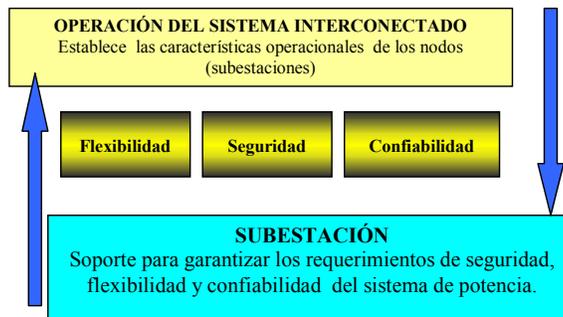


Figura 2: Interrelación entre el sistema de potencia y las subestaciones

En el segundo nivel aparecen los sistemas funcionales que se encargan de controlar, monitorizar y supervisar la red de transmisión y los equipos primarios de potencia. Estos sistemas que por lo general son complejos en su funcionamiento y estructura son: el sistema de protecciones, el sistema de control, el sistema de alarmas, el sistema de registro de fallas, el sistema de comunicaciones y el sistema de medición.

En el tercer nivel aparecen los sistemas esenciales que son fundamentales para el funcionamiento de los demás sistemas. Por un lado los servicios auxiliares, y por el otro, el sistema de esquematización necesario para una óptima operación y mantenimiento.

Por otra parte, desde el punto de vista constructivo, una subestación se encuentra formada por dos partes, la sala de control y el patio de conexiones.

En la sala de control se tiene el tablero mímico de control o la interfase de control, en donde se controla realmente la subestación. El mímico contiene un diagrama sinóptico de la configuración de los elementos de mando y señalización que controlan los equipos de patio, el sistema de alarmas, los indicadores de corriente, tensión, potencia activa, potencia reactiva y temperatura de transformadores y los equipos de sincronización y control de cambio de tomas. Algunas subestaciones presentan parte de estos sistemas ubicados en las casetas de control que se encuentran en el patio.

En el patio de conexiones se encuentran los equipos primarios de potencia, los gabinetes de concentración de cables, los gabinetes de operación de los equipos que lo requieren, los herrajes que los soportan y conectan, y la configuración de los equipos.

Las principales partes de una subestación desde el punto de vista operacional son:

- Sistema de control.
- Sistema de protecciones.
- Sistema de comunicaciones.
- Sistema de medida.
- Sistema de servicios auxiliares.
- Sistema de registro de fallas.
- Sistema de alarmas.
- Sistema de esquematización y planos.
- Configuración de una subestación y equipos que la componen.

En la Figura 3 se pueden observar las relaciones que existen entre los tres niveles. Los equipos primarios de potencia hacen parte del sistema interconectado y representan el corazón de la subestación (relacionados con el corte, seccionamiento y transformación del sistema interconectado), los sistemas o funciones (control, protección, etc.) están directamente relacionados con la seguridad y confiabilidad del sistema, y por último los servicios esenciales que son el soporte de funcionamiento, se encargan de suministrar la energía, y la información para una óptima operación y mantenimiento.

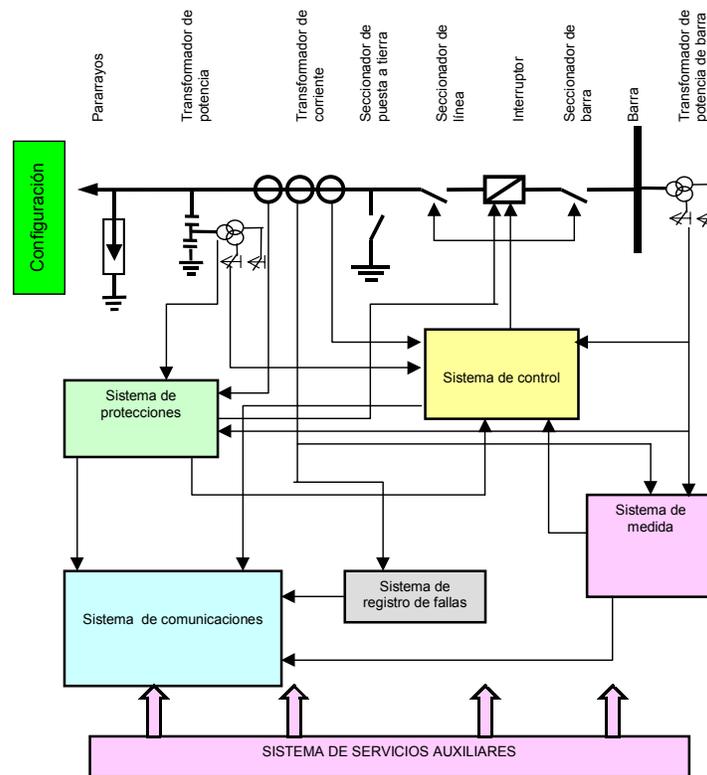


Figura 3: Esquema funcional de un campo en una subestación

### 1.3 SISTEMA DE POTENCIA

En esta parte de la desagregación se encuentran los equipos primarios de potencia y la topología de conexión que conforma la configuración; representa la relación de la subestación con el sistema interconectado y es el corazón de la subestación.

#### 1.3.1. CONFIGURACIÓN DE LA SUBESTACIÓN

Más que un sistema, la configuración es una característica que la da el arreglo eléctrico y físico de los equipos que constituyen el patio de la subestación, y comprende el conjunto de equipos y barras que tienen el mismo nivel de tensión y están localizados en el mismo sector. Esta característica proporciona al sistema de transmisión, propiedades que brindan confiabilidad seguridad, flexibilidad, continuidad del servicio, sencillez y economía (diseño) en diferente grado. La selección de una u otra configuración depende de las consideraciones y de la valoración de las propiedades que se necesiten en el sistema.

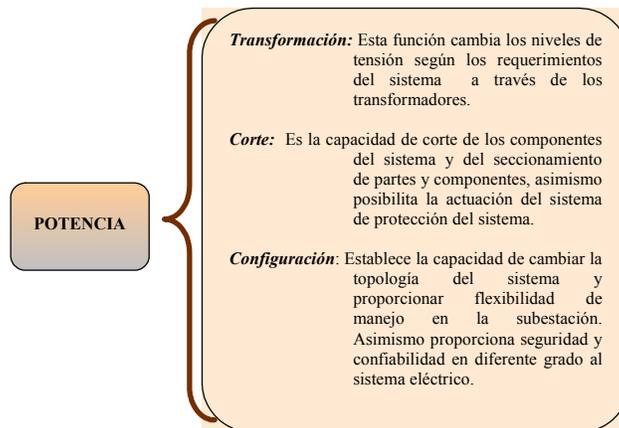


Figura 4: Principales funciones de una Subestación para el sistema de Potencia.

Otros aspectos a tener en cuenta en la selección de la configuración de una subestación, son las facilidades que pueda proporcionar para realizar mantenimientos a interruptores, líneas, transformadores de potencia y seccionadores, sin interrupción del servicio ni riesgo para el personal a cargo.

De la configuración o esquema de la subestación depende el conjunto de maniobras que se pueden realizar y el conjunto de condiciones para su realización (enclavamientos y consignas operativas). Estas condiciones a su vez definen las características de las consignas operativas y de las consignas bajo falla asociadas a estas.

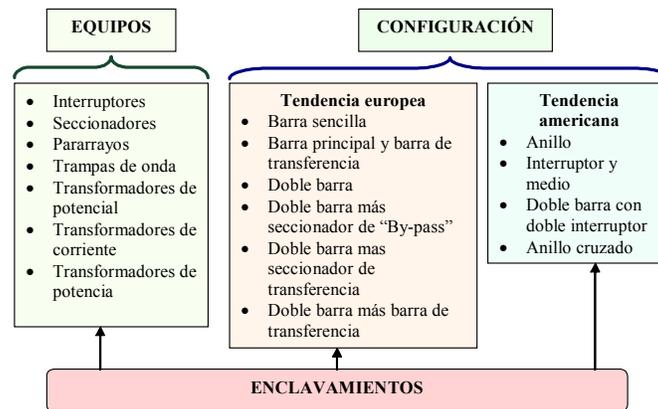


Figura 5: Desagregación básica de los Sistemas Primarios de Potencia

Aunque existen muchas clases de subestaciones, las configuraciones básicas de las subestaciones del CTE Oriente, son cuatro: barra sencilla, doble barra con transferencia, barra principal mas barra de transferencia, e interruptor y medio. Estas configuraciones se pueden ver en el Anexo A.

### 1.3.2. ENCLAVAMIENTOS

Las condiciones que se deben cumplir para la apertura o el cierre de un interruptor o un seccionador se conocen como enclavamientos. Dependiendo de la procedencia, las condiciones pueden ser propias del equipo, externas o del sistema. Las condiciones propias del equipo son las producidas por los sensores que chequean sus condiciones; presión de  $\text{sf}_6$ , energía insuficiente para la maniobra, etc. Las condiciones externas se refieren principalmente a la posición de otros equipos en la misma subestación y están relacionadas con la configuración de la subestación, el nivel de control o el estado de los relés de protección. Las condiciones del sistema se refieren principalmente a los estados de las variables de tensión y frecuencia para la realización de una operación.

Las principales reglas de los enclavamientos que se tienen en una subestación son:

Un seccionador nunca se debe maniobrar con carga a menos que la tensión entre los terminales sea cero.

Para maniobrar un seccionador, el interruptor o interruptores asociados, así como las cuchillas de puesta a tierra, deben estar abiertos.

Las cuchillas de puesta a tierra sólo se maniobran cuando el seccionador de línea asociado está abierto.

Los seccionadores de "by pass" o paso directo se cierran con tensión cuando el interruptor que tiene el paralelo está cerrado, es decir cuando hay la misma tensión en sus terminales.

Un seccionador de transferencia se puede cerrar con tensión cuando hay la misma tensión en sus dos terminales, es decir cuando el interruptor de transferencia está cerrado. Adicionalmente, únicamente puede permanecer cerrado un seccionador de transferencia.

Los seccionadores de barras, en subestaciones de doble barra se pueden operar con tensión cuando el interruptor de acople esté cerrado.

Un interruptor para cerrar debe cumplir las condiciones de sincronismo entre los sistemas que conecta, debe tener los seccionadores cerrados, no pueden existir cuchillas de puesta a tierra cerradas y el equipo que se va a energizar debe estar dispuesto para ello.

En algunas configuraciones se requieren reglas propias para los enclavamientos o de la excepción de alguna o algunas de las antes mencionadas en condiciones especiales, aunque la mayoría se ajustan a ellas.

En las subestaciones con control convencional, los enclavamientos se efectúan por medio de lógica cableada (contactos de posición de equipos conectados en serie y/o paralelo), mientras que en las subestaciones con control coordinado, se efectúan por medio de lógica programable en los equipos de cómputo o proceso digital. Sin embargo, para el control desde nivel cero, los enclavamientos se efectúan por medio de lógica cableada.

### **1.3.3. ÁREAS DE LA SUBESTACIÓN**

Como se dijo anteriormente, la configuración es una característica que la da el arreglo eléctrico y físico de los equipos que constituyen el patio de la subestación. Estos equipos se encuentran agrupados en conjuntos que se relacionan estrechamente en su sistema de control, este conjunto recibe el nombre de áreas, campos o bahías. Los tipos de áreas que se encuentran en una subestación son:

- Área de acople: conformada por los interruptores y seccionadores encargados de acoplar las barras de la subestación.
- Área de seccionamiento de barras: la conforman los equipos que se encargan de la división o seccionamiento de una barra.
- Área de transferencia de interruptores: conformada por los equipos encargados del reemplazo de los interruptores propios de cada área.
- Área de acople de barras y transferencia de interruptores: conformada por los grupos de equipos que se encargan de realizar las funciones de acople de barras y de transferencia o reemplazo de interruptores.
- Áreas de circuito de generación: la conforman los equipos asociados a un alimentador perteneciente a un generador.
- Área del circuito de la unidad de generación: conformada por los equipos asociados a una unidad generadora.
- Área de transformación: integrada por los equipos asociados al transformador de potencia.
- Área de autotransformación: integrada por los equipos asociados al autotransformador.
- Área de circuito de línea: conformada por los equipos asociados a las salidas de las líneas de transmisión.
- Área de reactores: conformada por los equipos asociados a los reactores.
- Área de condensadores: conformada por los equipos asociados a los condensadores.

### **1.3.4. EQUIPOS PRIMARIOS DE POTENCIA (EQUIPOS DE PATIO)**

Los equipos que le dan la configuración a una subestación son los equipos de patio o equipos primarios de potencia. Estos proporcionan características operacionales particulares, por ejemplo, si la subestación posee o no transformador de potencia le dará

un grado de operación complejo o simple. Los equipos que hacen parte de la configuración, (ver Figura 6) se presentan a continuación.

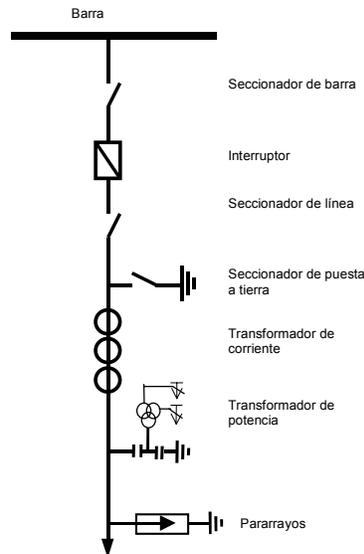


Figura 6: Disposición típica de los equipos de potencia en un campo de línea.

#### 1.3.4.1. Conductores, barras y conectores

Los conductores, las barras y los conectores son los elementos que proporcionan condiciones adecuadas para el transporte de corriente eléctrica, es decir, baja resistencia al paso de la corriente, resistencia mecánica apropiada para soportar los esfuerzos electrodinámicos presentes en las subestaciones y capacidad apropiada para el transporte de corriente de acuerdo con los niveles de potencia que se manejan en el sistema [39].

Estos elementos interconectan los equipos primarios de potencia de las subestaciones, y los sistemas de potencia.

#### 1.3.4.2. Interruptores

El interruptor es un dispositivo destinado al cierre y apertura de un circuito eléctrico bajo carga normal y en condiciones de cortocircuito. El interruptor es, junto con el transformador, el dispositivo más importante de una subestación y el que requiere mayor supervisión; su comportamiento determina el nivel de confiabilidad que se puede tener en un sistema eléctrico de potencia. Sirve para insertar o retirar de cualquier circuito energizado una línea, y en otros casos máquinas, aparatos o cables[49].

Generalmente se clasifican de acuerdo con el medio utilizado para la elongación y enfriamiento del arco eléctrico permitiendo su extinción. Estas clases son: de aire, de aceite, de SF6 y de vacío.

Dentro de la subestación el interruptor juega un papel importante gracias a sus características funcionales. Desde el punto de vista de operación y de consignas operativas (de falla y normales) es el elemento que presenta mayor detalle y mayor complejidad<sup>5</sup>.

Los interruptores de la mayoría de subestaciones poseen dos circuitos de disparo y uno de cierre, los circuitos de disparo y cierre están asociados a los sistemas de control y de protecciones, el sistema de protecciones de las líneas tiene por lo general dos protecciones principales PL1 y PL2, cada una asociada a un sistema de disparo diferente. En la Figura 7 se puede observar de manera simplificada el circuito de control de un interruptor; se representa únicamente una bobina, algunos interruptores de los enclavamientos y el bloque de control.

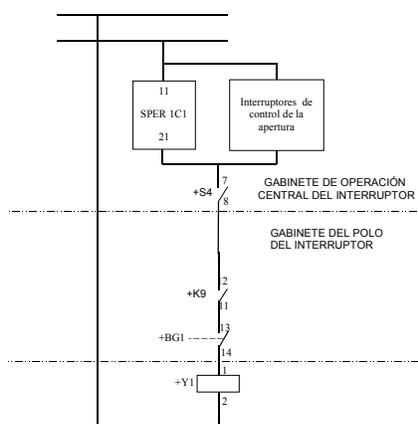


Figura 7: Circuito de control de un interruptor

### 1.3.4.3. Seccionadores

El seccionador es un dispositivo eléctrico utilizado para abrir o cerrar diversas partes de una instalación eléctrica cuando no circula una corriente. Los seccionadores pueden desempeñar diversas funciones siendo las más comunes la de aislamiento de circuitos por necesidad de operación o la de aislamiento visible de los componentes del sistema (equipos o líneas) [33]. Los seccionadores utilizados en instalaciones eléctricas de alta tensión, se pueden clasificar de dos formas:

- Según las funciones que desempeñan en el sistema se clasifican en: Seccionador de maniobra, seccionadores de tierra, seccionadores de operación en carga y seccionadores de puesta a tierra rápida.

<sup>5</sup> Las consignas para fallas en la operación de estos equipos son las que presentan mayor complejidad

- Según su construcción se clasifican en: Seccionadores de cuchillas giratorias, seccionadores de cuchillas deslizantes, seccionadores de pantógrafo seccionadores especiales y seccionadores con cuchillas de puesta a tierra [35]

Dependiendo de la posición en la configuración y de la clase de seccionador (fabricante) dependerán sus características. Para el control los seccionadores están equipados con motores que por lo general funcionan con corriente continua proveniente del sistema de servicios auxiliares. Este motor se puede accionar desde el gabinete de control del equipo o desde los sistemas de control superiores (niveles superiores al nivel 0<sup>6</sup>), también en caso que no se pueda operar con el motor, tienen mandos manuales a través de manivelas que proporcionarían la potencia mecánica para la operación. Los seccionadores de puesta a tierra no permiten su operación desde niveles de control superiores al nivel 0, por razones de seguridad para el sistema y los equipos de la subestación.

#### **1.3.4.4. Transformador de Potencia**

Los transformadores son elementos estáticos de inducción formados por un sistema de bobinas mutuamente acopladas y se utilizan para realizar cambios de tensión en un sistema de potencia. Los valores de la tensión primaria y secundaria establecen una distinción entre los devanados<sup>7</sup>, permitiendo nominarlos como devanado de Alta tensión y devanado de Baja tensión. Junto con el interruptor son los equipos más relevantes de una subestación. Poseen sensores que están supervisando las condiciones de trabajo y sistemas de regulación de temperatura, y permiten la señalización de las variables que maneja. A los transformadores se les puede variar la relación de transformación a través de cambiadores de “tap” o interruptores conmutables [34].

#### **1.3.4.5. Transformadores de medida**

Los transformadores de medida son dispositivos cuya función es reducir a valores no peligrosos y normalizados, la tensión y la corriente de una red eléctrica, evitando la conexión directa entre los instrumentos de medida, protección y control con los circuitos de alta tensión. Desde el punto de vista operacional, estos equipos no permiten realizar ninguna acción operativa.

Los transformadores de corriente son aquellos en los cuales la intensidad en el secundario es directamente proporcional a la intensidad en el primario. Los circuitos secundarios de los transformadores de corriente deben estar cerrados permanentemente, bien por los aparatos de medida o por un simple puente, ya que de lo contrario aparecen entre sus bornes sobretensiones peligrosas, tanto para el personal como para el equipo.

---

<sup>6</sup> El nivel cero corresponde al control desde el equipo, los niveles de control se explicarán más adelante en la parte de control.

<sup>7</sup> Los devanados son los arrollamientos de conductor que forman las bobinas.

Los transformadores de tensión son aquellos equipos en los cuales la tensión en el secundario es directamente proporcional a la tensión primaria. Los transformadores de potencial tienen dos finalidades: Aislar el circuito de baja tensión del circuito de alta tensión y que las condiciones del circuito de alta tensión sean reproducidas lo más fielmente posible en el circuito de baja tensión.

#### **1.3.4.6. Pararrayos**

Los pararrayos son dispositivos eléctricos formados por elementos resistivos no lineales y explosores que limitan la amplitud de las sobretensiones originadas por descargas atmosféricas, operación de interruptores o desbalance del sistema. Tiene las siguientes características especiales: se comporta como un aislador mientras la tensión aplicada no exceda de cierto valor predeterminado, se vuelve conductor al alcanzar la tensión ese valor y conduce a tierra la corriente producida por la onda de sobretensión, cuando desaparece la sobretensión recupera sus condiciones aislantes.

#### **1.3.4.7. Trampas de onda**

Las trampas de onda son dispositivos que se conectan en los terminales de las líneas de alta tensión. Su impedancia debe ser baja para la frecuencia industrial, de tal forma que no perturbe la transmisión de energía, pero debe ser relativamente alta para cualquier banda de frecuencia utilizada para comunicación por portadora. Por lo general el rango de frecuencia utilizado para comunicación por portadora es de 30-500 kHz, de acuerdo con las frecuencias ya usadas por la compañía de servicios y con la longitud de la línea.

### **1.4 SISTEMAS FUNCIONALES**

Las subestaciones utilizan gran cantidad de elementos integrados en conjuntos funcionales con el propósito de monitorizar y controlar el sistema interconectado. Estos incorporan elementos electrónicos de última tecnología tales como microcontroladores, elementos electrónicos inteligentes (intelligent electronic devices IEDs), entre otros, que facilitan y posibilitan gran cantidad de funciones.

Los sistemas funcionales se encargan de controlar, monitorizar y supervisar la red de transmisión y los equipos primarios de potencia, estos son: el sistema de protecciones, el sistema de control, el sistema de alarmas, el sistema de registro de fallas, el sistema de comunicaciones y el sistema de medición. Por lo general son sistemas complejos en su funcionamiento y estructura.

#### **1.4.1. SISTEMA DE PROTECCIONES**

Por diversas razones como la acción de agentes atmosféricos, errores humanos y fallas en aislamientos, se producen incidentes o disturbios en la red, que pueden reducir sus efectos al mínimo mediante la utilización de un adecuado sistema de protección. El

objetivo de un sistema de protección consiste en reducir la influencia de una falla en el sistema, para que no se produzcan daños relativamente importantes en él, en las personas y en los animales. Para conseguir lo anterior se deben cubrir de manera ininterrumpida los sistemas de generación, transmisión y distribución de energía mediante esquemas de protección y relés que hayan sido diseñados para tales propósitos [10].

Los equipos de protección que intervienen a nivel de sistema, interactúan con el sistema de control y con el interruptor. Además de los equipos encargados de proteger el sistema existen sistemas que se encargan de proteger áreas, sistemas y equipos en la subestación. Los esquemas de funcionamiento y conexión del sistema de protecciones son complejos y para representar su funcionamiento es necesario representar su funcionamiento de manera funcional (ver Figura 8).

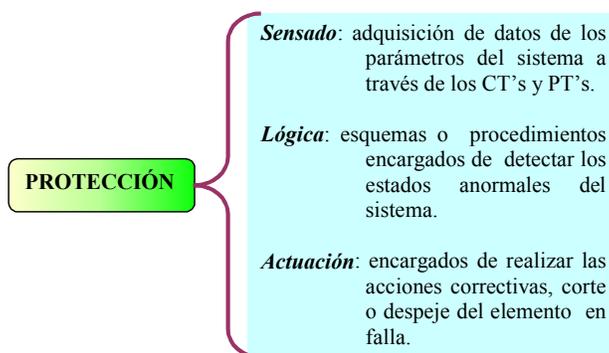


Figura 8: Esquema funcional del sistema de protecciones.

#### 1.4.2. SISTEMAS DE COMUNICACIONES

El sistema de comunicaciones permite la integración de las subestaciones y la centralización de su operación, con el objetivo de mantener la confiabilidad y la uniformidad en las variables características del sistema, su función hace que este sistema deba tener una disponibilidad óptima ya que posibilita la variedad de aplicaciones de los sistemas de control modernos. El hecho de que el sistema eléctrico trabaje con la confiabilidad necesaria depende del nivel de sofisticación que tenga el sistema de comunicaciones.

Las principales formas de comunicación empleadas a nivel del sistema de transmisión nacional son Portadora por Línea de Potencia (PLP), fibra óptica y microondas.

Las subestaciones que utilizan PLP, aprovechan el tendido físico de las líneas de potencia para enviar información utilizando como medio, el cable de potencia, Este método utiliza equipos especiales, necesarios para la transformación y manipulación de la información de tal manera que se pueda transmitir por este medio.

La fibra óptica, por su parte, está insertada en el cable de guarda de la línea de potencia, tiene un gran ancho de banda que permite enviar más datos y utiliza equipos diferentes a los utilizados por el PLP.

Los equipos de comunicaciones son complejos en su composición interna (los operadores se centran en la supervisión y el control), sin embargo, se requiere caracterizar cada equipo y hacer el modelo funcional para desarrollar el simulador.

### **1.4.3. SISTEMA DE CONTROL DE LOS EQUIPOS**

Se define como el conjunto de elementos encargados de verificar, proteger y ayudar a gobernar un sistema específico y debe proporcionar flexibilidad para expansión, automatización, seguridad, disponibilidad, flexibilidad, simplicidad en el mantenimiento e interfase [39].

En este sistema se tienen centralizados todos los elementos de control en lo que se denomina edificio de control de la subestación. Consta básicamente de: sala de control, cuarto de relés de protección, sala de cables, cuarto de servicios auxiliares, cuarto de comunicaciones, cuarto para la planta de emergencia y oficina para operadores.

En general un sistema de control de una subestación está constituido por: dispositivos para el control remoto, registradores de eventos, mímicos, sistema de protecciones contadores de energía, registradores de fallas, sistema de alarmas, transductores, indicadores, dispositivos de mando y señalización, tableros de agrupamiento, sistema de enclavamientos, control de cambiadores de tomas y equipos de comunicaciones.

A manera de desagregación y desde el punto de vista operacional se puede decir que el control se ve desde dos puntos de vista, el nivel de operación y la clase de control, ver Figura 9. La clase de control, hace referencia al sistema de control implementado en la subestación y las características que proporciona. El nivel de operación hace referencia al lugar en donde se realiza la operación de los equipos.

#### **1.4.3.1. Clases de Control**

Las clases de control encontradas son de dos tipos: control numérico y control convencional.

##### **Control numérico**

Con las nuevas tecnologías y con el desarrollo en los sistemas de control existen hoy día sistemas que mejoran el rendimiento, la calidad y flexibilidad de los procesos. Las subestaciones de transmisión están incorporando estas tecnologías en sus sistemas de control.

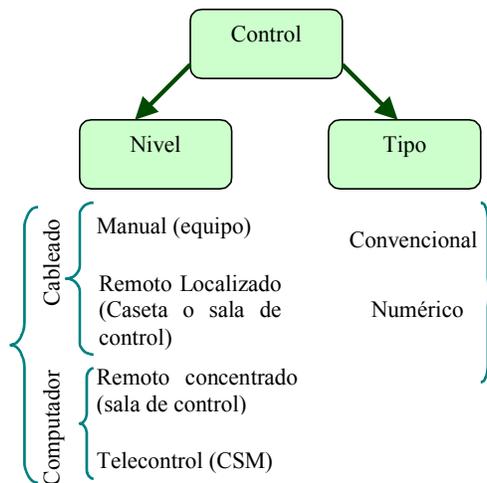


Figura 9: Desagregación operacional del control de una subestación

La centralización y el registro de datos son las características principales de un sistema de control numérico, su simplicidad reside en la conectividad que ofrecen los actuales sistemas de control. Estos sistemas son los llamados sistemas SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) o “software” de monitorización y control que permiten el acceso a datos del proceso y una interacción más dinámica entre el operador (interfases gráficas y mímicos) y el proceso. Esto es lo que se conoce en las subestaciones con el nombre de control coordinado o control numérico [2], [13].

### Control convencional

Las subestaciones antiguas tienen implementados sistemas de control convencionales, es decir, el control se realiza a través de interruptores en sinópticos por pantallas configurables y animadas, pero estáticas y voluminosas, en estos sistemas de control no se cuenta con la ayuda de un computador para hacer el control,

#### 1.4.3.2. Niveles de control

El control de una subestación se realiza jerárquicamente como se indica en la Figura 10.

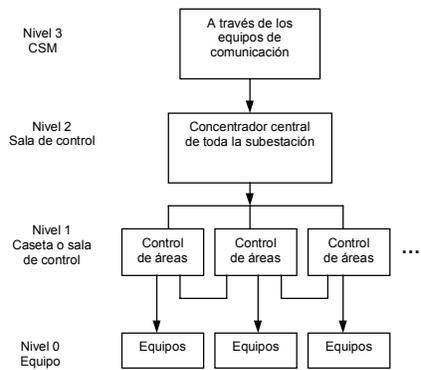


Figura 10: Jerarquización del sistema de control de la subestación.

En cada uno de estos niveles, están ubicados equipos encargados de realizar las labores de control y supervisión y se tiene la consigna de que un nivel inferior inhibe un nivel superior [1].

## Nivel 0

En este nivel se encuentran los equipos de patio y se realizan, normalmente, las operaciones de mantenimiento. Los enclavamientos de las cuchillas de puesta a tierra y los enclavamientos entre cada seccionador y sus interruptores asociados, requeridos para operación local, se realizan por medio de cableado físico en el patio.

## Nivel 1

Este nivel corresponde a la operación de los equipos desde las casetas de control, o desde la sala de control a través de los controladores de campo y de servicios auxiliares. En la mayoría de subestaciones esta operación se realiza en los mímicos con que cuentan los controladores a través de lógica cableada.

## Nivel 2

Corresponde al nivel de operación en la subestación desde las interfases Hombre-máquina (IHM) localizadas en la sala de control del edificio de subestación. En este nivel se realiza la operación y supervisión global de los equipos de maniobra y servicios auxiliares de todas las áreas que integran la subestación. La información entre los niveles 1 y 2 se envía por medio de una red de área local, que utiliza como medio físico el cable de fibra óptica. La red está conformada por concentradores de datos, módulos de comunicación de red y fibra óptica.

### **Nivel 3**

Corresponde a la operación desde el Centro Nacional de Despacho (CND) o Centro de Supervisión y Maniobras (CSM), localizado en Medellín, donde se realiza en forma remota, un control supervisor sobre la subestación a través de los equipos del Sistema de Control Coordinado (SCC). Cuando la función de selección del modo de control de la subestación se encuentra en REMOTO, el control de los interruptores de la subestación queda transferido a este nivel. Los equipos que permiten esta flexibilidad son las Unidades Terminales Remotas (RTU) y se ubican en la subestación.

#### **1.4.3.3. Equipos de control remoto**

El elemento principal en el control remoto de las subestaciones son las unidades terminales remotas, UTR o RTU las cuales envían la información de la subestación (medidas analógicas señalización o posición de equipos de maniobras y alarmas) al centro de control a través de un canal de comunicación (PLP, radio, microondas o red de comunicaciones) y a su vez recibe la información de éste, comandos hacia la subestación. En el tablero mímico se instala un conmutador de selección del modo de control (local, remoto, desconectado) [39].

Las señales analógicas tienen que ser convertidas a señales de corriente continua de amplitud baja por medio de transductores, para ser enviadas a través de las RTU. La señalización y las alarmas provenientes del patio de la subestación se separan galvánicamente de la RTU para evitar daño y distorsión de la información ocasionadas por la interferencia electromagnética en los cables, por medio de relés de interposición. Por las mismas razones anteriores y para amplificar las señales de salida de la RTU, generalmente los comandos de los equipos de maniobras utilizan también relés de interposición.

Todas las señales provenientes del patio de la subestación y de otros elementos del control se agrupan en un tablero, en el cual se efectúa la separación de las señales hacia el tablero donde se realiza la separación de las señales hacia el tablero mímico y la RTU.

#### **1.4.3.4. Conmutadores de mando**

Los conmutadores de mando se utilizan para el mando de los equipos desde el mímico, representando además el equipo en el esquema sinóptico de la subestación.

#### **Relés de interposición**

Los relés de interposición sirven como elementos de acople y de aislamiento galvánico entre el equipo de patio y la RTU en lo que se refiere a mandos e indicaciones.

Los relés de interposición para indicación o cambio de estado generalmente se alimentan con la misma tensión (Vcc) general de la subestación. Mientras que los utilizados para mando de equipos deben ser alimentados por la tensión de CC de la RTU.

#### **1.4.4. SISTEMA DE MEDIDA**

En las subestaciones eléctricas es necesario tener una medida de la cantidad de energía que entregan o consumen las líneas o alimentadores conectados. Para medir la energía eléctrica se utilizan contadores de energía. Estos elementos permiten conocer la cantidad de energía producida o consumida, y realizar gráficos de consumo que faciliten el estudio de nuevas instalaciones y el control de las horas de mayor consumo. Los instrumentos y aparatos de medida, indican de forma indirecta, el valor de la magnitud medida. Generalmente las señales de tensión y de corriente se transforman a valores convencionales que no presentan ningún riesgo para la lectura. Los contadores pueden ser analógicos o digitales, aunque la tendencia es a utilizar los digitales gracias a la multifuncionalidad que proporcionan. En la mayoría de las subestaciones se dispone de Contadores de Energía Multifuncionales para cada campo de línea en configuración redundante, con un contador principal y otro de respaldo.

Los medidores multifuncionales son unidades de medida programables con múltiples funciones, con capacidad de medida y registro para, las variables de energía activa y reactiva, demandas, potencia activa y reactiva, corriente y tensión. Tienen puertos de comunicación serie que permiten la implementación de la red de contadores de energía para la transmisión de esta información y el acceso de forma remota. Utiliza un “software” de comunicación de protocolo abierto, que permite la integración de un gran número de unidades dentro de la misma red. Una red de contadores de energía está compuesta por un concentrador, que constituye la unidad de acceso a la red para la conexión y direccionamiento de los contadores de energía, de un módem para el acceso remoto a la red, y de los conversores opto-eléctricos requeridos para realizar la conexión con el medio de comunicación usado en la red, los principales elementos de la red son:

**Enrutador o Concentrador:** Este dispositivo permite el diálogo entre el PC LOCAL o el PC REMOTO y todos los contadores de energía multifuncionales (CEM), por un canal de datos tipo RS-232C. El enrutador recibe del PC LOCAL o REMOTO una dirección (número serial) con la cual identifica el respectivo contador y establece la conexión automáticamente, sin necesidad de conmutación manual.

**Módem Telefónico:** La exploración y acceso remoto de los contadores se efectúa por medio de un MODEM conectado a un canal telefónico conmutado a 2 hilos, a través del cual es posible efectuar las mismas funciones que se realizan de forma local.

**Convertor óptico eléctrico:** Estos conversores convierten las señales eléctricas del puerto serial RS232 - RS485 bidireccionales e independientes del protocolo en señales ópticas. Proporciona una comunicación de datos inmune a parásitos a través de cable de fibra óptica, permite transmisiones a grandes distancias, entre 2 interfases RS 232 (hasta 3700 m a través de fibra de vidrio). Permite adaptación de interfases con un interfase estándar

serie. La velocidad de transmisión de datos queda determinada por la interfase de potencia más baja. En la Figura 11 se puede ver un gráfico de la configuración del sistema.

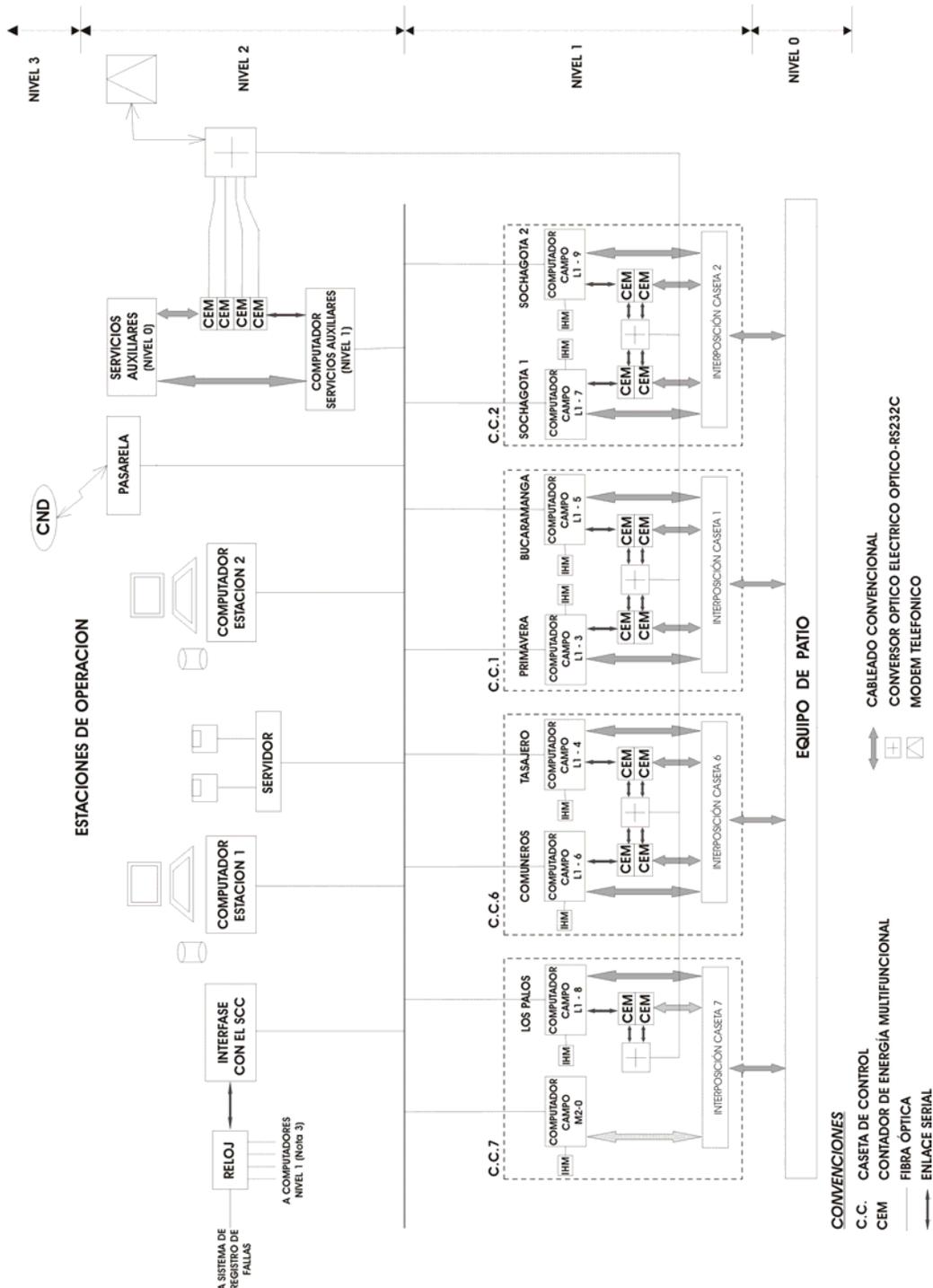


Figura 11: Sistema de medida de una S/E de transmisión

### 1.4.5. SISTEMA DE ALARMAS Y SEÑALIZACIÓN

La característica de la subestación y el desarrollo del sistema de control permiten monitorizar la mayoría de sus subsistemas por medio de sensores o relés. Éstos detectan anomalías en su funcionamiento, activando las señales de alarma que se registran en el sistema de control. El sistema de alarmas monitoriza un gran número de señales que indican el funcionamiento de los equipos. Las alarmas son visualizadas en el computador central a través de la interfase con el operador o en los anunciadores los cuales constan de indicación luminosa, de diferente color para jerarquizar las señales, y de indicación sonora.

Cuando ocurre una alarma en la subestación se enciende la señal luminosa respectiva, de forma intermitente en el anunciador y se energiza la alarma sonora, el operador procede a realizar el reconocimiento de la alarma apagando las señales sonora y luminosa. Una vez reconocida la alarma, se toman las acciones e instrucciones de las consignas para solucionar el problema que ocasionó la alarma, después, se procede a reponer el anunciador y a registrar los datos en la bitácora. En la Figura 12 se pueden observar los sistemas que envían señales a los anunciadores o a la computadora.

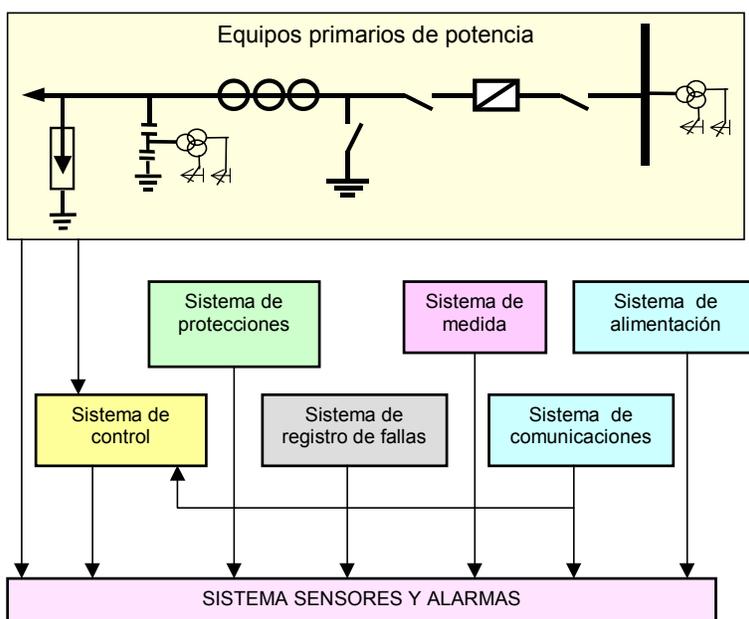


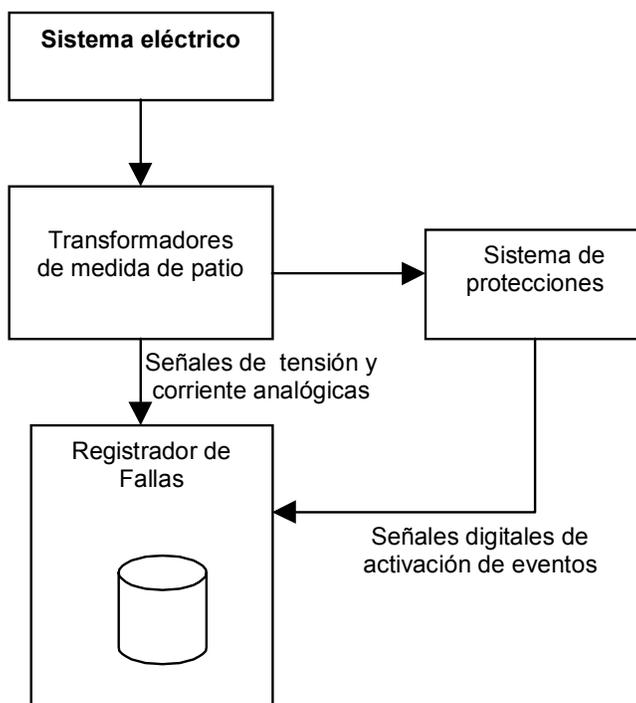
Figura 12: Esquema funcional del sistema de señalización y alarmas

### 1.4.6. SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO

El sistema de registro de fallas se encarga de almacenar y entregar el comportamiento de la red en una perturbación. Cuando se presenta una anomalía en el sistema, por ejemplo un rayo impacta una línea, el sistema de registro de fallas almacena los valores de los vectores de tensión y corriente durante una ventana de tiempo prefijada. A la falla que

origina el almacenamiento se le denomina evento. El sistema de registro de fallas proporciona el comportamiento de la red durante la activación de las protecciones.

El sistema de registro de fallas es importante porque ayuda a prevenir fallas que generan altos costos para el sistema eléctrico gracias al almacenamiento de las características de la misma, ayudando a corregir la fijación de los equipos de protección para el despeje de estas fallas. El diagrama funcional o de bloques de un sistema de registro de fallas se muestra en al Figura 13.



*Figura 13: Sistema de registro, diagrama general*

Los registradores de falla son equipos digitales, completamente programables, y deben ser capaces, mínimo, de manejar ocho (8) entradas analógicas y dieciséis (16) entradas digitales, para requerimientos del sistema eléctrico. Un equipo para el Registro de Fallas en una red eléctrica, debe contar con las señales de tensión y corriente de la línea o el campo, tal como se le cablean a un relé de distancia. Estas señales son acopladas y posteriormente digitalizadas utilizando conversores Analógico/Digital.

Además de las señales de tensión y corriente mencionadas anteriormente, el registrador de fallas debe tener canales de entrada digital para obtener la información a manera de contactos de operación y arranque de las protecciones de distancia, operación de recierre, determinación de la posición de los polos del interruptor de la línea entre otros, configurados de acuerdo con el criterio del analista o en su defecto de acuerdo con la normalización.

Una vez se tenga la información en forma digital se procesa y se guarda en una memoria interna organizada en archivos que posteriormente son de fácil consulta para el analista.

## 1.5 SISTEMAS ESENCIALES

Los sistemas esenciales se pueden dividir en dos: uno teniendo en cuenta el funcionamiento de la subestación y conformado por los equipos y sistemas de distribución encargados de la alimentación de los equipos y los sistemas; también llamado servicios auxiliares.

El otro sistema es esencial desde el punto de vista operacional y de mantenimiento, para realizar las tareas de operación y mantenimiento de una manera óptima. Hacen parte de éste los mímicos, los diagramas unifilares, los planos esquemáticos, los planos de conexión, los diagramas funcionales, etc. (ver Figura 14).

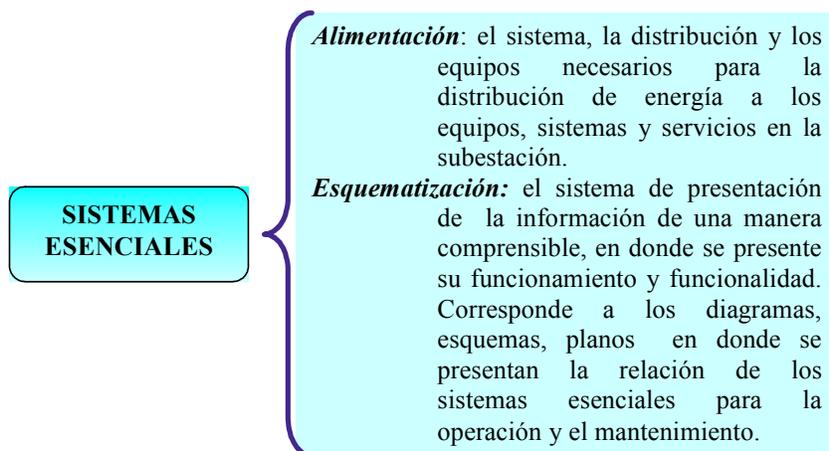


Figura 14: Desagregación de los sistemas esenciales

### 1.5.1. SISTEMA DE SOPORTE (SERVICIOS AUXILIARES)

Este importante sistema se encarga de suministrar la energía necesaria para el funcionamiento de los equipos que componen los sistemas de la subestación y debe proporcionar los niveles de tensión que requieren los equipos para su funcionamiento.

Se caracteriza por el modo de operación, la flexibilidad y el grado de confiabilidad de su configuración. El operador puede realizar operaciones en estos equipos sin la autorización del CSM. La configuración puede variar según el grado de redundancia y el nivel de tensiones que utiliza. El esquema general de este sistema se puede ver en la Figura 15.

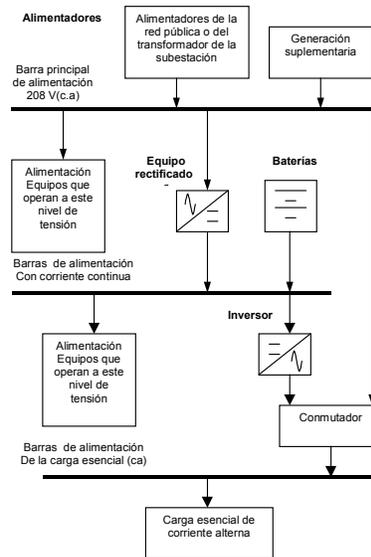


Figura 15: Configuración típica del sistema de servicios auxiliares.

Los equipos presentes en este sistema son:

Rectificador: se encarga de cambiar la corriente alterna en corriente continua.

Inversor: se encarga de cambiar la corriente continua en corriente alterna.

Batería: se encarga de generar corriente cuando los sistemas de alimentación fallan, una característica es el nivel de tensión de funcionamiento.

Fuentes de alimentación: dentro de estos equipos se tiene los alimentadores de la red pública, conformados por transformadores, seccionadores bajo carga, medidores, e interruptores. Los generadores tienen acoplado un motor de combustión que proporciona la potencia mecánica y una serie de interruptores que se encargan de conectar y desconectar las barras.

Barras: son placas de cobre en donde se conectan los diferentes interruptores para la alimentación de los equipos, se diferencian dependiendo de la clase de corriente que sea, para corriente alterna por lo general son cuatro barras de cobre una para cada fase y una para el neutro, para corriente continua son dos una para el positivo y una para el negativo.

Interruptores: son de tensiones bajas y medianas, se encargan de proteger los equipos que alimentan.

La conexión de estos elementos se puede resumir en un diagrama unifilar, el cual es un esquema que simplifica la información del sistema eléctrico proporcionando información de las características y propiedades del mismo.

### **1.5.2. ESQUEMATIZACIÓN**

Los diagramas, esquemas y planos representan de forma simbólica las partes, el funcionamiento, la relación de elementos, la funcionalidad, etc. Allí se asocian los sistemas esenciales para la operación y el mantenimiento.

Este sistema realiza la presentación de la información de una manera comprensible, representa una subestación por niveles de complejidad y comienza por el nivel más sencillo, la representación unifilar de la configuración. En ésta, la abstracción de la complejidad circuital es la mayor. Los diagramas de bloque representan un nivel de detalle más complejo, y la representación de los planos de conexión de una subestación, tiene en cuenta todos los detalles.

El sistema de esquematización tiene como función la conceptualización y la representación de las relaciones de los diferentes sistemas de la subestación (protecciones, comunicación, control, etc.) a fin de atacar en forma precisa y gráfica la integración de sus diferentes elementos y la incorporación de los componentes numéricos (PLC). Está conformada por:

- Diagramas unilaterales: son las representaciones de los sistemas, en donde se simplifica su complejidad, permiten ver características esenciales sin necesidad de entrar en detalles específicos. Ayudan a la comprensión y visualización de la subestación.
- Diagramas de bloques: en estos diagramas, se presentan las funciones principales de los sistemas y las relaciones con los demás elementos tanto del mismo sistema como de sistemas externos.
- Planos de conexión: en estos, el nivel de detalle es el más profundo, representan en su totalidad los elementos y sistemas, así como la manera de conexión de los componentes. Facilitan también realizar el seguimiento de una señal de control y de detalles de su trayectoria.

La siguiente lista presenta algunos planos que se tienen en las subestaciones, entre otros:

- Diagramas Unilaterales.
- Diagramas Trifilares.
- Diagramas de Mando y Control.
- Diagramas de Protecciones.
- Diagramas de Alarmas.
- Diagramas de Señalización.

- Diagramas de Enclavamientos.
- Diagramas de Medición.
- Diagramas de integración con el sistema de Comunicaciones.
- Diagramas de integración con el sistema de Automatización.
- Diagramas de Alimentación.

## **1.6 CONFIABILIDAD DE LAS SUBESTACIONES**

Como concepto general, puede plantearse que la confiabilidad es un mecanismo que cuantifica la habilidad de un sistema o equipo, de cualquier naturaleza, para desempeñar su función, permite estimar los riesgos que pueden afectar su condición normal. Posibilita el mejoramiento de la disponibilidad, el desempeño de los equipos, el mantenimiento y la operación asegurando la producción y funcionamiento del sistema bajo parámetros de seguridad y calidad adecuados. Esta cuantificación de la habilidad de un sistema puede expresarse por una gran variedad de índices, dependiendo de los objetivos que se persigan en la valoración.

La confiabilidad del suministro de energía a los usuarios depende del adecuado funcionamiento del sistema de transmisión. Las subestaciones de transmisión hacen parte de éste y son puntos neurálgicos por la importancia de su función.

Las subestaciones consisten, como ya se ha descrito anteriormente, de componentes tales como equipos de seccionamiento y corte, barras, transformadores, etc. que por diversos motivos, se ven sometidos a fallas o salidas de servicio que pueden afectar el funcionamiento adecuado del sistema de transmisión o su confiabilidad. La confiabilidad para los sistemas de las subestaciones de transmisión se establece mediante la evaluación de índices que reflejen la capacidad de ésta para permitir el flujo de energía entre las entradas y salidas ante la falla de sus componentes y la localización de equipos críticos que requieran atención especial ante fallas.

La confiabilidad se encarga de presentar estudios o valoración de los índices de fallas que pueden ayudar a la toma de decisiones sobre propuestas alternativas de elementos de protección, políticas de mantenimiento y operación, incorporación de elementos de maniobra automatizados entre otros, pero no indica o especifica las acciones o procedimientos a seguir, necesarias para el reestablecimiento cuando el sistema se encuentra en condiciones anormales.

La confiabilidad de las subestaciones se puede, entonces, abordar desde dos puntos, el primero enfocado al análisis clásico de la valoración de los índices de confiabilidad y el segundo enfocado a las acciones o procedimientos a seguir para que el sistema no entre en falla (mantenimiento) o si se encuentra en condiciones anormales, para la recuperación de su operatividad.

### 1.6.1. ALGORITMOS PARA CUANTIFICAR LA CONFIABILIDAD

La confiabilidad de las subestaciones eléctricas, medida a través de índices de desempeño, tiene orientaciones diferentes: la selección de la configuración en el diseño del sistema de transmisión, el registro de eventos pasados, la predicción de confiabilidad, la selección de equipos críticos, etc. Las empresas que operan las subestaciones normalmente llevan un registro estadístico de los eventos pasados, con los cuales pueden evaluar el desempeño de sus sistemas y evaluar algunos indicadores económicos y técnicos.

Para las evaluaciones de confiabilidad de un sistema es necesario dividirlo en subsistemas, que a su vez pueden ser subdivididos sucesivamente. Esta subdivisión se establece hasta que se alcance el nivel de componentes, esto es, la mínima parte de la que se conocen los modos y la estadística de sus fallas. La tasa de falla expresa la probabilidad de que un componente, que haya funcionado durante un período dado, falle en el instante siguiente.

La representación clásica de la tasa de falla en función del tiempo es conocida con el nombre de curva bañera, en la Figura 16 se muestra para un componente típico. En ella se distinguen tres tramos, que corresponden a períodos de vida del componente: el de las fallas iniciales (la mortalidad infantil de las estadísticas demográficas), que se manifiestan prematuramente y son debidas a defectos de diseño, fabricación o montaje. Luego (la edad adulta), la tasa de falla decrece y se estabiliza: las fallas son aleatorias e independientes del tiempo de vida del componente. El tercer tramo (la vejez) se caracteriza por un aumento significativo de la tasa de falla, debido a la degradación, envejecimiento y desgaste del componente. Este modelo, con algunas variantes, es válido para la mayoría de los componentes de un sistema. Las fallas iniciales pueden eliminarse mediante pruebas previas a la operación, mientras que una política adecuada de reemplazos permite reducir las producidas al fin de la vida útil. La mayoría de las evaluaciones de confiabilidad, entonces, se refieren al período en que prevalecen las fallas aleatorias.

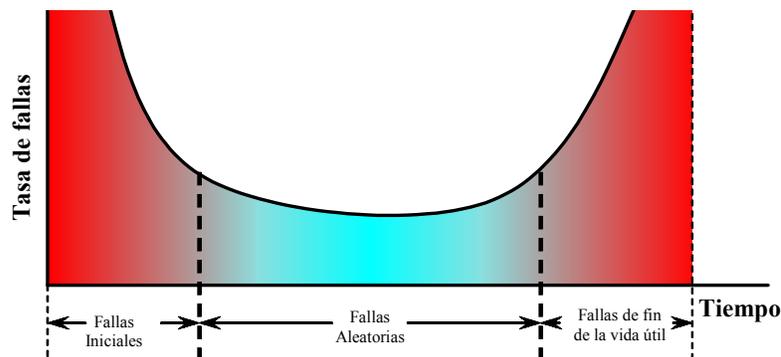


Figura 16: Curva bañera

Según el modo de funcionamiento, los componentes se clasifican en dos clases, a saber [40], [41]:

- Los que funcionan en forma continua durante un período preestablecido, que se denomina tiempo de *misión*.
- Los que permanecen en estado de espera y, en ciertas circunstancias, generalmente imprevistas, deben entrar en funcionamiento continuo.

En el primer caso, el componente es tanto más confiable cuanto menos probable sea que ocurran fallas durante el tiempo de misión. En el segundo, interesa principalmente su *disponibilidad*; o sea, la fracción de tiempo en que se encuentre en aptitud de funcionar. La confiabilidad y la disponibilidad de componentes se expresan como probabilidades.

Dado que un sistema puede considerarse como un conjunto de componentes interrelacionados, su confiabilidad depende de la de sus componentes y de la lógica de sus interrelaciones, que pueden ser de tipo serie, de tipo *paralelo* o una combinación de ambos. Tres métodos muy usados para evaluar la confiabilidad de sistemas son el de espacio de estados, el del árbol de fallas y el de conjuntos de corte.

### 1.6.1.1. Espacio de estados

En este método un sistema se representa por sus estados y por las transiciones entre ellos. Un estado del sistema implica una condición particular en la cual cada componente se encuentra en un estado determinado; por ejemplo, cuando un componente está en funcionamiento, fallado, en reparación, etc. su representación gráfica se denomina diagrama de espacio de estados, en la Figura 17 se muestra una representación de un sistema de dos componentes mediante este método. Si el estado de un componente cualquiera cambia, cambia el estado del sistema. Todos los estados posibles del sistema constituyen el espacio de estados. Las tasas de transición entre estados (entre ellas, la tasa de falla) permiten calcular las probabilidades de dichas transiciones. Con esas probabilidades, se determinan las de permanencia del sistema en cada estado. Tales evaluaciones suelen complicarse en el caso de sistemas con gran número de componentes, lo que limita el ámbito de aplicación del método.

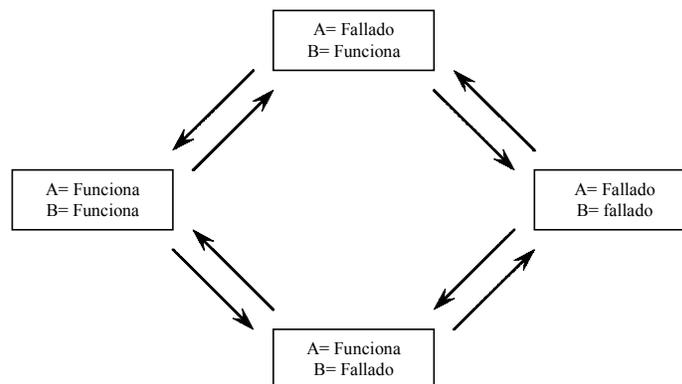


Figura 17: Diagrama de estados de un sistema de dos componentes independientes

### 1.6.1.2. Árbol de fallas

El árbol de fallas constituye una técnica de análisis basada en la lógica de dos estados o lógica binaria. El análisis se inicia con la ocurrencia hipotética de un suceso denominado evento iniciante y continúa con el estudio de sus posibles consecuencias determinadas por la acción exitosa o fallida de los sistemas de seguridad u otros. El evento inicial es una falla que inhabilita una o más funciones esenciales del sistema y requiere que actúe algún sistema de seguridad para controlarla. El árbol de fallas es un grafo dirigido, o sea, un conjunto de nodos unidos entre ellos por líneas que no contienen lazos cerrados; expresa, en forma gráfica, el evento de falla de un sistema en función de los eventos de falla de sus componentes y sus relaciones lógicas.

El nodo superior (a la derecha de la Figura 18) representa el evento de falla del sistema (o evento tope); su representación gráfica es un rectángulo. Los eventos de falla de los componentes se indican mediante los rectángulos a la izquierda de la Figura 18 y las relaciones de los componentes se indican mediante las compuertas lógicas; hay dos tipos de compuertas lógicas: las de tipo 'o', que asocian componentes en serie y las de tipo 'y', que asocian componentes en paralelo.

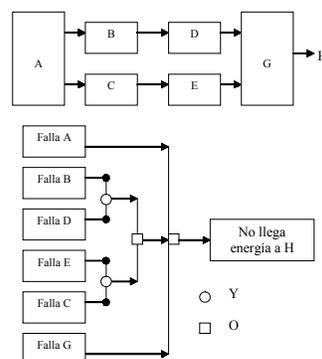


Figura 18: Árbol de fallas de un sistema de alimentación

### 1.6.1.3. Conjuntos de corte

Corresponden al conjunto de elementos que si fallan todos, se produce una falla total en el sistema. El método de los conjuntos de corte es muy utilizado para evaluar la confiabilidad de un sistema, por dos razones principales: puede ser programado en una computadora digital fácilmente, están directamente relacionados con las fallas del sistema y pueden identificar los caminos donde ocurren.

En términos de confiabilidad, un conjunto de corte corresponde a un arreglo de bloques (elementos del sistema bajo estudio), dispuestos de tal forma que la falla simultánea de todos éstos, causa una ruptura entre la entrada y la salida de la red de confiabilidad del sistema.

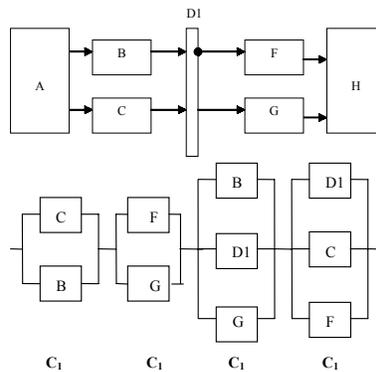


Figura 19: Conjunto mínimo de cortes para un sistema de dos alimentadores

En el grupo de corte, los elementos deben conectarse en paralelo, ya que la falla se produce cuando todos esos elementos salen de la red. Los cortes, a su vez, deben conectarse en serie, ya que la ocurrencia de cualquiera de ellos asegura la desconexión del sistema.

Por tanto, el paso inicial en el análisis de cualquier sistema es la determinación de los conjuntos de corte mínimo para el punto de carga en consideración, para luego analizar las contribuciones de cada corte mínimo a los índices de confiabilidad del punto de carga en cuestión, empleando para ello ecuaciones que dependen de la naturaleza del evento que produce la falla.

#### 1.6.1.4. Métodos de frecuencia y duración

En los estudios de confiabilidad resulta atractivo determinar los índices frecuencia y duración de interrupciones del servicio, en lugar de una probabilidad. Para ello se desarrollaron los métodos de frecuencia - duración y los métodos de redes, con estudios de los tipos de falla y análisis de sus efectos en el resto del sistema. Son métodos aproximados, ampliamente utilizados [40].

La valoración de los índices de confiabilidad puede ayudar a mejorar la confiabilidad de los sistemas puesto que se tienen parámetros que justifican la realización de acciones como: cambios de elementos viejos por nuevos, aumento de la capacidad de potencia, reforzamiento de elementos, entre otras.

#### 1.6.2. CONFIABILIDAD DE LAS SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

La operación de un sistema está encaminada a mantener parámetros de control, equipos, procesos, etc. en condiciones normales, produciendo en las personas encargadas de su operación, satisfacción cuando el sistema se encuentra en condiciones normales, y preocupación o incertidumbre cuando el sistema está en estado de falla o malfuncionamiento.

Para que el estado del sistema se conserve, se debe prestar atención en mantener lo que el activo hace, más que en lo que el activo es. La comprensión respecto de las funciones y de sus parámetros de funcionamiento se convierte en factor fundamental para lograrlo.

El cálculo de índices de confiabilidad es fundamental para la toma de decisiones acerca de la expansión, diseño y reemplazo de equipos. Sin embargo, estos estudios no indican o especifican las acciones o procedimientos a seguir para su reestablecimiento.

La confiabilidad en la operación de las subestaciones involucra la reducción del tiempo que los elementos estén fuera de servicio y la reducción de fallas. Esta reducción del tiempo y de las fallas está dada por la interacción y la sinergia de:

- Programas de mantenimiento adecuados.
- Estrategias a seguir en casos de indisponibilidad de los equipos.
- Capacitación del personal a cargo de la operación del sistema.
- Forma en que se opera el sistema.

#### **1.6.2.1. Mantenimiento**

El mantenimiento influye en la disponibilidad de los equipos y en su buen funcionamiento, pues puede prevenir fallas que afectarían el sistema. Sin embargo, se debe estar preparados para enfrentar las fallas en caso que ocurran y se deben optimizar los costos.

La eficiencia y la calidad del mantenimiento están íntimamente ligadas a la optimización de métodos y procesos, obteniéndose así una reducción de esfuerzos y costos que garantizan una adecuada disponibilidad de los equipos y sistemas. Esta eficiencia en el mantenimiento se debe apoyar en la utilización de los métodos estadísticos y en el cálculo de los índices que posibiliten la comprensión de los resultados, propiciando así soluciones de menor costo.

Una estrategia que tiene en cuenta la confiabilidad es el RCM (Reliability Centered Maintenance). El RCM constituye una estrategia de mantenimiento cuyo objetivo principal es preservar las funciones de un determinado sistema, y tiene como enfoque fundamental la preservación de los componentes. Los equipos no son importantes por sí solos, sino por la función que cumplen dentro del sistema. En este sentido se toman en cuenta las consecuencias de la falla de un equipo para el sistema [36].

#### **1.6.2.2. Estrategias de atención de fallas**

La eliminación completa de las fallas de los equipos es imposible. Por ello, es indispensable la previsión de los eventos de falla, y elaborar protocolos o procedimientos para atenderlos de forma que el sistema pueda funcionar de una manera segura.

En el caso de las subestaciones de transmisión se han elaborado e implementado los planes de contingencia que persiguen recuperar rápidamente el funcionamiento y la prestación del servicio.

Las fallas pueden originarse por deterioro de los equipos debidos al desgaste, por eventos aleatorios, por agentes externos al sistema o por la inadecuada operación de los equipos.

### **1.6.2.3. Habilidades y destrezas del personal de operación**

La forma en que se opera un equipo puede afectar su disponibilidad o la vulnerabilidad a las fallas. La calidad del personal de operación de los sistemas está estrechamente relacionada con la confiabilidad y disponibilidad del sistema.

Los operadores constantemente ejecutan acciones sobre el sistema, por ello es necesario que sepan la evolución del sistema ante la ejecución de acciones, y que tengan las destrezas y habilidades pertinentes para la operación y control del sistema.

Los operadores deben estar altamente capacitados en el uso de los sistemas de control, en los equipos de las subestaciones y en la forma de responder a eventualidades. Para asegurarse que los operadores son eficientes, es necesario contar con programas de capacitación y con herramientas adecuadas para este fin.

Por lo general y debido a los grandes costos no es posible tener equipos especiales para entrenar y capacitar a los operadores. Por tanto, el entrenamiento del personal se encuentra centrado en recibir instrucciones de funcionamiento y operación de subestaciones y en el acompañamiento de los operadores antiguos en la etapa de inducción, razones por las cuales este factor está propenso a aplicar mejoras que repercutan en la confiabilidad del sistema.

El entrenamiento del personal de operación potencializan el desarrollo de Sistemas de Entrenamiento y simulación, para la adquisición y la práctica de las habilidades y destrezas necesarias para el manejo de equipos y sistemas de las subestaciones, especialmente aquellos procesos que requieren mayor responsabilidad, donde cualquier error puede ocasionar entre otros: salida del sistema, daño de equipos, y originar pérdidas para las industrias en general.

Aunque en la mayoría de sistemas, los conocimientos operativos, están registrados en documentos. La experiencia necesaria requiere mayor cobertura y práctica en los conocimientos operativos tanto en condiciones normales como anormales.

### **1.6.2.4. Forma en que se opera el sistema**

La actual tecnología posibilita una gran variedad de formas de operación de las subestaciones. El sistema de control apoya las acciones de control del operador (como la

apertura o cierre de un interruptor) con características de seguridad como es la autorización y el procedimiento para seleccionar, verificar y ejecutar. Es posible que las fallas en los sistemas cambien estas características y los operadores remotos o locales no cuenten con las condiciones reales de los sistemas o con las ayudas que proporcionan.

De igual manera, la adición de equipos adicionales de comunicaciones para el control influye en la confiabilidad y efectividad de las operaciones. Si éstas se realizaran en los equipos directamente, se tendría más seguridad y confiabilidad. De igual manera la verificación de las condiciones se tendría que realizar mediante sensores en vez de realizarla directamente.

Por tanto en condiciones de falla la operación directa de los equipos es más confiable y segura que la operación remota, aunque la tendencia en las empresas del sector es el control remoto puesto que requiere menos personal.

## **2. OPERACIÓN DE SUBESTACIONES ELÉCTRICAS**

La operación del sistema eléctrico es una actividad que integra los agentes que intervienen en él, la generación, la transmisión, la distribución y la comercialización. Compromete desde una subestación de distribución hasta las grandes centrales generadoras.

En tiempo real, la administración de la operación del sistema eléctrico, es una tarea compleja que requiere la interacción de operadores, sistemas de cómputo, redes de comunicaciones y equipos para la captación de datos en tiempo real en plantas eléctricas y en subestaciones. Hay varios aspectos que se deben tener en cuenta en la operación de los sistemas, el primero y más importante es la seguridad del personal que lo opera; esto requiere que se tomen medidas al conmutar la red de acuerdo con procedimientos de seguridad, de modo que las vidas del personal de servicio de las subestaciones intervenidas no se ponga en riesgo. En segundo lugar, interesa la seguridad o confiabilidad del abastecimiento de energía eléctrica a los usuarios; en la actualidad la energía eléctrica se ha convertido en una necesidad; por tanto su abastecimiento es en extremo importante y cualquier interrupción a un gran número de usuarios se considera una urgencia. Finalmente la operación del sistema tiene que ser tan económica como sea posible; dentro de los límites de seguridad y protección [28].

La operación de una subestación es la actividad encaminada a operar, controlar, supervisar y mantener los equipos de la subestación para garantizar su óptimo funcionamiento, su disposición frente al sistema para permitir las modificaciones y la continuidad del servicio.

El control de la subestación lo realizan los asistentes de subestaciones desde la sala de control a través de los mímicos o de las interfases de control, siguiendo consignas preestablecidas. El registro de eventos (alarmas, operación de equipos y relés de protección, registros de energía, etc.) es llevado manualmente por los operadores, o mediante los sistemas de registro de eventos en las subestaciones. En el caso de daños en el sistema de control, se pueden operar los equipos desde su propio gabinete de control en el patio (nivel 0). Las señales provenientes del patio, agrupadas en las cajas adyacentes al equipo o en los kioscos de cada campo de la subestación, son llevados al edificio de control por los cárcamos a una sala de cables localizada debajo de las salas de control y protección, de donde se distribuyen a los diferentes tableros y gabinetes.

Las acciones de operación normal como procedimientos de energización de bahías de línea o transferencias, se encuentran registradas en unos documentos denominados consignas operativas. Estos documentos contienen los pasos necesarios para realizar maniobras sobre los equipos de patio de la subestación.

La operación del sistema interconectado nacional está dada en varios niveles:

- Nivel de sistema, dado por el nivel más alto corresponde al Centro Nacional de Operación (C.N.O.).
- Nivel de generación, dado por los operadores de las subestaciones generadoras.
- Nivel de transmisión, dado por el Centro de Supervisión y Maniobras (CSM) y los operadores de las subestaciones transmisión.
- Nivel de distribución, dado por las empresas de distribución (transmisión regional y distribución local).

En este capítulo se hace referencia a la operación de subestaciones de transmisión. En estado normal, el encargado de realizar la operación debe tomar datos y ejecutar maniobras según las consignas<sup>8</sup> estipuladas y autorizadas, e inspeccionar equipos de patio, sala de control, servicios auxiliares, baterías, planta diesel, y planta de tratamiento de agua. Así, la función de un operador está muy bien definida y es en conclusión: "Operar, controlar, supervisar y mantener los equipos de la subestación para garantizar su óptimo funcionamiento y la continuidad del servicio" [38].

El principio fundamental de la operación de una subestación es garantizar la seguridad del sistema del que hace parte, teniendo en cuenta la integridad y seguridad del personal que se encarga de su realización, y protegiendo la invulnerabilidad de los sistemas y equipos que la componen. Para esto, los sistemas de control tienen dentro de sus esquemas las facultades necesarias para garantizar la secuencia correcta de operaciones<sup>9</sup>. La operación de los equipos de patio, requiere mayor precaución debido a la importancia y repercusión que tienen en el sistema interconectado.

Las operaciones que se realizan en los equipos de patio y en algunos sistemas como los de soporte se pueden ejecutar:

- Localmente, en el propio equipo en el patio exterior. Este mando se realiza a través de pulsadores ubicados en los armarios de los equipos exteriores (nivel 0).
- A distancia desde la caseta de relés. A través de un conmutador de accionamiento en el tablero mímico en el armario ubicado en la caseta de relés (nivel 1).
- A distancia desde la sala de mando o concentrador de la subestación, en este nivel se pueden realizar maniobras sobre cualquier campo de la subestación y se tiene un

---

<sup>8</sup> Una consigna es un documento que contiene la descripción de las acciones que el operador debe realizar.

<sup>9</sup> Estas no se tienen en cuenta, únicamente, cuando la subestación es operada en estado de emergencia.

control de todos los equipos y sistemas de la subestación (nivel 2). En las subestaciones de control convencional, este control no se puede efectuar por no existir equipos que concentren toda la información de la subestación.

- En forma remota (telecontrol), desde los centros regionales de despacho CRD's. Su función es la de coordinar la operación y maniobras con sujeción, a las instrucciones impartidas por el CND, en desarrollo de las previsiones contenidas en el reglamento de operación (nivel 3). El control se realiza a través de un enlace de comunicaciones. Este centro a su vez, se encarga de centralizar todo el sistema de potencia de una compañía eléctrica en particular.

## **2.1 MANUAL DE OPERACIÓN**

Las subestaciones tienen un manual de operación en donde se describen los equipos, los sistemas, las operaciones en condiciones normales y las operaciones en condición de falla en los equipos. En él se describen las principales características de los sistemas y de los equipos que hacen parte de la subestación, contiene todas las consignas operativas para maniobras de equipos, y las medidas y acciones que se deben tomar en caso de falla de los mismos. Debe dar una guía exacta de cómo ejecutar las maniobras oportuna y correctamente. Debe indicar que hacer en caso de presentarse alarmas y disparos de los equipos durante la operación normal [27].

Dentro del manual de operación se deben encontrar los siguientes tópicos:

- Las generalidades con la descripción de la subestación en términos de configuración, Control, Protecciones, Medidas, Servicios Auxiliares, Registro de Fallas, Telecomunicaciones, Localización Geográfica, Parámetros del Sistema y Diagramas Unifilares.
- Las secuencias de maniobras de equipos para cada acción operativa con las secuencias de acciones para realizar maniobras correctas sobre equipos y la operación correcta de los diferentes sistemas desde los diferentes niveles de control, de acuerdo con el diseño y configuración de la subestación.
- Las acciones de restablecimiento de las condiciones normales de los sistemas y equipos con la descripción de las maniobras y acciones a realizar en caso de presentarse alguna falla o anomalía en la subestación o en el sistema o cualquier causa de mal funcionamiento de los equipos y sistemas.

### **2.1.1. CONSIGNA OPERATIVA**

Las labores de operación de las subestaciones de transmisión son realizadas con la mayor precaución, encargando al sistema de supervisar las secuencias correctas mediante enclavamientos. Estos solo se pueden desactivar en condiciones de emergencia (en las casetas de relés se encuentran los interruptores para desactivar los enclavamientos de los equipos primarios de patio).

Para realizar una operación en los campos, es necesaria la ejecución de una secuencia de acciones de control sobre los equipos primarios de potencia en un orden establecido. Este orden depende tanto de la operación que se requiere hacer como de la configuración de la subestación, cuya configuración repercute en el orden en que se realiza la operación y en las operaciones que se pueden realizar.

De la configuración depende la confiabilidad, la seguridad, la flexibilidad de manejo, la transformación y la distribución de energía que proporciona la subestación y a su vez repercute en el nivel de maniobrabilidad. Por ejemplo, una configuración de doble barra con transferencia proporciona más alternativas operativas que una configuración de barra sencilla.

Dentro de las principales características de la configuración se encuentran: separación de circuitos sin afectar el servicio, separación de interruptores, separación de seccionadores, separación de barras, división de sistemas, transformación a configuraciones más sencillas, y alternativas de conexión y desconexión.

La información y la secuencia de acciones de operación en los equipos primarios de potencia para la realización de una determinada operación se encuentran en la consigna operativa respectiva. En ella se encuentran las condiciones para la realización de la operación, las secuencias de acciones a realizar y el estado final de la subestación. Asimismo, si alguna de estas secuencias no se pudiese realizar, relaciona el documento que se debe consultar para la solución del percance.

Las operaciones más comunes en una subestación son:

- En los equipos primarios de alta tensión:
  - Energización y desenergización de circuitos
  - Energización y desenergización de barras
  - Energización y desenergización de transformadores.
  - Energización y desenergización de equipos de compensación.
  - Cambio de tomas en los transformadores.
  - Puesta a tierra de transformadores, líneas y barras.
  - Puesta a tierra de equipos de patio para mantenimiento.
  - **Suspensión** de la puesta a tierra en equipos.
  - Transferencias.
  - Deshacer las transferencias.
  - Sincronizar.
  
- En los equipos de soporte:

- Mantenimientos en las plantas de generación (plantas de emergencia).
- Encendido y apagado de las plantas de emergencia.
- Mantenimientos preventivos a los bancos de baterías.
- Operaciones en los sistemas primarios de distribución de los servicios auxiliares.
- Energización y desenergización de cargadores de baterías.

Como se dijo anteriormente, la consigna operativa contiene las acciones a seguir para la realización de una operación determinada. Estas consignas se han clasificado, teniendo en cuenta los sistemas a los que hace referencia, en consignas operativas para equipos de patio y consignas operativas para equipos de servicios auxiliares.

Cada una de las operaciones anteriores y cada uno de los sistemas (simétricos) tiene su consigna respectiva. Asimismo, los equipos de control, protección, registradores de fallas y medida tienen manuales de operación que indican los aspectos a tener en cuenta para su funcionamiento y operación.

#### **2.1.1.1. Consignas operativas para equipos de patio**

Esta clasificación de consignas hace referencia a las operaciones que se deben hacer en los equipos de patio. Debe existir una consigna operativa por cada operación posible; si alguna maniobra estipulada en la consigna no se puede realizar, debe remitir a la correspondiente consigna bajo falla.

Como ejemplo, y para clarificar mejor la relación de las consignas operativas en condiciones normales y las consignas operativas bajo falla y, además, la relación entre configuración y operación, se analiza una consigna para la configuración que se presenta en la Figura 20 correspondiente a parte de una subestación de doble barra con transferencia. Esta consigna operativa corresponde a una acción sobre los equipos primarios de alta tensión.

La realización de la maniobra operativa permite la energización de un circuito. Para la realización de esta maniobra se debe verificar que al menos una barra este energizada. En este caso, se supone que la barra uno esta energizada y el circuito de línea que se va a energizar se conecta a esta, por tanto se deben maniobrar los seccionadores L159, L157 y L151, y el interruptor L150. Adicionalmente se debe verificar el estado de los seccionadores L152, L156 y L159.

La consigna operativa tiene una estructura básica donde se presentan todas las actividades a desarrollar durante la maniobra. En el flujograma presentado en la Figura 21 se hace referencia a las consignas bajo falla que se deben aplicar en caso de una contingencia no destructiva de los equipos utilizados en la maniobra operativa [12], y se describe a continuación.

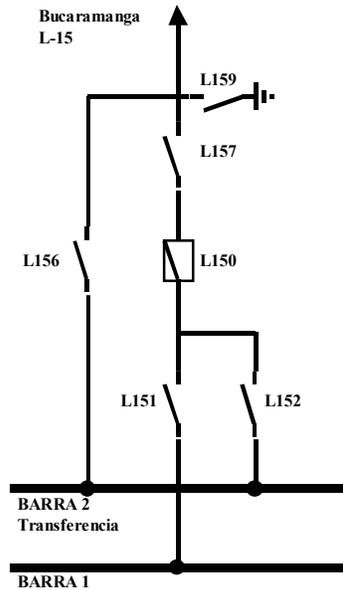


Figura 20: Diagrama unifilar del un campo de una subestación

1. Verificación de condiciones iniciales: Según el diagrama de flujo de la Figura 21 lo primero que se tiene que realizar es la verificación de las condiciones iniciales requeridas para realizar la maniobra de energización del circuito de línea. La verificación de estas condiciones contempla la confirmación del estado abierto del interruptor L150 y los seccionadores de barra L151 y L152, el seccionador de transferencia L156, el seccionador de línea L157 y el seccionador de puesta a tierra L159, y que el campo esté libre de tierras portátiles [27].
2. Cierre de seccionadores: Para realizar esta labor se debe informar al Centro Nacional de Despacho (CND) sobre la operación. Éste autorizará preparar el campo de línea, para ser conectado a la barra 1, cerrando inicialmente el seccionador L151 y posteriormente el L157. Se debe verificar visualmente en el patio la posición final de los seccionadores operados (Cierre correcto) e informar a CND que el campo de línea Bucaramanga (=L1-5) está preparado.
3. Cierre de interruptor: Luego que se verifica el cierre de los seccionadores, el CND autorizará el cierre del Interruptor L150.
4. Finalización de la maniobra: Para el cierre de la maniobra se debe informar al CND que el campo de la línea Bucaramanga =L1-5 quedó energizado a la Barra 1 y registrar en bitácora los datos de la maniobra y la hora en que ésta se ejecutó.

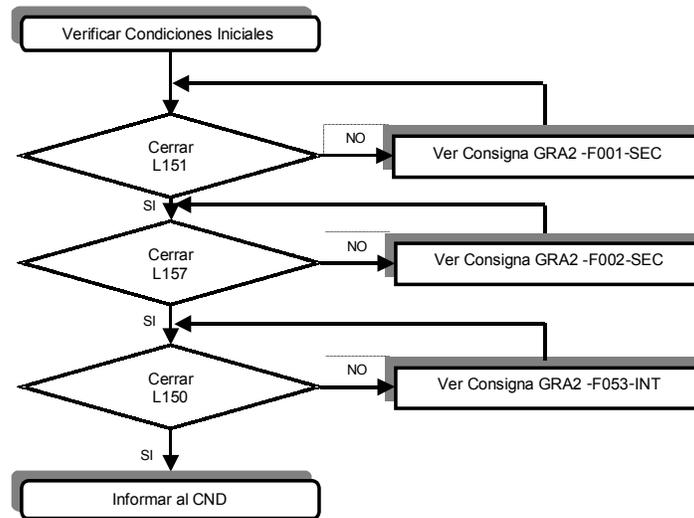


Figura 21: Diagrama de flujo para la energización de un campo de la S/E Guatiguará.

### 2.1.1.2. Consignas operativas para equipos de soporte

Estas consignas hacen referencia a las operaciones que se deben hacer en los equipos de servicios auxiliares. Son las más numerosas puesto que estos equipos presentan mayor flexibilidad y el operador de la subestación no está tan restringido para realizar intervención de estos equipos en comparación con los equipos primarios de alta tensión.

Se presenta una consigna operativa del sistema de soporte. La operación se realiza en los sistemas primarios de distribución de los servicios auxiliares. En la Figura 22 se muestra el diagrama unifilar de los equipos involucrados para realizar esta operación.

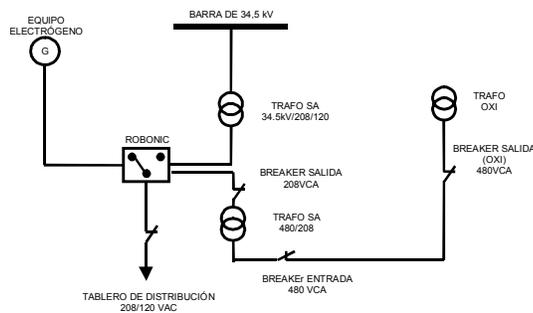


Figura 22: Diagrama unifilar del sistema de servicios auxiliares a operar

La consigna operativa a realizar corresponde a la maniobra de cambio de alimentación principal (acometida) de los servicios auxiliares. Se deben maniobrar los interruptores ("breaker") de 480 Vca para pasar de la alimentación de los sistemas de servicios auxiliares desde el transformador OXY al transformador SA (ver Figura 22).

El estado de los equipos antes de la realización de la operación es: Trafo de S.A. 34,5 kV /208/120V desenergizado, “Breaker” de salida a 480 VAC en Oxy cerrado (on), “Breaker” de alimentación a 480 VAC desde Oxy hacia Trafo de S.A. 480/208 VAC cerrado (on), “Breaker” de salida a 208 VAC desde Trafo de S.A. 480/208 hacia Robonic cerrado (on), S.A. alimentados desde Oxy.

Para el cambio de la alimentación se deben realizar las siguientes operaciones:

1. Coordinar con el operador de Oxy la maniobra a realizar.
2. Abrir el “Breaker” de salida a 208 VAC desde Trafo de S.A. 480/208 hacia Robonic. El Equipo Electrónico entra en funcionamiento y toma la carga de los S.A.
3. Reiniciar la alarma # 19 en el anunciador.
4. Abrir el “Breaker” de alimentación a 480 VAC desde Oxy hacia Trafo de S.A. 480/208 VAC.
5. Abrir el “Breaker” de salida a 480 VAC en Oxy.
6. Confirmar la ausencia de tensión y confirmar al operador de Oxy.
7. Retirar del Robonic, los conductores que llegan del Trafo de S.A. 480/208 V.
8. Conectar al Robonic los conductores que llegan del Trafo de S.A. 34,5 kV / 208/120V.
9. Energizar el Trafo de S.A. 34,5 kV /208/120V. Automáticamente el Robonic hace la transferencia de carga del Equipo Electrónico al Trafo de S.A. 34,5 kV /208/120 V.
10. “Resetear” la alarma # 19 en el anunciador. El Equipo Electrónico se apagará después de transcurridos algunos segundos.
11. Informar al CTE Oriente sobre las maniobras realizadas.
12. Registrar en la bitácora.

## **2.2 FALLAS EN LAS SUBESTACIONES DE TRANSMISIÓN**

Los sistemas y equipos de las subestaciones están diseñados para ofrecer un funcionamiento confiable y continuo. No obstante, una falla puede ocurrir en cualquier instante y en cualquier punto, y provocar averías en el funcionamiento normal de toda la subestación o de uno de sus sistemas o equipos.

Las empresas que operan las subestaciones deben tener todos los controles, las funciones y los dispositivos para evitar estas fallas, pero en caso de que ocurra, debe contar con procedimientos que permitan restaurar los equipos y los sistemas en el menor tiempo posible y con las mínimas consecuencias. En el caso de las subestaciones, aunque las fallas en equipos no son tan frecuentes, deben contar con procedimientos de atención de fallas, en los cuales están las estrategias, procedimientos e información para reanudar la operación del sistema o del equipo que ha fallado.

El comportamiento y funcionamiento de los equipos, los sistemas y los operadores ante fallas no se encuentran definidos en su totalidad ya que los escenarios de falla son numerosos por la cantidad de posibilidades de falla que tienen las subestaciones; recrear las características, condiciones, consecuencias y acciones para todos estos escenarios es una labor excesiva.

Para posibilitar el estudio y documentación de los escenarios de falla, es necesario iniciar con el estudio de características de operación y funcionamiento, la descripción de equipos, y con la jerarquización y restricción de las posibles fallas, dependiendo de su severidad para el funcionamiento del sistema. Después, se estudia el comportamiento de los equipos y sistemas en condiciones anormales y el funcionamiento del sistema ante la falla de alguno de sus componentes (efecto de fallas individuales en el comportamiento del sistema).

Para estos escenarios de falla se deben establecer los requerimientos y el nivel de especialización exigido por las circunstancias de sistema en falla con el ánimo de seleccionar las mejores acciones que permitan la continuidad del servicio, la integridad de los equipos y sistemas y la seguridad del personal que las efectúa. Estas acciones deben evitar suposiciones que, en un momento de emergencia, vuelvan inoperante el sistema o incrementen su severidad. Las diferencias sustanciales de las tecnologías, equipos y sistema establecidas en las subestaciones hacen necesario que se analice cada caso y se estudie por separado.

Las fallas se clasifican en destructiva y no destructiva dependiendo de su severidad sobre la subestación. Las fallas destructivas implican pérdida total del equipo afectado y en consecuencia la restitución del mismo. Estas fallas ocasionan la disminución en la confiabilidad, flexibilidad y seguridad del sistema de potencia. Las fallas no destructivas son aquellas en las cuales el asistente de la subestación y los grupos de mantenimiento pueden realizar labores de reparación sobre el equipo afectado, para ponerlo nuevamente en funcionamiento. Estas fallas implican una disminución de la capacidad operativa y de control de los equipos y sistemas de las subestaciones, y pueden ocasionar indisponibilidades de los activos de la empresa.

En el caso de fallas destructivas de los equipos, se requieren acciones que involucran toda la organización y el sistema. Para estos casos, se ha desarrollado una serie de estrategias para la atención de transformadores, interruptores y seccionadores, elementos que son prioritarios para la seguridad, confiabilidad y continuidad en la prestación del servicio. Estas estrategias son los planes de contingencias asociados a estos equipos que se describen metodológicamente en [12] y se desarrollan claramente para cada equipo en **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Para las fallas no destructivas, es prioritaria la elaboración y aplicación de procedimientos encaminados a restablecer la disponibilidad del equipo o del sistema, culminar maniobras de los equipos primarios de potencia, localizar el punto de falla o realizar un diagnóstico que facilite la labor del personal calificado, aprovechando los recursos existentes en la subestación tal como se presenta metodológicamente en [12] y se implementa para cada subestación en [6], [8], [9], [19], [25], [30] y [32].

## 2.2.1. METODOLOGÍA

El marco metodológico bajo el cual se elaboran las estrategias de atención de fallas para las subestaciones, ha sido adaptado del método científico. Consiste en un estudio sistemático de la naturaleza del problema, en la recopilación y análisis de información, en la definición de subproblemas, en el establecimiento de reglas para el razonamiento y en la posterior formulación de ideas sobre la solución de los problemas e interpretación de los resultados experimentales y teóricos [35].

El planteamiento metodológico básico utilizado para el desarrollo de las estrategias de atención de las fallas en las subestaciones de transmisión, contiene tres fases básicas *análisis*, *elaboración* y *validación*, tal como se presenta en la Figura 23.

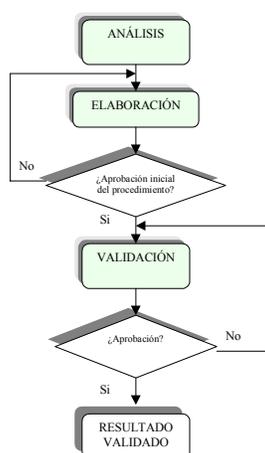


Figura 23: Metodología básica de elaboración de las estrategias de atención de fallas

### 2.2.1.1. Análisis

En esta etapa, se propone un estudio sistemático de la naturaleza del problema incluyendo recopilación y análisis de la información, selección de datos estadísticos de fallas y recopilación de las experiencias del personal en condiciones de falla.

#### Recopilación y Análisis de Información

Consiste en el estudio inicial de aspectos conceptuales relacionados con los planes de contingencia para instalaciones eléctricas, el estudio de la reglamentación relacionada con el problema, y la recopilación y análisis de la información sobre los tipos de subestaciones y equipos existentes en las subestaciones.

## **Determinación de equipos y sistemas críticos**

Mediante el análisis de confiabilidad de los equipos [23] y su impacto en la disponibilidad en la operación de las subestaciones, se determinó la prioridad de elaborar las estrategias de fallas para los siguientes equipos:

- Transformadores.
- Interruptores y seccionadores.
- Circuito de control de seccionadores e interruptores.
- Sistema de servicios auxiliares.
- Alarmas.
- Equipos de control.
- Equipos de protecciones.
- Sistema de comunicaciones.
- Salas de control.
- Sistema de medida.
- Sistema de registro.

## **Elaboración de planteamiento o escenarios de fallas**

Tomando como base el funcionamiento de los equipos, las estadísticas de falla y la experiencia del personal, se definen las fallas más comunes y/o críticas para las cuales hay que elaborar los procedimientos de restablecimiento.

## **Elaboración**

En esta etapa surge el planteamiento preciso de propuestas particulares para el plan de restablecimiento de cada equipo. Para su elaboración se siguen las actividades planteadas en la Figura 24.

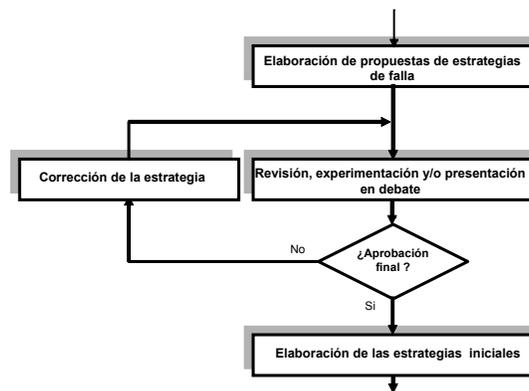


Figura 24: Metodología de elaboración de las estrategias de falla

### 2.2.1.2. Elaboración de propuestas de estrategias de atención de fallas

Definidas los equipos críticos y las fallas más comunes y/o críticas, se desarrollan los procedimientos que establecen la relación entre las posibles causas y las soluciones en forma de tabla, y las secuencias de acciones para tener en cuenta las prioridades operacionales y técnicas. Para el desarrollo de estos procedimientos se utilizaron los recursos disponibles como los planos de la subestación, los manuales de los equipos y la experiencia del personal. Las soluciones contienen la descripción de las maniobras y acciones a realizar en caso de presentarse alguna falla destructiva y no destructiva que puede ser evidenciada por la activación de una alarma, o la inadecuada operación de los equipos de protecciones, de control, de comunicaciones, de medida, de registro de fallas, de servicios auxiliares, de maniobras (falla en el cierre y/o apertura de seccionadores e interruptores) o por la pérdida de funcionalidad de un equipo o sistema.

#### Revisión y/o presentación a debate

Consiste en la reproducción y/o presentación a debate de la circunstancia de la falla y la respectiva estrategia de falla, bajo las condiciones particulares de ocurrencia. En esta fase, es de vital importancia la crítica constructiva del personal de operación, grupos de mantenimiento y profesionales de ISA.

Realizada la revisión, se procede a realizar las correcciones respectivas en la consigna para luego obtener su aprobación final.

#### Elaboración de las Consignas bajo falla definitivas para la validación

Una hipótesis confirmada permite establecer la veracidad de los procedimientos expuestos, estableciéndose una relación de alto nivel de exactitud entre las variables

involucradas para establecer principios generales, sobre los cuales se fundamenta el desarrollo de las estrategias de falla.

A partir de la propuesta de estrategia, de las correcciones surgidas del debate, y del análisis y seguimiento de planos, etc. se estructuran los documentos que se someten a la validación.

### **2.2.1.3. Validación**

El proceso de validación busca revisar, actualizar, mejorar y adecuar las estrategias de atención de fallas a las condiciones específicas de las subestaciones y a los cambios introducidos en los planos de las subestaciones. Asimismo, el proceso de validación es importante para detectar y corregir errores cometidos en la etapa de elaboración. Este proceso permite además, capacitar al personal en el manejo y aplicación de los procedimientos de atención ante fallas no destructivas en subestaciones (consignas bajo falla).

Uno de los objetivos de este trabajo es la realización y establecimiento del proceso de validación para los procedimientos de falla. Este proceso se describirá en el siguiente capítulo.

## **2.2.2. FALLAS NO DESTRUCTIVAS DE SUBESTACIONES DE TRANSMISIÓN**

En las subestaciones, las situaciones de emergencia o falla ocasionadas por mal funcionamiento de los equipos pueden ser originados por deterioro de los equipos, por sobrecargas, por descargas atmosféricas, por mal manejo, por ataques deliberados, por sabotajes o bien por situaciones propias del funcionamiento de los equipos y sistemas de la subestación.

Las fallas no destructivas en las subestaciones eléctricas ocasionan la disminución de la capacidad operativa, la pérdida de control o la pérdida de supervisión de las subestaciones. Estas fallas son menos severas que las fallas destructivas, sin embargo, también pueden ocasionar indisponibilidad de equipos operativos del sistema de transmisión nacional.

Todos los sistemas de las subestaciones son importantes para su funcionamiento correcto, por tanto requieren la elaboración de estrategias que permitan responder a fallas. Estas estrategias no solo deben tener en cuenta los sistemas y equipos sino que deben considerar todo la empresa y el sistema interconectado.

Dadas las características de las subestaciones eléctricas los procedimientos de fallas para los equipos, difícilmente se puede usar en los equipos de otras subestaciones. La elaboración de las estrategias debe hacerse bajo pautas establecidas y particularizadas,

de acuerdo con el tipo de subestación y las consideraciones de fallas. La estructura de los procedimientos debe ser de fácil manejo y permitir su actualización.

Estas estrategias deben partir de las siguientes consideraciones:

- La forma como se evidencia una falla en el sistema o equipo.
- Las pruebas que se deben hacer para determinar si un equipo está en falla.
- La función del sistema o equipo fallado.
- Las causas que originaron la falla.
- La forma como se afecta el sistema ante la falla.
- La forma para localizar la causa de la falla.
- La causa que originó la falla.
- La posibilidad de reestablecer el funcionamiento de los sistemas o equipos.

Elaboradas las estrategias, se realizan los documentos que los contienen, los cuales reciben el nombre de consignas bajo falla.

#### **2.2.2.1. Consignas bajo falla**

Las consignas bajo falla contienen la descripción de las maniobras y acciones a realizar en caso de presentarse alguna falla no destructiva en la subestación o en el sistema de potencia. La falla es evidenciada por la activación de una alarma, un disparo o la inadecuada operación de los equipos de maniobra y control (Falla en el cierre y/o apertura de seccionadores e interruptores), y/o protección de la subestación. Las consignas bajo falla deben contener una relación de situaciones de falla con sus posibles causas y soluciones en forma de tabla, además de una revisión del circuito de control básico [35].

El objeto de las consignas bajo falla consiste en que ésta sirve como herramienta básica al operador de la subestación para:

- Determinar la causa de una situación de contingencia.
- Restaurar las condiciones normales de operación.
- Elaborar un reporte que permita a los grupos de mantenimiento del CTE Oriente localizar la falla. Para ello se requiere el desplazamiento del personal técnico a la subestación bajo contingencia.

El formato para la presentación de las consignas bajo falla para equipos de la subestación se presenta en la Figura 25.

	Título	Código de la consigna bajo falla
		Revisión
Página (hoja de )		
Large empty box for the main content of the sign		
Elaboró:	Revisó:	Aprobó:
Fecha:	Fecha:	Fecha:

Figura 25: Formato de presentación de las consignas bajo falla.

Una consigna bajo falla contiene tres aspectos básicos:

- Descripción de la anomalía: Este aspecto contiene una breve descripción de la falla (Alarma, Disparo, Maniobra).
- Posible Causa: En este aspecto se señalan las causas posibles de la aparición de la alarma o disparo.
- Posible Solución: Este aspecto establece el procedimiento general de solución del problema y va desde la aceptación o reconocimiento de las alarmas; hasta la ejecución de acciones que conduzcan a determinar la permanencia en servicio del equipo fallado. Cada solución está asociada con la posible causa.

Como principio básico, las consignas bajo falla deben mejorar la continuidad del suministro y por tanto, disminuir el impacto de las contingencias de equipos de subestación en los índices de disponibilidad de los activos.

Su elaboración permite que el operador tenga un papel activo en condiciones de emergencia, ya que le permite realizar las acciones previstas en las consignas en forma más participativa.

El alcance de la consigna bajo falla está limitado a las acciones que se le permiten al operador, de tal forma que no se comprometa la integridad y estabilidad de los sistemas y equipos de la subestación ni del sistema de transmisión. La consigna ofrece una guía para que el operador verifique condiciones básicas como: enclavamientos mecánicos y eléctricos, posición de selectores y conmutadores de mando, alimentación de equipos de maniobra, control y protección, etc. Adicionalmente, cada consigna contiene un procedimiento para la revisión en planos, del circuito de control básico de cierre/apertura, de equipos tales como seccionadores e interruptores y esquemas funcionales de algunos sistemas (medida, registro de fallas, comunicaciones).

Dentro del contenido de una consigna bajo falla se destacan tres aspectos básicos: la descripción de la anomalía, la descripción de la posible causa, y el procedimiento de la

posible solución. La descripción de la anomalía contiene una breve descripción de la falla (alarma, disparo, maniobra). La sección de posible causa señala las causas de la aparición de la alarma o disparo. Y en la sección de posible solución se establece el procedimiento general de solución del problema y va desde la aceptación o reconocimiento de las alarmas; hasta la ejecución de acciones que conduzcan a determinar la permanencia en servicio del equipo fallado.

Las consignas bajo falla elaboradas en su primera etapa son de cuatro tipos: consignas bajo falla que aparecen cuando se realiza una consigna operativa, consignas bajo falla asociadas a la aparición de alarmas, consignas bajo falla del sistema de servicios auxiliares y consignas bajo falla para equipo de control y protección.

#### **2.2.2.2. Consignas bajo falla asociadas a consignas operativas**

En caso no poder realizar una operación de control de un equipo, existen procedimientos a seguir para la continuación de una operación, estos procedimientos son las consignas bajo falla asociadas a interruptores y seccionadores que están diseñadas para atender fallas no destructivas en los equipos de maniobra (seccionadores/interruptores) y sus sistemas de control y protección. Las fallas se evidencian por la ausencia de respuesta a las órdenes de cierre o apertura de los equipos durante la realización de una maniobra operativa en la subestación. La activación de alguna de las alarmas de los sistemas de supervisión de los equipos se clasifica en las consignas de alarmas [9].

La estructura propuesta para la realización de los procedimientos y actividades dentro de estas consignas, tiene un orden de prioridad de acciones y una secuencia así: Revisión de condiciones iniciales, cambio de nivel de operación, cambio de consigna operativa (en los casos que sea posible), revisión posterior a la culminación de la consigna operativa y revisión en planos del circuito de control básico. El procedimiento seguido está asociado a la maniobra operativa realizada y su algoritmo se presenta en la Figura 26.

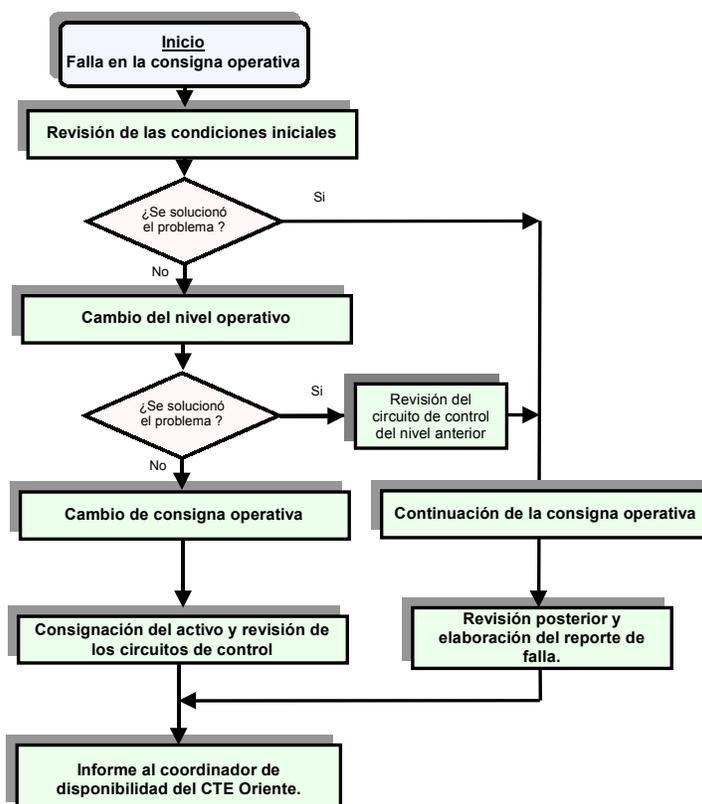


Figura 26: Procedimiento de las consignas de falla asociadas a consignas operativas

Para la comprensión de las consignas bajo falla desarrolladas para los interruptores y seccionadores, fuera del procedimiento seguido durante su realización o ejecución (Figura 26), es necesario realizar un análisis de las causas que generan la falta de operación de los equipos de patio, y estudiar los equipos y su sistema de control.

En primer lugar, se debe identificar o conocer el diagrama funcional del sistema, tanto del equipo en sí (interruptor y seccionador) como del esquema de control y de la relación con los demás sistemas (configuración, protección, servicios auxiliares, etc.). Se debe realizar por el momento, la abstracción de toda la complejidad circuital del sistema, orientándose a identificar las partes funcionales principales para el sistema y su interpretación.

Como se dijo anteriormente, la función de los interruptores y seccionadores es la de seccionamiento y corte de equipos en la subestación, y de líneas y fallas del sistema. En la Figura 27 se muestra el diagrama funcional de los interruptores y seccionadores y la relación con los sistemas de la subestaciones, control, protección, alarmas, etc.

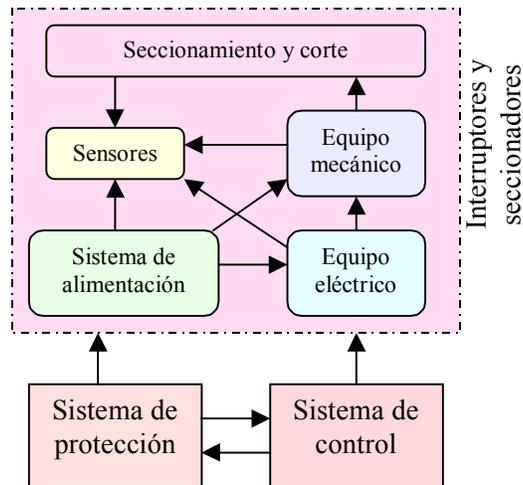


Figura 27: Esquema funcional de un interruptor u el sistema de control

Los interruptores de las subestaciones son de hexafluoruro de azufre (SF6) y el sistema de accionamiento de la apertura y cierre puede ser mecánico (resortes) o neumático. En el mecánico el resorte es cargado a través de un motor (en la mayoría de casos es de corriente continua 125 Vcc proporcionado por el sistema de servicios auxiliares) o manualmente con una manivela. Permiten realizar maniobras monopolares es decir abrir o cerrar un solo polo. Actualmente esta acción es permitida sólo por las protecciones principales, la apertura y el cierre son producidos por la energización de una bobina que controla una pestaña que activa los resortes, y estos a los mecanismos de cierre y apertura. Poseen dos bobinas para la apertura y una para el cierre, sensores de: presión del gas de la cámara de extinción, discrepancia de polos o fases para evitar desbalances del sistema, de la alimentación del motor de carga del resorte, de posición, y de supervisión de los circuitos de disparo. El control de las bobinas de cierre y apertura se puede realizar a través del sistema de control o el sistema de protecciones.

En la Figura 28 se puede observar el circuito de control de un interruptor de SF6 de tensión nominal 230 kV (Aparecen los tres polos con los dos circuitos de disparo y el circuito de cierre).

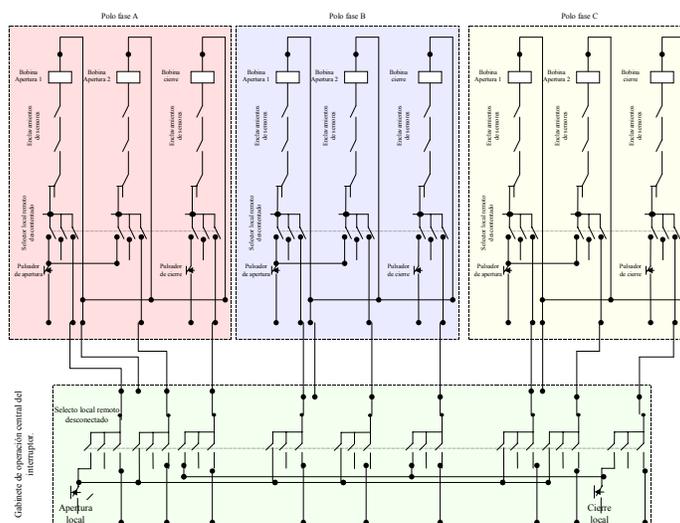


Figura 28: Circuitos de control de un interruptor SF6

Los seccionadores desempeñan diversas funciones como las de seccionamiento de circuitos por necesidades de operación, seccionamiento por necesidades de aislar componentes del sistema para realizar su mantenimiento, y de confirmación visual de desenergización de equipos del sistema. La mayor complejidad se encuentra en su sistema de accionamiento mecánico. La apertura o cierre se puede hacer automáticamente a través de un motor (125Vcc) o manualmente a través de una manivela. No permite operaciones unipolares, posee sensores de posición y de alimentación del motor y su control lo realiza el sistema de control o el operador de la subestación.

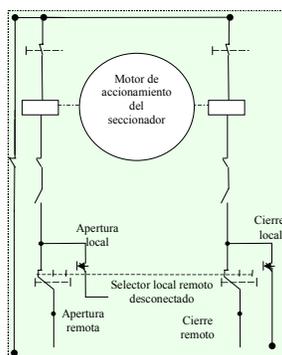


Figura 29: Circuito típico de control de un seccionador.

En la Figura 29 se puede observar el circuito de control de un seccionador (de los que se tienen en las subestaciones del CTE Oriente). Aparecen los circuitos de apertura y cierre. Como se dijo anteriormente, el control se puede realizar manualmente, sin la necesidad de utilizar el motor a través de una manivela. Para ello se desactiva un enclavamiento mecánico y se introduce la manivela.

En segundo lugar, se deben identificar o conocer las causas genéricas de las fallas en la operación de los equipos. Se debe orientar la función que deja de realizarse, el bloque funcional con problemas, la forma y la razón de la repercusión en la falla. Las causas por las cuales los Seccionadores o los interruptores no cierran o no abren, de manera general, pueden ser:

- Las condiciones de operación no se cumplen: los enclavamientos necesarios para la operación no se están cumpliendo y causa que no se pueda accionar el equipo. Estos enclavamientos se resumen en el esquema de control de cada equipo y dependen de la posición que ocupe el equipo en la configuración de la subestación y de la función que desempeña. Cabe anotar que en la apertura de un interruptor, no existe ninguna condición que se deba cumplir.
- Se encuentra activada alguna alarma que produce que el seccionador o interruptor no funcione. Estas alarmas pueden ser originadas por: fallos en los sistemas para los cuales se han colocado los sensores, por fallas en los sensores, o por falla en los circuitos de protecciones de los sistemas complementarios de los equipos. Cuando la falla es ocasionada por estas circunstancias se reduce el grado de incertidumbre alrededor de su origen y posibilita una respuesta más rápida.
- El sistema de control se encuentra funcionando irregularmente es decir que el nivel de control desde el que se opera los equipos no tiene ningún efecto sobre el equipo, esto se puede dar por:
  - Los niveles de control inferior estén deshabilitando el control remoto.
  - Que haya fallas de comunicación entre el control remoto y el equipo: Por lo general se detecta al finalizar la consigna, y el grado de urgencia depende de la consigna, pues ésta permite que la operación se realice desde un nivel inferior.
  - Que haya problemas en los equipos que realizan la función de operación del seccionador o del interruptor: pueden ser mecánicas o eléctricas, estas fallas son bastante complejas de solucionar y requiere de personal especializado.
  - Que haya problemas en los equipos de control de la subestación: En cada nivel de control se encuentran equipos que posibilitan la realización de las maniobras operativas y, en caso que fallen, pueden ocasionar el mal funcionamiento de los equipos primarios de potencia. Por lo general, dependiendo de la clase de equipo, tienen sensores o algoritmos (en el caso de los controladores numéricos) que señalan el estado.

Estas son las causas genéricas que causan que los seccionadores o interruptores no acepten las señales de operación. En la Figura 30 se muestran esquemáticamente los sistemas que acompañan los equipos de seccionamiento y corte y además se presentan las causas que generan la falla o la inoperancia de los equipos primarios de potencia.

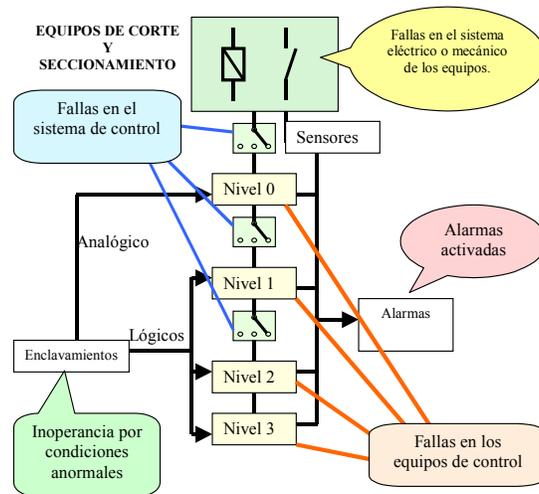


Figura 30: Fallas en los equipos de seccionamiento y corte.

Si no es posible solucionar la falla siguiendo las instrucciones que aparecen en la consigna, se procede a la verificación del control a través del seguimiento de los circuitos de control. El circuito de control se encuentra resumido en la consigna, adjunto al procedimiento para realizar el seguimiento, en este se presentan las condiciones bajo las cuales se deben tomar las muestras de tensión.

Para los seccionadores de puesta a tierra, gracias a las diferencias operacionales, funcionales y estructurales en comparación con los demás seccionadores, en algunas subestaciones no se puede realizar el control de forma remota; por lo cual no aplica para ellos la falla del control por deshabilitación por niveles de control inferiores.

### 2.2.2.3. Consignas bajo falla asociadas a alarmas

Cuando ocurre una alarma en la subestación, se enciende la señal luminosa respectiva de forma intermitente en el anunciador y se energiza la alarma sonora. El asistente de la subestación procede a realizar el reconocimiento de la alarma apagando la señal sonora y luminosa. Una vez reconocida la alarma son seguidas las acciones e instrucciones de las consignas para solucionar el problema que ocasionó la alarma. Después, se procede a reponer el anunciador y a registrar los datos en la bitácora.

Las Consignas bajo falla asociadas a la aparición de alarmas en el panel indicador o en los equipos, están diseñadas para la atención de eventos de falla que tienen indicación visual o sonora en la subestación o en los equipos. Estas consignas se organizan en un formato que permite reconocer causas y soluciones para la correcta reposición de la alarma o para la acción correctiva. Este tipo de consignas tiene una estructura básica de diseño que contiene: la identificación de señal de alarma, la verificación de la veracidad de la señal y revisión de efecto-causa, la revisión del circuito de alarma en planos y por ultimo la realización de consigna operativa si lo permite la subestación. La secuencia seguida en estas consignas se presenta en la Figura 31.

Las consignas bajo falla asociadas a alarmas están elaboradas para aquellas señales que tienen mayor importancia y para las cuales el asistente de operación puede tomar alguna acción correctiva. Se dividen en tres partes que son:

Descripción de la anomalía: contiene una descripción de la falla y los efectos sobre los sistemas de control y protección de la subestación.

Posibles causas: presenta las causas más probables de la aparición de la alarma o disparo, dando prioridad a las fallas más comunes.

Posibles soluciones: se establece un procedimiento de aceptación o reconocimiento de las alarmas y la ejecución de diversas acciones que conduzcan a definir la permanencia o no del equipo en servicio.

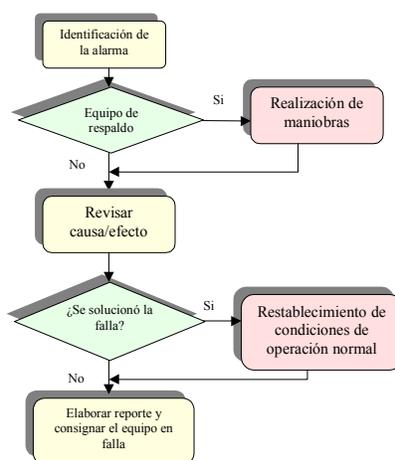


Figura 31: Procedimiento seguido en fallas asociadas al sistema de alarmas

Las alarmas típicas de una bahía de subestación son por: disparo de las protecciones principales, disparo de las protecciones de respaldo, disparo del relé de falla interruptor, recepción y emisión de señal de teleprotección, baja presión de SF6, falla del mecanismo de operación del interruptor, activación de la discrepancia de polos, falla de los circuitos de disparo, falla de los fusibles secundarios del transformador de tensión, y falla de la alimentación de corriente continua, entre otras.

Las alarmas típicas en un transformador de potencia son: operación de la protección diferencial, operación del relé de sobrecorriente (baja, alta tensión), operación del relé Buchholtz, operación del relé de presión de aceite, falla del sistema de enfriamiento, alarma por sobretensión, disparo por sobretensión, cambio de derivación incompleto, falla del regulador de tensión, falla de los circuitos de disparo, falla de los fusibles secundarios, falla de la alimentación de corriente continua, y activación de la discrepancia de polos, entre otras.

En los servicios auxiliares las alarmas típicas son: falla en barras, falla en baterías, falla en el cargador de baterías, falla en los alimentadores de corriente alterna, falla en los alimentadores de corriente continua, falla en el transformador de servicios auxiliares, y falla en la planta diesel de emergencia, entre otras.

En la Figura 32 se pueden observar los sistemas que envían señales de alarmas a los anunciadores o la computadora.

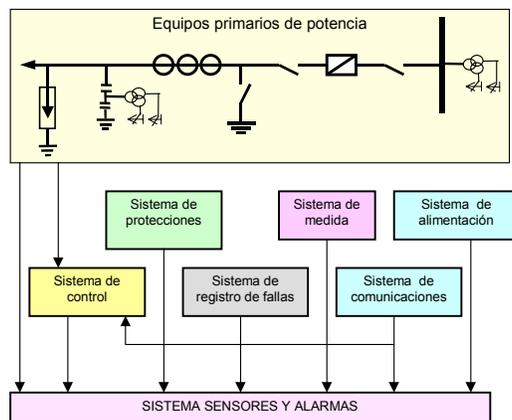


Figura 32: Esquema funcional del sistema de señalización y alarmas

### 2.2.3. FALLAS DESTRUCTIVAS DE EQUIPOS DE SUBESTACIONES

La mayoría de los ingenieros sienten alguna afinidad con los objetos, sean mecánicos, eléctricos o estructurales. Esto conlleva satisfacción cuando los activos están en buenas condiciones y disgusto por activos en mal estado. Las fallas destructivas en los equipos de las subestaciones necesitan ser tratadas de una manera diferente puesto que no permiten recuperar la operatividad del equipo a través de revisiones o de operaciones, éstas necesitan el reemplazo del equipo para lo cual se debe contar con una estrategia que establezca las necesidades y las acciones que posibiliten el reemplazo en el menor tiempo y con los recursos óptimos.

En el análisis de riesgos y en la selección de estrategias a seguir para cumplir con estas exigencias de calidad, se concluyó que los equipos de transformación de seccionamiento y corte, y las salas de control, son elementos críticos para la operación del sistema interconectado nacional (SIN) y para la continuidad y calidad en la prestación del servicio [12]. Asimismo, se determinó que la situación que genera mayor impacto por fallas en estos equipos, es la ocurrencia de una falla destructiva, ya que implica pérdida total del equipo y en consecuencia su restitución. Para el sistema, esta circunstancia ocasiona la disminución de confiabilidad, flexibilidad y seguridad en el suministro de energía.

Las características de las fallas destructivas no permiten la realización de maniobras que, reintegren el equipo a las condiciones normales sin su reemplazo, por lo cual se necesita establecer las pautas que permitan la integración de los grupos de la empresa para

restituirlos de la mejor manera posible. La metodología de reestablecimiento de equipos ante fallas destructivas se basa en los lineamientos de los planes de contingencias.

### **2.2.3.1. Plan de contingencias**

Un plan de contingencia (PDC) es un conjunto de acciones de tipo preventivo, reactivo y organizacional, que permiten su aplicación de forma adecuada y oportuna ante un evento que viola la integridad de la infraestructura de la institución o alguno de sus procesos.

La función del plan de contingencia es definir y proporcionar; según valoración previa de aspectos logísticos, técnicos, financieros y de orden público; los medios necesarios para la obtención de la información básica sobre las áreas afectadas, valoración de daños, etc.; las estrategias de respuesta para la atención de contingencias, especificando cada una de las responsabilidades de las entidades y personal; y la asignación de recursos técnicos, humanos y logísticos para el ejecución de actividades en atención a la contingencia.

Estas actividades pueden ir desde no hacer nada, cuando los requerimientos de la contingencia y la relación costo beneficio no justifica la ejecución del plan de contingencia, hasta la adopción de todas las medidas pertinentes en pro de la superación de la falla.

En general, los eventos que son causa o generan contingencia se clasifican en dos tipos:

- Actividades inherentes al proceso: procesos y eventualidades que pueden degenerar en contingencias.
- Externas al proceso: provocadas por fenómenos naturales, actos de sabotaje, etc.

Tales eventos son valorados en función de su gravedad e importancia, de acuerdo con las siguientes definiciones:

- Amenaza: Percepción de la posibilidad de ocurrencia de algún hecho dañino (siniestro) sobre los recursos involucrados en la operación de un sistema. En general, la amenaza es un riesgo no evaluado.
- Riesgo: Es la amenaza evaluada en cuanto a su probabilidad de ocurrencia y a la gravedad de sus consecuencias para un escenario determinado.
- Escenario: Es el conjunto de riesgos que pueden presentarse de forma simultánea en una instalación, y que afectan el normal funcionamiento y desarrollo de procesos.
- Seguridad: Estado aceptable de riesgo para un sistema determinado, es el resultado de todas las gestiones planeadas que se ejecutan para reducir la gravedad de las consecuencias de un escenario; es el resultado de la administración de riesgos.

Estructuralmente y de acuerdo a las experiencias recogidas en diferentes instituciones, los planes de contingencia siguen una línea de acción en la atención a emergencias,

siguiendo esta línea de acción, la estructura de un plan de contingencias está compuesta básicamente por tres apartados:

### **Plan Estratégico**

En este plan se presentan las bases de diseño del Plan de contingencia: generalidades, justificación, marco reglamentario institucional y nacional, etc. Concentra su desarrollo en la parte preventiva de una emergencia y el conocimiento de elementos sobre la emergencia que se pueda presentar, mediante un análisis de probabilidad de riesgos y amenazas que afecten los procesos y bienes bajo influencia del PDC. Fundamentalmente se establecen las acciones encaminadas a la elaboración de documentos de respaldo y el planeamiento de actividades y estrategias ante la posibilidad de una contingencia.

### **Plan Operativo**

El plan operativo especifica de manera desagregada las diferentes acciones y decisiones de tipo reactivo, que facilitan la primera consulta en una contingencia y, en el cual de manera rápida e ilustrativa, se obtenga la información indispensable para afrontar la emergencia. El diseño y estructura del plan operativo debe hacerse para que sea amigable al usuario, a manera de manual de bolsillo, que permita una rápida consulta y una revisión periódica.

### **Plan Administrativo**

Reúne un número de actividades de tipo corporativo, donde se propone un esquema de administración del Plan de Contingencia antes (especificando las labores de actualización de los documentos de respaldo y referencia del plan de contingencia, y la elaboración de un plan de capacitación y divulgación del PDC), durante (definiendo cargos específicos y estructuras de mando para la ejecución del PDC), y después (recopilación de información pertinente sobre la contingencia atendida; los resultados, fortalezas, y falencias del PDC durante la emergencia; y las posibles modificaciones de acuerdo con un análisis ex-post de la contingencia).

#### **2.2.3.2. Metodología para la elaboración del PDC**

La elaboración de un plan de contingencia en el ámbito institucional, implica inicialmente la determinación de aspectos fundamentales como son:

- **Identificación de objetivos:** Establecimiento de las metas concretas que son razón y justificación del plan de contingencia, y para lo cual se desarrollan las siguientes bases de estudio:
- **Identificación y documentación:** Realización de un inventario detallado de los bienes y recursos bajo amenaza que están dentro del área de influencia del plan de contingencia.

- **Identificación de procesos:** Determinación de los procesos y actividades que se desarrollan en el normal funcionamiento de la institución, y que son vulnerables en caso de contingencia.
- **Identificación de escenarios de contingencia:** Partiendo de la información obtenida sobre recursos y procesos, se establecen las posibles amenazas presentes en el normal funcionamiento de la empresa, las anomalías y las circunstancias más críticas que pueden generar la activación del plan de contingencia.
- **Determinación de tiempos:** Determinación del tiempo máximo en que una contingencia debe ser atendida y superada, en consideración a criterios de estabilidad operativa y financiera de la institución.

La metodología permite determinar las relaciones y la forma como están involucrados los recursos sistemáticamente, en escenarios definidos por tiempo lugar o gestión para la ejecución de operaciones y actividades técnicas, logísticas y financieras, de manera que se apliquen criterios de análisis lógico, para administrar y racionalizar participación en condiciones de vulnerabilidad frente a amenazas inherentes al proceso y a sus externalidades.

### **2.2.3.3. Procedimiento para la elaboración del PDC**

Para la elaboración del plan de contingencia, se tienen en cuenta las siguientes actividades, que están enmarcadas dentro de las bases para el diseño de estrategias, planeamiento eficiente de recursos y mejoramiento estructural del plan.

- **Identificación y Análisis del Problema.**

Esta fase consiste en analizar minuciosamente las situaciones que son objeto del PDC: las vulnerabilidades y escenarios de contingencia posibles para cada uno de los bienes objeto del PDC y sus consecuencias dentro del sistema de operación de la institución, con el fin de determinar los objetivos específicos y el alcance del plan de contingencia.

- **Revisión de Estudios Previos**

Revisión y estudios de planes de contingencia previamente desarrollados para la atención de emergencias a escala institucional o provenientes de otras organizaciones e instituciones experimentadas en la atención de emergencias; y que puedan servir de base para el desarrollo del plan de contingencia.

- **Determinación del Alcance del PDC**

Especificación de los elementos y procesos bajo influencia del plan de contingencia: importancia, características, etc.

- Elaboración del plan estratégico

Determinación de estrategias y procedimientos logísticos para la atención de contingencias:

Determinación de recursos disponibles: Identificación de los recursos logísticos, técnicos y humanos disponibles y necesarios para una utilización racional y adecuada en la ejecución del plan de contingencia.

Determinación de tareas: Identificación de las tareas necesarias para superar la contingencia, según la gravedad del evento y los recursos disponibles.

- Elaboración del Plan de Contingencia Preliminar:

Basados en toda la información recopilada sobre procedimientos, recursos y tiempos, se elabora un modelo preliminar de plan de contingencia, para ser sometido a revisión y análisis por parte de las entidades interesadas.

- Validación del Plan de Contingencia:

Aplicación del plan de contingencia a un evento simulado, para analizar y evaluar de forma objetiva, las fortalezas y falencias del plan de contingencia, y la posterior formulación de correcciones y aportes al PDC preliminar.

- Elaboración del Plan de Contingencia Definitivo:

Elaboración del formato final del plan de contingencia con la adición y revisión de los aportes y correcciones hechas en la etapa de validación.

- Elaboración del Plan Administrativo:

Elaboración de una guía para la difusión, capacitación y administración del plan de contingencia.

#### **2.2.3.4. Planes de contingencia para fallas destructivas**

Los planes de contingencia para fallas destructivas de equipos se han diseñado atendiendo dos enfoques: uno para las fallas destructivas en transformadores e interruptores de potencia y otro para fallas destructivas de equipos de control y protección.

## Fallas destructivas de transformadores e interruptores de potencia

En esta parte se presenta el diseño del plan de contingencias para el caso de fallas destructivas en transformadores e interruptores de potencia. En **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presenta la aplicación particular para los equipos de propiedad de ISA CTE Oriente, haciendo una descripción de las actividades de carácter logístico y técnico que implica el desarrollo del plan.

### Marco General

En este punto se establecen las actividades básicas para la estructuración y desarrollo del plan de contingencias. Se determinan las fases principales, teniendo cuidado que sus actividades se enmarquen dentro de un contexto holístico, que permita tener en cuenta todos los aspectos relacionados con el plan. Este plan debe servir de guía básica para atender fallas destructivas de transformadores e interruptores de potencia en el entorno de interconexión eléctrica S.A. ISA.

El plan de contingencias para transformadores e interruptores propone tres fases para el desarrollo estructurado del plan de contingencias, como se presenta en la Figura 33.

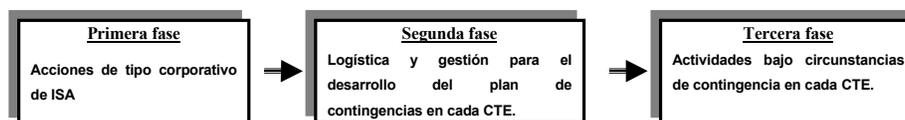


Figura 33: Fases básicas para desarrollar el plan de contingencias

Las actividades propuestas como fase inicial, deben contener las acciones de tipo corporativo a desarrollar al nivel de toda la organización, en este caso ISA. Estas actividades se deben realizar con el fin de utilizar de forma óptima los recursos de la empresa, y de realizar una adecuada documentación del desarrollo del plan de contingencias. La documentación de estas actividades se debe desarrollar antes que ocurran las condiciones de contingencia.

En la segunda fase se deben desarrollar las actividades de gestión necesarias para la consecución de los recursos que permitan atender el equipo de repuesto, el equipo fallado, el proceso de transporte (especialmente en el caso de transformadores por la característica de la carga a transportar), y el montaje y pruebas del equipo de repuesto. Es responsabilidad de los CTEs el desarrollo de las acciones identificadas en este numeral, antes que existan circunstancias de contingencia.

Como tercera y última fase se establecen las acciones a desarrollar por cada CTE, bajo condiciones de contingencia, evidenciada por la falla destructiva de uno de sus equipos conectados a 230 kV.

El diseño que se estableció en estas tres fases enseña la estructura que se debe adoptar como política general para el desarrollo de los planes de contingencia para ISA. Requiere por lo tanto, de un esfuerzo mancomunado que involucra todos los centros de transmisión de energía CTE's, y la alta dirección de la empresa.

### Primera fase - Acciones de tipo corporativo de ISA

Estas acciones responden a políticas generales, planteadas para ofrecer herramientas de apoyo al desarrollo de los planes de contingencia para cada CTE. En la Figura 34 se presentan las actividades que comprenden esta fase.

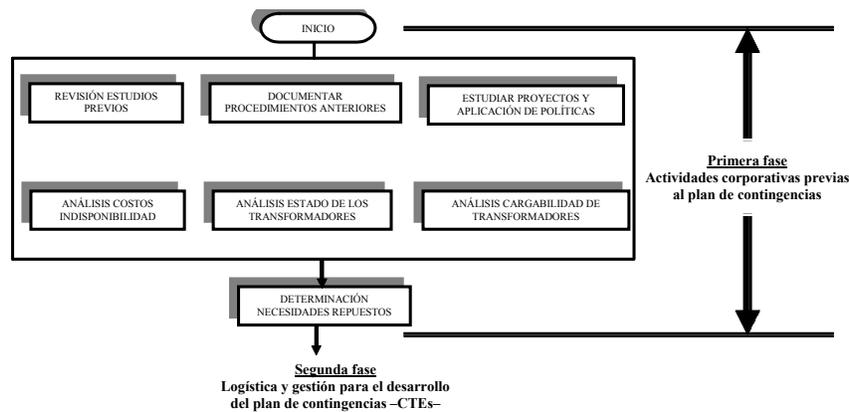


Figura 34: Diagrama de flujo de acciones previas a condiciones de contingencia fase uno

### Segunda fase - Logística y gestión para el desarrollo del plan de contingencias en cada CTE

Esta fase enmarca las acciones de gestión que se deben realizar para la consecución de los recursos, que permitan desarrollar el plan de contingencias en el menor tiempo posible, garantizando la seguridad de las personas y los equipos. Esta actividad se debe realizar en cada CTE y antes de la ocurrencia de fallas que impliquen el cambio del equipo, tal como se presenta en la Figura 35.

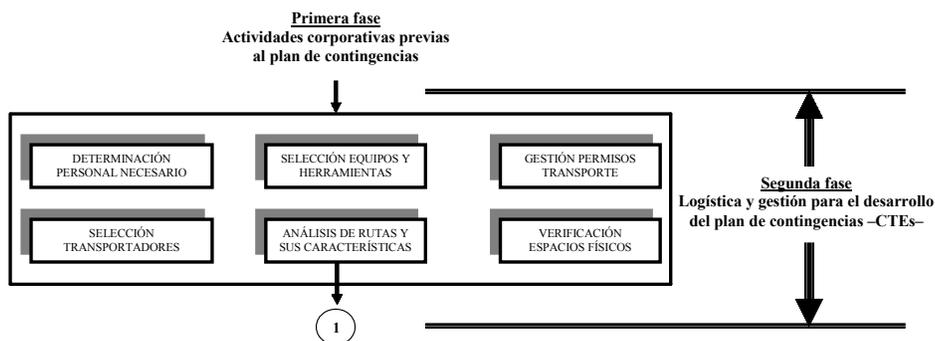


Figura 35: Diagrama de flujo de acciones previas a condiciones de contingencia fase dos

Es de importancia fundamental que se cuente con el apoyo decidido de los grupos de mantenimiento y operación del CTE, durante el desarrollo y la documentación de los planes particulares de contingencia para cada transformador e interruptores de cada subestación. Se debe hacer énfasis en la responsabilidad que tiene el grupo de mantenimiento de subestaciones, en la documentación de los procedimientos que se deben aplicar durante la atención de la contingencia.

### **Tercera fase - Actividades bajo circunstancias de contingencia en cada CTE**

Esta sección contiene el procedimiento general que permite atender una contingencia por parte de los grupos de mantenimiento de cada CTE. La contingencia considerada es aquella que implique falla destructiva de un transformador o un interruptor de potencia y los detalles del plan dependen de factores tales como el tipo de equipo fallado, el repuesto disponible, la ubicación geográfica y disposición de los equipos en patio de la subestación, y la infraestructura vial. En la Figura 36 se presenta el diagrama de flujo con las actividades que comprenden la tercera fase.

La atención del equipo fallado, bajo circunstancias de contingencia, requiere de la implementación de documentos guía. Éstos deben especificar las actividades a desarrollar, los responsables y los documentos de soporte.

En la Figura 36 se muestra el modelo de implementación adoptado para el caso de fallas en los transformadores de potencia, en los equipos del CTE Oriente.

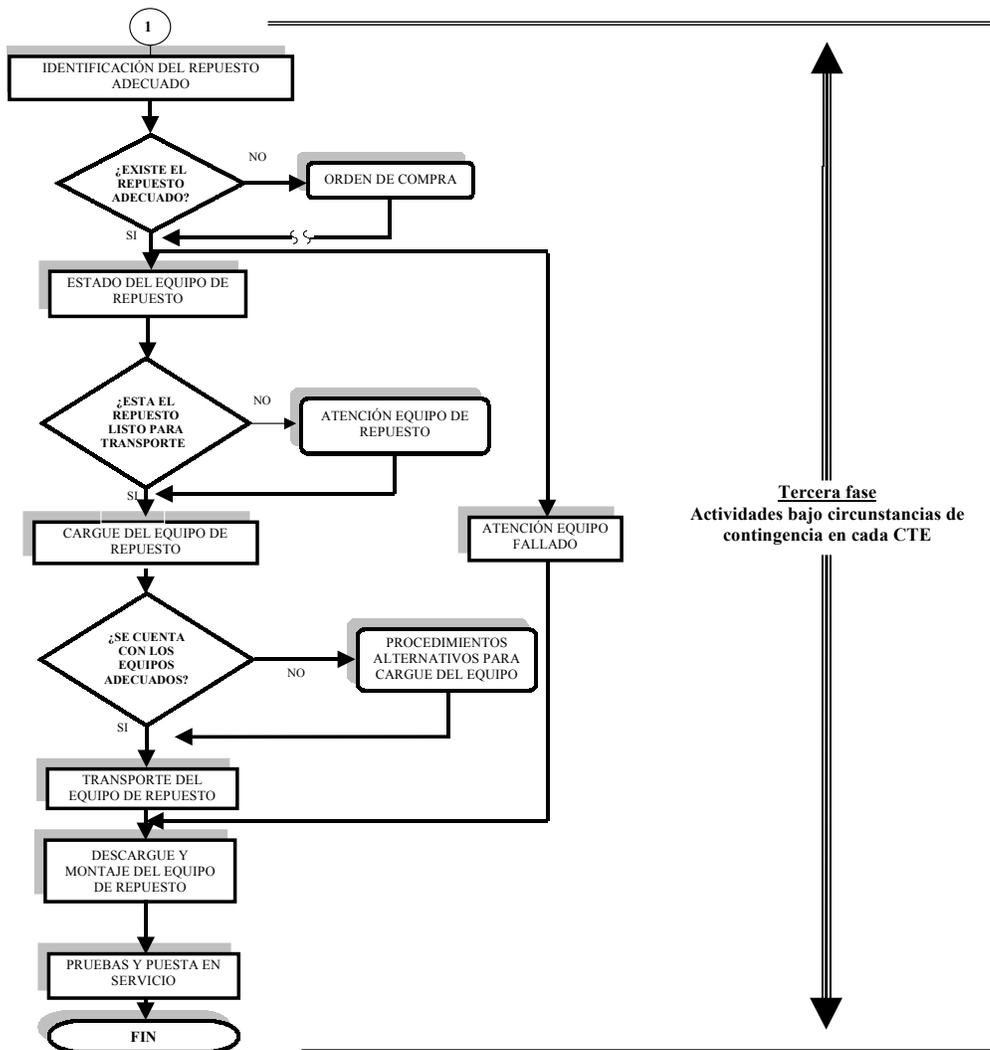


Figura 36: Diagrama de flujo para el desarrollo del plan bajo condiciones de contingencia

### **3. VALIDACIÓN Y COMPLEMENTACIÓN DE LOS PLANES DE CONTINGENCIA**

#### **3.1 INTRODUCCIÓN**

La resolución 061 de 2000 de la comisión de regulación de energía y gas CREG, establece las normas aplicables a los servicios de transporte de energía eléctrica en el STN y de conexión al STN, como parte del reglamento de operación para proporcionar confiabilidad, seguridad y calidad del servicio.

Esta resolución se aplica a todos los agentes económicos que prestan los servicios de transporte de energía eléctrica y de conexión al STN. En esta resolución se definen los términos: activos de conexión, activos de uso y disponibilidad, e implanta los índices de disponibilidad que deben tener los activos de uso y conexión del sistema de transmisión nacional. También establece que la continuidad en el servicio de transporte de energía eléctrica en el STN, dentro de niveles de calidad satisfactorios, es responsabilidad de los prestadores de dichos servicios.

Es por esto, que en convenio Interconexión Eléctrica S.A. ESP y la Universidad Industrial de Santander realizaron un proyecto de investigación para plantear los planes de contingencias a seguir en caso de fallas de equipos de maniobra, control y protección para las subestaciones del CTE Oriente, con el ánimo de disminuir los tiempos de indisponibilidad de los equipos ante fallas no destructivas o destructivas. Este proyecto, desarrolló la filosofía de elaboración, planteó el método de realización, seleccionó los equipos críticos, planteó la filosofía de las consignas y desarrolló la estructura funcional y el método de elaboración de los planes de contingencia [12]. Se desarrollaron 2 226 consignas para las 10 S/E del CTE Oriente y los planes de contingencias para fallas destructivas en los transformadores e interruptores del CTE Oriente. Este trabajo se describió en el capítulo 2.

El avance que se alcanzó en este aspecto ha sido de gran importancia, por ser pioneros en el desarrollo de estrategias de atención a fallas en subestaciones. Además, se logró construir una base de datos con las acciones a realizar en las contingencias de una subestación.

Con los resultados obtenidos se vió la necesidad de complementar el trabajo, validándolo y ampliando su alcance para las estrategias de falla para los equipos de telecomunicaciones, medición y registradores de falla, y para las fallas destructivas de los equipos de control y protección. También se planteó elaborar y establecer una metodología de validación que permitiera probar que las acciones son efectivas en el momento de aplicarlas, sin implicar corte del servicio. Por otro lado se buscó completar el manual de operación en cada una de las subestaciones de ISA – CTE Oriente.

Para llevar a cabo la mayor parte de este trabajo se establecieron grupos de trabajo que realizaron proyectos de grado para optar el título de ingenieros electricistas o electrónicos, enmarcados en este trabajo de investigación. Los grupos de trabajo tuvieron bajo su responsabilidad analizar las consignas bajo falla no destructivas para las diferentes subestaciones del CTE Oriente, aplicar la metodología para su validación, realizar los estudios de los sistemas de las subestaciones y aplicar las estrategias de atención de fallas a los sistemas y equipos mencionados para realizar las consignas bajo falla. La coordinación de las actividades de los grupos, el establecimiento de las pautas que enmarcaron cada trabajo y la responsabilidad de la ejecución de la totalidad del proyecto está a cargo del director del proyecto, el investigador de maestría y el tutor del proyecto designado por ISA. En este capítulo se presentan las pautas que enmarcaron los trabajos y los resultados que se obtuvieron.

### **3.2 VALIDACIÓN**

Antes de establecer las consignas bajo falla como procedimientos operativos para los asistentes de las subestaciones, deben probarse y utilizarse en condiciones reales con las precauciones necesarias, para que en caso de situaciones de emergencia se tenga la seguridad y confianza de su efectividad y se garantice la integridad, estabilidad y seguridad del sistema y del personal.

La validación es un proceso que tiene como objetivo el aseguramiento de la calidad de los procedimientos y condiciones de las consignas bajo falla mediante el desarrollo de una metodología que garantice la efectividad de la aplicación de los procesos de las consignas en la cotidianidad de la operación de una subestación de transmisión. Un aspecto innovador que presenta este trabajo es el de aportar un método completo de validación ajustado a las distintas categorías de consignas, de subestaciones y de posibles fallas. Es decir, partiendo de una clasificación de los factores que caracterizan las consignas bajo falla, se pretende proporcionar un método de validación que haga hincapié en los requisitos específicos de cada caso y que contemple, no sólo el procedimiento de pruebas a seguir (condiciones iniciales, pasos, herramientas y casos de prueba), sino que también incluya la recopilación de un conjunto de medidas de calidad y de evidencias que garanticen el cumplimiento de los objetivos de las consignas, la continuidad en la operación de las subestaciones en caso de falla o la elaboración de reportes de información para los grupos de mantenimiento.

El proceso de validación debe detectar y corregir errores cometidos en su elaboración. Esta fase permite además, capacitar al personal en el manejo y aplicación de los procedimientos de atención ante fallas no destructivas en subestaciones (consignas bajo falla).

En la metodología de elaboración de las estrategias de atención de fallas en subestaciones se establecieron tres fases: análisis, elaboración y validación. La validación corresponde a la etapa de finalización previa a la implantación de las consignas como procedimientos operativos de las subestaciones. Sin embargo, las revisiones de las consignas bajo falla, no solo requieren ser revisadas en su proceso de finalización, sino cuando se haya efectuado algún cambio en la configuración de los equipos de la

subestación, o periódicamente. Estas revisiones deben estar sujetas a los parámetros que se establecen en el proceso de validación. Por tanto el proceso de validación debe definir, desarrollar e implantar los parámetros que se tienen en cuenta para realizar los cambios necesarios en las consignas bajo falla. Con el proceso de validación se establecen los requerimientos para realizar las actualizaciones y modificaciones que optimicen los procedimientos y superen errores.

La etapa de validación es el proceso mas difícil de cumplir, ya que se relaciona con la confirmación de que se cumplen los requisitos particulares para los usos específicos que se proponen en las consignas, por medio de la realización de pruebas, de estudios y de la consecuente presentación de evidencias objetivas. Esto implica que se deban llevar a cabo pruebas en tiempo real o mediante desarrollo de modelos que aceleren el proceso de comprobación del cumplimiento de los objetivos propuestos en las consignas. Por tanto se hace necesaria la revisión de todos lo procedimientos, y dada la gran cantidad, es necesario establecer una metodología y un grupo de trabajo que permita esta labor.

En esta sección se presenta el esquema y los lineamientos que se han establecido para el proceso de validación presentando la visión global que se centra en las acciones que se realizan y los aspectos relacionados con el proceso: los objetivos, la filosofía, la metodología desarrollada y el procedimiento seguido.

### **3.2.1. OBJETIVOS DEL PROCESO DE VALIDACIÓN**

#### **3.2.1.1. Objetivo general**

Verificar, evaluar y corregir los procedimientos contenidos en las consignas bajo falla para las subestaciones bajo la dirección de ISA Dirección CTE Oriente.

#### **3.2.1.2. Objetivos específicos**

Verificar la validez y efectividad de los procedimientos descritos en las consignas bajo falla.

Verificar la existencia de y accesibilidad a los elementos y bornes indicados en los procedimientos de las consignas bajo falla.

Determinar la concordancia entre los planos contenidos en la consigna y el sistema real.

Simular en campo, el procedimiento descrito en la consigna bajo falla.

Realizar las correcciones necesarias a los procedimientos descritos en las consignas bajo falla.

### **3.2.2. FILOSOFÍA DE LA VALIDACIÓN**

La validación, según el diccionario, es el proceso mediante el cual se corroboran, comprueban y evalúan procedimientos específicos para atender las diferentes fallas de las subestaciones de Interconexión Eléctrica S.A. Dirección CTE Oriente. Estos procedimientos están contenidos en el manual de operación de las subestaciones.

El proceso de validación es una verificación documentada que proporciona un alto grado de confianza de que un sistema integral o proceso funciona de la manera prevista en el ambiente de operación normal.

Una consigna bajo falla está compuesta por una serie de instrucciones a seguir en caso de presentarse una falla en el sistema para la cual está diseñada. En este orden de ideas se requiere la certeza que estas instrucciones cumplan con el objetivo de la consigna de atención de la falla de una manera pronta, eficiente y segura para el sistema y para el operario. Por lo tanto como filosofía de la validación se tiene la búsqueda de un procedimiento que verifique la efectividad de las acciones que se desarrollan en la implementación de la consigna durante la atención de fallas en la subestación.

El proceso de validación lo debe realizar un grupo diferente al que realizó los planteamientos iniciales de consignas para garantizar la efectividad de la revisión

### **3.2.3. METODOLOGÍA DEL PROCESO DE VALIDACIÓN**

El procedimiento de validación planteado sigue el modelo del método científico, el cual propone análisis de la naturaleza del problema, recopilación y análisis de información, planteamientos de partida, simulación, experimentación, presentación y divulgación de los resultados finales. Esto hace que el proceso se organice para realizar las siguientes actividades: análisis, verificación, simulación corrección y aceptación. Estas cuatro actividades son la base del proceso de validación de las consignas bajo falla que garantizan la revisión de las consignas y la recolección de evidencias para mejorar los pasos y procesos de las consignas.

El análisis se realizó en el CTE Oriente de Interconexión Eléctrica S.A. con la colaboración de los asistentes de subestaciones para realizar pruebas y revisiones. Para la aplicación del proceso de validación se utilizaron dos grupos de trabajo de la Universidad Industrial de Santander que se encargaron de aplicar los lineamientos del proceso a las consignas de las diez subestaciones.

Estos grupos se encargaron de dirigir, coordinar y capacitar a los grupos de operadores encargados de la verificación y la simulación de las consignas bajo falla. Así mismo se encargaron de elaborar el material necesario y de recopilar y analizar la información que se recolectó en todo el proceso. Cada grupo se encargó de subestaciones con características similares lo que permitió que se agilizará el desarrollo del proceso.

Mediante la validación de las consignas se eleva la confiabilidad de los procesos y se permite la incorporación del asistente de subestaciones al estudio y análisis de los procedimientos establecidos en la consigna.

En la Figura 37 se puede ver el proceso metodológico seguido en la realización de estas actividades.

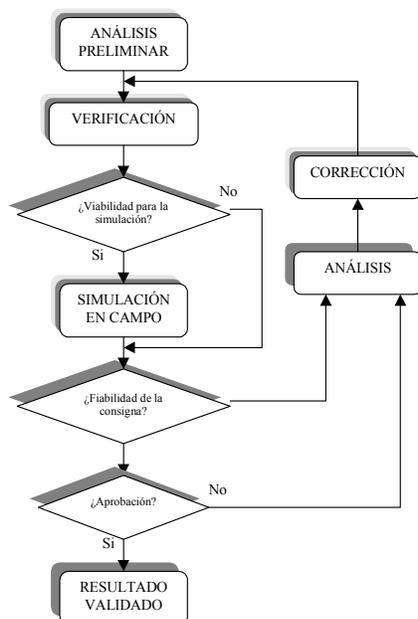


Figura 37: Proceso metodológico para la validación de las consignas bajo falla

La etapa de análisis tiene los objetivos de revisar la consigna, definir el plan que permita realizar las acciones registradas en ella, garantizar el cometido de la consigna y evitar que se presenten daños en los sistemas de la subestación. La revisión de la consigna incluye el análisis del sistema general de la subestación y el análisis de la consigna. La definición del plan incluye la programación de las actividades de verificación y simulación, teniendo en cuenta la implicación que cada acción tiene en el funcionamiento de los equipos o del sistema.

La verificación es la parte del proceso de validación que busca corroborar la información presente en las consignas, contrastándola con la realidad de cada una de las subestaciones. En esta etapa se debe garantizar la concordancia entre la información de la estrategia de atención de las fallas con la realidad de conexión de la subestación, garantizando la veracidad minuciosa de la consigna (conexiones, bornes, gabinetes, terminales, etc.). La verificación permite indirectamente, capacitar a los operadores de las subestaciones a través del conocimiento y familiarización con la metodología de atención de eventos incluida en dichas consignas.

La simulación consiste en poner a prueba en el sistema, los procedimientos establecidos en la consigna bajo falla. La simulación es el método ideal de validación ya que además

de poner a prueba la consigna, prepara al asistente de la subestación en el empleo de las consignas bajo falla.

Una vez se recoge la información obtenida en las fases de verificación y simulación, se evalúan los resultados y se procede a revisar las causas de las falencias detectadas en las consignas durante los procesos de verificación y simulación. Los resultados de la revisión se utilizan para ajustar la consigna bajo falla, hacerle un seguimiento exhaustivo y estructurar su aceptación.

La etapa de aceptación es la final del proceso y permite asegurar la exactitud de las consignas, especialmente en aquellos casos en donde se propongan nuevos procedimientos o modificación de los algoritmos, comprende la definición de falencias de la consigna, la validez de las correcciones a través de discusiones técnicas de los cambios de la consigna y la aprobación final.

Estas actividades se desarrollaron siguiendo la secuencia del flujograma de la Figura 37.

### **3.2.3.1. Análisis**

La etapa de análisis tiene como objetivo fundamental definir el plan o el conjunto de actividades que permita realizar las acciones de la consigna bajo falla, garantizar el cometido de la consigna bajo falla y evitar que se puedan presentar daños en los sistemas de la subestación. Se pueden destacar en esta etapa dos aspectos: análisis del sistema y análisis de la consigna.

El análisis del sistema está relacionado con el estudio y análisis general de la subestación, de las funciones y de los sistemas, entre otros.

El análisis de las consignas, por su parte, comprende el análisis y el seguimiento meticuloso de las acciones presentes en la consigna. Se hace un análisis de la consigna para detectar las circunstancias bajo las cuales todas las acciones de la consigna se realizan. Se desarrolla un estudio de las acciones de la consigna y se analiza la implicación que tiene en el sistema general, su realización en los escenarios de falla, y las condiciones para su ejecución.

Adicionalmente, se requiere estudiar las resoluciones de la CREG asociadas a los temas de calidad del suministro de energía eléctrica, adquirir la visión de las consignas bajo falla; y adiestrarse en la lectura de planos de subestaciones, para el seguimiento de señales y el análisis de los sistemas de las subestaciones.

Teniendo como base el análisis inicial de la información y el planteamiento de la validación, se analizan las propuestas particulares que conduzcan a alcanzar los objetivos de la validación en cada subestación, de tal forma que se pueda formular hipótesis o suposiciones previas a partir de las cuales se extraerán los procedimientos bajo falla que se pretenden implementar como procesos operativos en las subestaciones.

La definición de las propuestas de validación incluye la programación de las actividades de verificación y simulación, teniendo en cuenta la implicación que cada acción tiene en el funcionamiento de los equipos o del sistema y la selección de las fallas que se pretenden simular.

Como conclusión, en esta etapa se analiza una consigna en particular, se verifican las condiciones del sistema para que la consigna se pueda desarrollar correctamente, teniendo en cuenta la posición de seccionadores e interruptores y la configuración de la subestación, entre otras cosas, y se presentan los planes de validación de las consignas.

### **Clasificación de las consignas para su validación**

Para la realización de esta actividad se parte del paralelismo de las consignas para sistemas semejantes. Se requiere establecer las diferencias existentes para clasificarlas. Esta clasificación permite la agilización de la verificación y la comprensión de las consignas, y con esto, la optimización del trabajo.

Por otra parte para la simulación en campo se requiere que se identifiquen las consignas que al simularlas pueden ocasionar una interrupción del suministro de energía o una perturbación de la operación normal de la subestación. Esto se hace con el fin de coordinar las labores pertinentes en el momento de realizar la simulación de la consigna.

### **Elaboración del material para la validación**

Esta actividad está relacionada con la elaboración del material que se requiere para la validación. Este material contiene los hallazgos de errores en los procedimientos de las consignas actuales, y las evidencias y pruebas necesarias para justificar los cambios.

Los materiales que se requieren para la validación son los planos de la subestación, el formato de recolección de resultados de la verificación paso a paso de la consigna, y el material necesario para la simulación. En algunos casos se requiere analizar y documentar las consecuencias que puede tener en la subestación la simulación de la falla.

Los materiales que se deben elaborar son:

- Cuestionarios: para interrogar a los operadores en el momento de la simulación.
- Tablas: para recolectar los datos de bornes, equipos, gabinetes, etc. en donde haya que realizar modificaciones.
- Cronogramas: para registrar los tiempos requeridos para realizar las actividades durante la simulación. Se requiere coordinar las actividades con los mantenimientos y las salidas de equipos para optimizar los recursos de la empresa.

### **3.2.3.2. Verificación**

Debido al nivel de detalle en las consignas bajo falla y la cantidad de conexiones de una subestación, se debe elaborar un método que garantice la concordancia entre la información de la consigna y la conexión de la subestación, garantizando la veracidad minuciosa de la consigna (conexiones, bornes, gabinetes, terminales, etc.). Este método se ha llamado verificación.

Los errores que se superan en esta etapa son de particularización de los formatos de consignas genéricos de las áreas simétricas respecto a gabinetes, bornes, selectores, etc., y los introducidos por contar la subestación con planos desactualizados.

La verificación corrobora la información presente en las consignas, contrastándola con el montaje de las conexiones de cada una de las subestaciones, antes de la simulación de la consigna.

#### **Formulario para la verificación**

El método de verificación se realiza a través de la comprobación de las consignas con el sistema de las subestaciones por medio de formatos donde se relaciona la existencia y accesibilidad de los terminales, bornes de conexiones, gabinetes y otros enunciados en la consigna.

Los formatos tienen la misma información de la consigna con un cuadro donde aparecen las letras E y A seguidas de un espacio de la siguiente manera:

[E\_\_\_], [A\_\_\_],

Estos formatos son diligenciados por el operador y tienen que ser llenados con un “si” o un “no” si el equipo, terminales, bornes de conexiones u otros elementos existe [E] y si es accesible [A].

#### **Capacitación de los operadores**

Esta actividad exige la participación de los operadores de las subestaciones para que adquieran conocimiento de las acciones y procedimientos a través de la revisión y contrastación de las consignas con el montaje de las instalaciones en las subestaciones.

Las características de las consignas posibilitan la participación de los operadores. Sin embargo la similitud ocasiona cansancio y monotonía, pues conllevan la percepción de repetición de los procedimientos. Para evitar esto, la verificación de procedimientos similares la deben realizar diferentes operadores, lo cual proporciona uniformidad de

conceptos en los operadores y garantiza que todos participen tanto en el proceso de validación como en la adquisición del conocimiento de las consignas.

La capacitación de los operadores se debe hacer con anticipación de los procesos de simulación de consignas. Con esto se busca que el operador estudie la consigna y el material necesario para la realización del trabajo. Dentro de este aspecto se deben destacar, entre otras actividades, la revisión de los planos originales y la solución de inquietudes.

### **3.2.3.3. Simulación**

La clave para verificar y comprobar que un procedimiento funciona para dar respuesta a eventos de emergencia, es ponerlo a prueba mediante la realización de simulacros. La práctica de simular fallas puede asegurar que la respuesta que se dé en el caso de una situación real sea la adecuada. Esto permite identificar áreas con debilidades en los procedimientos, y corregirlas antes que una emergencia las revele.

La simulación consiste en la reproducción de la circunstancia de contingencia bajo las condiciones particulares de ocurrencia de una falla, el seguimiento de la respectiva consigna, las prevenciones de seguridad del sistema y del personal y la recolección de evidencias que permitan identificar los errores en los procedimientos.

La simulación comprende el analizar las circunstancias asociadas a la falla a simular, teniendo en cuenta aspectos tales como: configuración de la subestación, estructura de las consignas operativas y bajo falla, tipos y duración de las fallas, características de los equipos bajo falla, sistemas de señalización y alarma, elaboración de sucesos y detalles de la emergencia, tiempos de duración de los eventos, condiciones generales para cada situación, etc.

La simulación pone a prueba las consignas bajo falla y se complementa con la actividad de análisis pues requiere hacer los estudios necesarios de inyección de la falla y análisis de las actividades en la consigna, con el propósito de tomar las medidas de seguridad pertinentes.

Se inicia con la elaboración del plan de simulación, el cual contiene los eventos programados y preparados, los pasos y acciones a realizar para representar una falla, y el material necesario para la recolección de evidencias. Luego se entrena al personal que interviene en la simulación; pues es vital la participación activa de los participantes del proceso, y por último, se ejecutan los simulacros.

En la simulación se maniobra e interviene el sistema mediante la introducción de fallas, esto requiere analizar el sistema, seleccionar la falla que se implantará y los estudios de las consecuencias de la inyección de la falla en el sistema. Para la selección de la falla se tiene en cuenta que ésta permita realizar todos los procedimientos de la consigna a la cual se remite el operador en la emergencia.

El proceso de simulación se debe documentar de tal forma que proporcione lineamientos generales para desarrollar un programa de capacitación y entrenamiento del personal involucrado en la atención de fallas de las subestaciones.

La información de la simulación de la consigna sirve para complementar y mejorar las consignas. A partir de esta etapa, las modificaciones necesarias para mejorar la consigna, han de contar con la aprobación de los grupos evaluadores (Grupo UIS, Operadores, técnicos de mantenimiento e ingenieros de ISA-CTE Oriente).

La prueba de los procedimientos se realizó sobre las consideraciones más desfavorables o fallas más críticas. En donde fué posible, se realizaron cambios de configuración y métodos manuales, no solo simulando un ambiente cercano a la realidad sino considerando que la emergencia puede existir y es la más crítica.

### **Criterios para selección de consignas a simular**

Debido a las condiciones de simetría en sistemas como los campos, diámetros, etc. y debido a la repetitividad de los procedimientos, no es necesaria la simulación de todas las consignas. Por esto se establecieron criterios para seleccionar el mínimo de consignas que requieren ser simuladas tratando de justificar la extensión del proceso de validación a aquellas consignas que no se simulan.

El número de consignas a simular debe ser el mínimo posible debido a que para la intervención de los equipos se requiere la autorización por parte del CND del plan de trabajo, y estos afectan los índices de disponibilidad de los equipos intervenidos. Para evitarlo, las pruebas de simulación se realizan en los momentos de mantenimiento o intervención de los equipos.

### **Plan de simulación**

Corresponde a la coordinación de la actividad de simulación. En éste, se establece la programación y la preparación de los eventos, los pasos y las acciones a realizar para proceder a la simulación en campo de las consignas, previo análisis del mismo como se observa en la metodología.

El objetivo del plan de simulación es evaluar y verificar la coordinación e integración de los procesos en el ámbito estratégico, táctico y operativo, que involucran la simulación de una consigna bajo falla específica.

Para la realización del plan de simulación se requirió elaborar formatos que contenían todas las actividades, los tiempos y el personal encargado. Los temas que debe contener el plan son:

- Consideraciones generales.
- Establecimiento de los objetivos.
- Determinación del tipo de falla.
- Selección del sitio de simulación de la falla.
- Elaboración del registro cronológico de las actividades junto con las personas que deben realizarlas y el lugar.
- Establecimiento de funciones y responsabilidades de los participantes.

### **Consignación de equipos**

Para la intervención de los sistemas y equipos del SIN se requiere la realización de los procedimientos que estipula la resolución de la CREG 025 de 1995 (Código de redes), para la realización de trabajos en los sistemas y equipos del sistema interconectado. Hay dos procedimientos que se deben seguir dependiendo de la importancia del equipo para el sistema:

- Consignación de Equipos: Es el procedimiento mediante el cual se autoriza el retiro de operación de un equipo, una instalación o de parte de ella para mantenimiento.
- Consignación Nacional: Es el nombre que se da al mantenimiento de los equipos del SIN, cuya indisponibilidad afecta los límites de intercambio de las áreas operativas, las generaciones mínimas de seguridad de las plantas térmicas e hidráulicas, disminuye la confiabilidad de la operación del SIN o limitan la atención de la demanda.

Estas consignaciones se diligenciaron bajo los parámetros establecidos por el CND y por interconexión eléctrica para la realización de los simulacros de consignas.

### **Recursos**

Con el material del plan de simulación de una consigna dada, se procede a preparar la subestación. Se alistan los equipos para inyectar la falla; por ejemplo, la interrupción de la continuidad del circuito de control en un punto determinado.

Una vez inyectada la falla, se sigue el procedimiento sugerido por la consigna bajo falla, y se anota en los formatos los resultados del seguimiento. Terminado el proceso de la consigna (debe dar la localización de la falla si el procedimiento de la consigna es correcto) se anotan las observaciones y las sugerencias por parte del grupo que ha realizado la simulación, y se procede a dejar la subestación en las condiciones de operación normales.

#### **3.2.3.4. Corrección**

La corrección es la etapa final del proceso metodológico. Realizados los pasos anteriores se recoge la información obtenida en las fases de verificación y simulación, se evalúan los resultados y se procede a revisar las causas de las falencias detectadas en las consignas durante los procesos de verificación y simulación. Los resultados de la revisión se utilizan para ajustar la consigna bajo falla, hacerle un seguimiento exhaustivo y estructurar su aceptación.

Esta etapa, es otro proceso, puesto que es necesario asegurar la exactitud de las consignas, especialmente en aquellos casos en donde se propongan nuevos procedimientos o modificación de los algoritmos; comprende la definición de falencias de la consigna, la validez de las correcciones a través de discusiones técnicas de los cambios de la consigna y la aprobación final.

Las consignas corregidas se distribuyen entre el personal de operación de las subestaciones. Es indispensable que para la aplicación, el personal encargado tenga previo conocimiento y entrenamiento en la aplicación de los planes, esto ahorrará tiempo y aumentará la confiabilidad y la seguridad en la aplicación.

#### **Recopilación y evaluación de la información**

Para esta actividad se cuenta con el material producto de la ejecución de la simulación y verificación, se recolectan los datos obtenidos en la simulación y verificación, se evalúan los resultados y se procede a revisar las causas de las fallas potenciales en la consigna detectadas durante el proceso de validación.

Esto permitió identificar tres clases de errores: de redacción, de procedimientos y en la indicación de los bornes y terminales. Los resultados de la revisión servirán para ajustar la consigna bajo falla y mejorar las deficiencias de los operadores. Por lo tanto las correcciones de las consignas bajo falla están asociadas a los tipos de errores.

#### **Aceptación**

Para efectuar las correcciones de los errores que se encuentran en las consignas se plantea una concertación con los grupos de operadores de las subestaciones y el personal a cargo de la operación del CTE Oriente.

Se presentan las evidencias de los errores de las consignas, que se obtuvieron durante el desarrollo del proceso de validación, a los grupos de trabajo de ISA mediante la realización de debates y revisión conjunta de los procedimientos operativos y de las soluciones de los errores. Se finaliza un acuerdo común que origina la aceptación de los cambios que se introducen en las consignas.

## **Divulgación de las consignas elaboradas**

La divulgación consiste en el proceso de hacer que todos los operadores de las subestaciones, conozcan las consignas bajo falla e identifiquen su papel en la realización (o implantación) de la misma

Para efectuar esta actividad se presentan las consignas corregidas y validadas haciendo una capacitación a los operadores con base en la corrección de las fallas que se presentaron durante la realización de la simulación.

También se debe capacitar a los operadores para la realización periódica de simulaciones de falla encaminadas a adquirir destreza y habilidad cuando se presenten fallas reales en el sistema.

### **3.2.4. RESULTADOS DEL PROCESO DE VALIDACIÓN**

Como primera parte se presenta la aceptación que tuvo la realización de este proceso por parte de los operadores encargados de realizar el trabajo en la subestación debido a la limitación que tenía el personal de la Universidad para operar equipos.

También es de destacar el grado de manejo que alcanzaron los operadores de la subestaciones en la atención ante fallas.

Se desarrolló e implementó la metodología de validación que posibilita el mejoramiento continuo de los procesos operativos de las subestaciones eléctricas asegurando la experiencia del personal de operación.

Se revisaron y corrigieron dos mil doscientas veinte y seis consignas de las diez subestaciones del CTE Oriente, la validación de estos procedimientos mejoró el proceso operativo en condiciones de falla de la subestación y evitó cometer los errores de los procedimientos antes de este proceso, que en el caso más severo, incrementaban los perjuicios de las fallas.

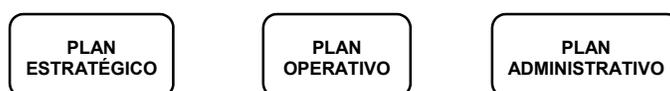
### **3.3 COMPLEMENTACIÓN DE LOS PLANES DE CONTINGENCIA**

Esta actividad comprendió el desarrollo de los procedimientos operativos bajo falla para los sistemas de comunicaciones, de medida y registradores de eventos, y los planes a seguir para fallas destructivas en las salas de control, que no se tenían de la fase 1.

### 3.3.1. FALLAS DESTRUCTIVAS EN EQUIPOS DE CONTROL Y PROTECCIÓN

Los planes de contingencia para las fallas destructivas en equipos de control y protección se basan en la metodología general del plan de contingencias para fallas destructivas planteado en el capítulo dos. El plan de contingencias para fallas destructivas de salas de control y protección consta de tres etapas, cada una enfocada a una actividad específica, en la Figura 38 se pueden observar estas etapas.

El plan de contingencias para fallas destructivas de equipos de control y protección se plantea en tres fases como se presenta en la Figura 38.



*Figura 38: Fases básicas para desarrollar el plan de contingencias*

El plan de contingencias para fallas destructivas en casetas de control y protección es una herramienta de carácter institucional que determina las acciones y procedimientos necesarios para la recuperación de las funciones de control, protección, registro y medida de las bahías de línea y/o transformación de las subestaciones ante la eventualidad de una falla destructiva que pueda afectar, de forma parcial o total.

En [44], se presenta la aplicación particular para los equipos de propiedad de ISA CTE Oriente, realizando las actividades de carácter estratégico operativo y administrativo del plan para las subestaciones del CTE Oriente. Estos planes toman como base, para afrontar las emergencias, la utilización de una herramienta técnica desarrollada por ISA, denominada Módulo Móvil de Control “Shelter”, el cual permite las funciones de protección control, medida y registro para un área de la subestación.

Sin embargo, los lineamientos metodológicos que se presentan se pueden aplicar con la utilización de recursos técnicos diferentes al Shelter, los cuales tienen que ser planteados y diseñados en el plan estratégico.

#### 3.3.1.1. Plan Estratégico

El plan estratégico concentra su desarrollo en la parte preventiva de una emergencia y el conocimiento de elementos sobre la emergencia que se pueda presentar. En este plan se presentan las bases de diseño del plan de contingencia: generalidades, justificación, marco reglamentario institucional y nacional, etc. Fundamentalmente se establecen las acciones encaminadas a la elaboración de documentos de respaldo y al planeamiento de actividades y estrategias ante la posibilidad de una contingencia.

En el desarrollo del plan de contingencias, se llevan a cabo tareas para la elaboración del plan de contingencias y de sus documentos asociados como:

### **Guía de valoración del estado de las Subestaciones**

Documento guía para la evaluación y valoración de daños en equipos de control y protección de las subestaciones del CTE Oriente.

### **Estudio de Subestaciones del CTE Oriente**

Documento de consulta que incluye información pertinente sobre cada una de las subestaciones: Estudio de reconfiguración, consignas operativas para la instalación del equipo Shelter, disposición física, ubicación del equipo Shelter, equipos y funciones asociadas, vías de acceso, etc.

### **Actividades bajo Contingencia**

Documento guía sobre las actividades a realizar durante la contingencia; personal necesario y aptitudes para el desarrollo de las tareas.

### **Selección de equipos y herramientas**

Lista de herramientas, equipos y manuales necesarios para el desarrollo de las actividades bajo contingencia: (cargue y descargue, transporte, medición, instalación, pruebas y puesta en servicio)

### **Guía de gestión permisos de transporte**

Guía para la gestión de trámites legales necesarios para el transporte del módulo, así como los necesarios para garantizar la seguridad del módulo y del personal asociado.

### **Selección de transportadores**

Listado de empresas transportadoras aptas para traslado del equipo, según el destino y el tipo de transporte necesario (aéreo - terrestre); de acuerdo con la gravedad de la contingencia.

## **Análisis de rutas y sus características**

Documento de consulta sobre las carreteras más apropiadas para el transporte del módulo, según su capacidad y accesibilidad.

### **3.3.1.2. Plan Operativo**

El plan operativo determina de manera desagregada las diferentes acciones y decisiones de tipo reactivo, que facilitan la primera consulta en una contingencia, y en la cual, de manera rápida e ilustrativa, se obtenga la información indispensable para afrontar la emergencia. El diseño y la estructura del plan operativo deben efectuarse de manera amigable al usuario, a manera de manual operativo de bolsillo, de tal forma que permita una rápida consulta y una revisión periódica.

El plan operativo se crea como aplicación del plan estratégico. El plan operativo establece una estrategia de control y seguimiento a las actividades del plan de contingencia. En el plan operativo se especifican de forma desagregada las acciones a ejecutar en el momento de la contingencia. En este sentido, el plan operativo tiene el propósito de:

- Unificar, de forma práctica, el procedimiento de ejecución de la respuesta a una emergencia.
- Motivar el uso de formatos para el seguimiento y control de la emergencia.

La presentación del plan operativo debe facilitar la primera consulta en situaciones de contingencia. Para este propósito, el formato de manual de bolsillo se presenta como una buena alternativa de diseño al permitir de manera rápida e ilustrativa la obtención de la información indispensable para afrontar la emergencia, además de servir como herramienta que orienta las acciones de atención a la contingencia de una forma clara y ordenada.

### **Acciones preliminares**

Las acciones previas a la ejecución del plan son:

- Reconocimiento de los daños presentados en las instalaciones.
  - Documento base: Valoración Estado de las Subestaciones.
- Evaluación del alcance de la falla.
- Planteamiento de soluciones a corto plazo - utilización del equipo Shelter.
- Establecimiento del lugar de ubicación del Shelter.
  - Documento base: Estudio de Subestaciones del CTE Oriente.

- Adecuación del lugar de la falla para la correcta ubicación del módulo Shelter, de acuerdo a sus requerimientos.
  - Documento base: Manual de Instalación y Puesta en servicio Equipo Shelter.
- Adecuación del espacio necesario para el descargue y ubicación del equipo.
  - Documento base: Manual de Instalación y Puesta en servicio Equipo Shelter.
- Establecimiento de maniobras operativas en la subestación para el proceso de instalación del Shelter (desenergización de campos de línea de subestación, etc.).
  - Documento base: Estudio de Subestaciones del CTE Oriente.
- Retiro de los equipos fallados.
- Verificación de disponibilidad del equipo.
- Preparación del módulo Shelter para la atención de la falla.
  - Documento base: Manual de Instalación y Puesta en servicio Equipo Shelter.
- Adecuación del equipo para el transporte.
  - Documento base: Manual de Instalación y Puesta en servicio Equipo Shelter.
- Solicitud a Gestión Red del estudio de corto circuito y coordinación de protecciones para la configuración de las protecciones.
- Introducción de los "settings" de configuración de los equipos del Shelter.
- Estudio de coordinación de protecciones - gestión red.
- Organización del personal encargado de la instalación.
  - Documento base: Actividades bajo contingencia.
- Verificación del equipo auxiliar - lista de chequeo.
  - Documento base: Selección de equipos y herramientas.
- Atención del equipo auxiliar.
  - Documento base: Manuales de equipos.
- Verificación del estado del equipo auxiliar, materiales y herramientas necesarias para el desarrollo de pruebas instalación y puesta en servicio.

### **Logística del transporte**

Las acciones de logística a realizar antes de la ejecución del plan son:

- Selección de la ruta a seguir.

- Documento base: Análisis de rutas y sus características.
- Gestión de adquisición de permisos de transporte del módulo.
  - Documento base: Gestión permisos de transporte.
- Selección de la empresa transportadora, de carga y descarga del equipo.
  - Documentos base: Selección de transportadores y procedimiento de Contratación ISA - CTE Oriente.
- Selección del personal encargado de ISA: Ing. Mantenimiento, ing. protecciones, personal de seguridad, etc.
  - Documento base: Actividades bajo Contingencia.
- Coordinación del transporte de personal y el equipo.
- Establecimiento de labores y responsabilidades durante la carga y el transporte.
  - Documento base: Actividades bajo Contingencia.

### **Logística de la Instalación**

Las acciones sobre la instalación previa a la ejecución del plan son:

- Verificación de manuales de instalación, pruebas y puesta en servicio de los diferentes equipos del Shelter, equipos de prueba, de transporte.
  - Documentos base: Selección de equipos y herramientas, y Manuales de equipos.
- Establecimiento de labores durante la instalación, organización del personal.
  - Documentos base: Plan de Administración del PDC, y Actividades bajo Contingencia.

### **Acciones bajo contingencia**

Las acciones que se realizan durante la ejecución del plan son:

Carga del equipo:

- Verificación de las condiciones de los equipos de carga y transporte.
- Verificación de las condiciones mínimas de seguridad para el desarrollo de la operación.
- Carga de los equipos.
- Aseguramiento de los equipos para el transporte.

## Transporte del equipo

- Reconocimiento de la ruta a seguir, verificación previa del estado de la vía, condiciones de tránsito y seguridad de la ruta a seguir.
- Establecimiento de labores de control durante el transporte del equipo.
- Transporte del equipo hasta la subestación fallada.
- Verificación de comunicaciones entre el personal de transporte y el personal de seguridad.

## Descargue del equipo

- Evaluación de las condiciones de llegada del equipo.
- Descargue y ubicación del Shelter en la subestación fallada.

## Instalación y puesta en servicio

- Reconfiguración del cableado de la subestación.
- Instalación del equipo, cableado de las señales de entrada y salida del Shelter.
- Desarrollo de pruebas de funcionamiento, equipos de control, protección, planta diesel, etc.
- Ajustes a la configuración del equipo.
- Estudio de coordinación de protecciones - gestión red.
- Puesta en servicio.

### **3.3.1.3. Plan Administrativo**

Reúne un número de actividades de tipo corporativo, donde se propone un esquema de administración del Plan de Contingencia (PDC) antes (especificando las labores de actualización de los documentos de respaldo y referencia del plan de contingencia, y la elaboración de un plan de capacitación y divulgación del PDC), durante (definiendo cargos específicos y estructuras de mando para la ejecución del PDC), y después (recopilación de información pertinente sobre la contingencia atendida; los resultados, las fortalezas, y las falencias del PDC durante la emergencia; y las posibles modificaciones de acuerdo con un análisis ex-post de la contingencia).

Cada uno de estos planes está subdividido por subplanes con las actividades y documentos requeridos. A continuación se describe cada uno.

## **Plan de Capacitación y Divulgación**

Documento guía para la divulgación del Plan de Contingencia a nivel institucional en Interconexión Eléctrica S.A. - ISA CTE Oriente, que contiene la información sobre el desarrollo del plan de contingencia y los documentos de respaldo y referencia.

## **Plan de Administración del PDC**

Guía Administrativa del PDC, que contiene las directrices para la planeación, organización, dirección y control del plan de contingencia.

### **3.3.1.4. Resultados de las estrategias**

Los resultados del proyecto se centran en dos tipos de productos, a saber:

- Se elaboraron propuestas para el restablecimiento de sistemas de control y protección para las fallas destructivas en equipos de control y protección en subestaciones, que definen las características y los requerimientos técnicos adecuados para el mejoramiento de los procedimientos de contingencias de ISA.
- Se elaboró un documento maestro del plan de contingencia y planes de aplicación para cada una de las subestaciones a cargo de ISA - CTE Oriente.

El plan de contingencia garantiza que los índices de indisponibilidad y la continuidad del servicio se afecten lo menos posible ante fallas severas en las salas de control, acorde a los requerimientos de la CREG, a partir de la resolución del problema que ocasionó la contingencia.

### **3.3.2. FALLAS NO DESTRUCTIVAS EN EQUIPOS DE MEDIDA**

El sistema de transmisión de energía eléctrica usa medidores de potencia real, potencia reactiva, tensión y corriente respectivamente. Estas cantidades se registran continuamente a través de transformadores de corriente y de potencial. Las cantidades analógicas pasan a través de transductores y convertidores analógico-digitales, y las salidas digitales se registran en el centro de control de energía a través de varios enlaces de comunicaciones. Los datos recibidos en el centro de control se procesan por computadora para informar a los operadores del sistema sobre el estado de la red de la región. Los datos adquiridos contienen inexactitudes en las mediciones físicas por errores aleatorios o de ruido. Estos errores se pueden cuantificar en un sentido estadístico y los valores estimados se aceptan como razonables si se cumplen ciertas medidas de exactitud. Por tanto, el sistema de medida de una subestación es la base para la función de adquisición de datos y para la operación de los sistemas modernos de energía.

Los sistemas de medición son muy importantes para el control y operación de un sistema de potencia porque permiten acceder a los valores de las variables del sistema eléctrico (kV, A, MW, Mvar, VA) con la precisión necesaria, para la operación y administración de un sistema de potencia.

De igual manera, los nuevos esquemas de los sistemas modernos de potencia exigen tener un sistema de medición que posibilite la implementación de las transacciones de energía entre los agentes.

Las lecturas entran a formar parte del análisis y control interno de la energía importada y exportada, de tal forma que un error puede generar un problema económico en los contadores considerados como frontera comercial.

Los equipos de medida pueden indicar falla interna a través de “led” indicadores o a través de mensajes en el interfase de usuario del equipo que pueden ser activados por: Fallas en la alimentación del equipo, desactualización del registro de tiempo del contador, alarma de nivel de batería baja, ausencia de lectura en el “display” del contador, falla en las señales de tensión y corriente y falla del contador principal, entre otras.

Con el desarrollo de los procedimientos de falla de equipos de medida, se persigue la reducción del grado de incertidumbre relacionado con las causas, las consecuencias y los procedimientos que se deben seguir en el momento de aparición de una señal que indique problemas en el funcionamiento normal de los equipos de medición de la subestación. De esta manera se presenta un aporte significativo a la optimización de los procesos y del recurso humano en el sistema de interconectado.

#### **3.3.2.1. Sistema de medida de las subestaciones eléctricas**

Para medir la energía eléctrica se utilizan contadores de energía, apoyados en algunos casos por relojes e indicadores, o por registradores de máxima potencia. Estos elementos permiten conocer la cantidad de energía producida o consumida, y realizar gráficos de consumo que faciliten el estudio de nuevas instalaciones y el control de las horas de mayor consumo.

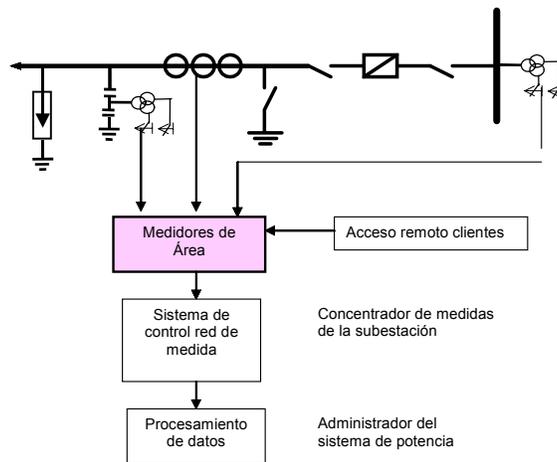


Figura 39: Sistema de medida de las subestaciones de transmisión

El sistema de medida de las subestaciones está compuesto por los transformadores de medida, los medidores y la red de medidores de energía tal como se muestra en la Figura 39.

### 3.3.2.2. Red de medidores de energía

Una red independiente de contadores de energía está compuesta por un concentrador, que constituye la unidad de acceso a la red para la conexión y direccionamiento de los contadores de energía, de un módem para el acceso remoto a la red, y de los conversores opto-eléctricos requeridos para realizar la conexión con el medio de comunicación usado en la red.

### 3.3.2.3. Medidores de Energía Multifuncionales

Los equipos utilizados en el sistema de transmisión de energía son unidades de medida con múltiples funciones programables. Deben tener capacidad de medida y registro para energía activa y reactiva, demandas, potencia activa y reactiva, corriente y tensión, como mínimo.

En general, los contadores multifuncionales poseen un despliegue de indicación local o pantalla de cristal líquido, que permite mostrar la información de las diferentes medidas solicitadas, e indican la dirección y el valor para las medidas de energía activa y reactiva, con una resolución de 0,01 MW-h ó 0,01 MVar-h. Además, disponen de un teclado o pulsadores que permiten la selección de las diferentes variables de medida, y de sus parámetros de ajuste.

Los contadores de energía multifuncionales, tienen puertos de comunicación serial que permiten la implementación de la red de contadores de energía para la transmisión de esta información y el acceso de forma remota. Utiliza un “software” de comunicación de

protocolo abierto, que permite la integración de un gran número de unidades dentro de la misma red.

Los medidores cuentan con un reloj de tiempo real, cuya base de tiempo es independiente de la frecuencia de la red, y cuenta con los medios de sincronización necesarios para garantizar que no existe una desviación de la hora fijada superior a 60 segundos en el año.

### **Transformadores de medida**

Los transformadores de medida se encargan de proporcionar a los equipos de control y protección valores proporcionales de tensión y corriente en alta tensión. Es decir, que estos convierten los parámetros de tensión y corriente a valores escalados que pueden ser manipulados, por los equipos de control, medida y protecciones, y por las personas que operan los sistemas, de una manera segura.

Generalmente, los transformadores de medida cuentan con dos tipos de devanados o núcleos según la función que desempeñan: los núcleos de medida, cuya característica principal es su alto nivel de precisión, y los núcleos de protección, que son utilizados para supervisar el funcionamiento de los circuitos aún en condiciones de falla.

Transformadores de tensión (PT's): Son elementos de tipo monopolar generalmente con dos núcleos: uno de medida y uno de protección. Cada circuito tiene asignados tres PT's, uno para cada tensión de línea. Sin embargo, usualmente se utiliza un sólo PT para la medición de la tensión de barra (generalmente ubicado en la fase B), que proporciona información para la sincronización de los circuitos con la barra.

Los transformadores de tensión se conectan a los circuitos de control y protección de la subestación a través de interruptores de protección térmica, denominados "Mini Circuit Breakers"; los cuales poseen una señal de estado asociada (falla MCB) que advierten sobre la operación de esta protección.

De cada circuito de línea, transformación o generación en la subestación, se toman cuatro señales de tensión desde los secundarios de los PT's: señales de tensión de cada fase y señal de tensión de neutro.

Transformadores de corriente (CT's): Son transformadores de tipo monopolar y usualmente poseen 4 núcleos (aunque algunas configuraciones de subestaciones requieren de CT's con 6 núcleos): tres núcleos de protección utilizados para las protecciones principales de los circuitos y la protección diferencial de barra, y un núcleo para la función de medida.

A diferencia de los transformadores de tensión, los transformadores de corriente no poseen un elemento de protección térmica que los aisle de los circuitos de protección y

medida, dado que estos elementos siempre deben tener su devanado secundario cerrado. Sin embargo, poseen unos conectores con los cuales se puede cortocircuitar el devanado secundario, pudiéndose así aislar de los circuitos de control y protección cuando se requiere realizar labores de mantenimiento y prueba.

Se toman cuatro señales de corriente de los CT's para cada circuito de línea, transformación o generación de las subestaciones: las señales de corriente de fase y la señal de corriente de neutro.

#### **3.3.2.4. Consignas bajo falla para equipos de medición**

Los equipos de medición estudiados son contadores multifuncionales para la medida de las transferencias de energía en las líneas de 230 kV y en los transformadores. Como se muestra en el capítulo cuatro, existen diferentes marcas de contadores en las subestaciones bajo la dirección del CTE Oriente. En el estudio realizado se llegó a la conclusión de que existen tres tipos de falla que se pueden presentar en los contadores de medida: fallas asociadas al "software" del equipo, fallas asociadas al "hardware" del equipo y fallas asociadas a las señales externas o a la red del contador.

##### **Fallas asociadas al "Software"**

Algunos contadores multifuncionales tienen un "software" que permite el acceso remoto a ellos a través de un PC. Por este medio, es posible configurar el contador y tener acceso a los registros de medida. Cada contador tiene un "software" diferente, los contadores marca PROMETER tienen un "software" llamado PROWIN y PROREAD, y los contadores QUANTUM tienen un "software" llamado MINIMASTER [18].

La estructura del contenido de la consigna bajo falla asociada al "software", tiene las casillas de posible causa y posible solución, mostrada una debajo de otra y no de forma paralela, para facilitar su lectura ya que se incluyen figuras de las pantallas del "software". En algunas consignas bajo falla se incluye al final del procedimiento la casilla de Diagnóstico Preliminar, la cual da un reporte de la posible causa de la falla cuando el operador no ha podido reestablecer las condiciones normales del "software" o del acceso remoto.

##### **Fallas asociadas al "Hardware"**

Los contadores pueden presentar fallas que están relacionadas con una falla interna del equipo o de su configuración.

La estructura de las consignas bajo falla para los contadores asociadas al "hardware" tiene la casilla de descripción que señala la forma como se evidencia la falla. Tiene las casillas de posible causa y posible solución que determinan un procedimiento para restablecer los parámetros del equipo o para descartar posibles causas. Se incluye la

casilla de Diagnóstico Preliminar que reporta al Grupo de mantenimiento de ISA-CTE Oriente, la conclusión a que se llegó.

### **Fallas asociadas a señales externas**

Los contadores de medida tienen una alimentación externa tomada de un PT de la subestación y unas señales eléctricas de entrada que son señales de tensión y de corriente provenientes de los PT y CT instalados en la bahía del elemento a realizar la medida. Algunas subestaciones tienen los contadores en red tipo “bus” a través de fibra óptica. Para definir las señales externas asociadas al contador fue necesario realizar un seguimiento de los planos de medición de cada subestación, de allí la importancia del adiestramiento en lectura de planos como se muestra en el anexo C. Una falla en las señales externas que llegan o salen del contador produce una falla en los contadores.

La estructura del contenido de las consignas bajo falla asociadas a fallas provenientes de señales externas del contador tiene una casilla de descripción que indica la forma como se evidencia la falla. Después se presentan de forma paralela, las casillas de posible causa y posible solución en un orden de prioridad desde la causa más probable hasta la menos probable. Se agrega la casilla de Revisión de Planos para hacer un seguimiento de las señales externas y encontrar el punto de falla. Al final se agrega la casilla de Diagnóstico Preliminar donde se indica la conclusión a la que se llega después de realizar el seguimiento de planos y la totalidad de la consigna.

#### **3.3.2.5. Resultados**

La realización de las consignas bajo falla para el sistema de medida se basó en los planteamientos para la solución de las fallas no destructivas realizados en [35], pero efectuando las modificaciones necesarias para la operación de estos equipos. En [18] se encuentra la aplicación y las consignas para las subestaciones del CTE Oriente. Allí se realizaron consignas bajo falla para los equipos mencionados de las subestaciones eléctricas de ISA S.A. bajo la dirección del CTE Oriente, las cuales constituyen una herramienta ampliamente utilizada para el diagnóstico y control de fallas en los diferentes equipos del sistema de medida de una subestación. En este sentido ofrecen al operador de la subestación, las acciones que permiten responder de manera rápida y segura ante la ocurrencia de un evento o aparición de una alarma. De esta forma facilitan la recuperación de las condiciones normales de operación o dan un diagnóstico de la posible causa que origina la falla, de tal forma que sirven como parámetro de solución al grupo de mantenimiento especializado del CTE Oriente.

#### **3.3.3. FALLAS NO DESTRUCTIVAS EN EQUIPOS DE COMUNICACIONES**

Las redes de transmisión de energía eléctrica se han hecho más exigentes y complicadas, dadas las exigencias de calidad y la importancia del suministro para la economía, la tarea de operar con seguridad el sistema se ha vuelto más difícil. Sin embargo, el desarrollo de las comunicaciones ha posibilitado y facilitado esta labor. Por tanto, las comunicaciones

en el Sector Eléctrico juegan un papel importante, para garantizar la operación segura y confiable del Sistema interconectado.

La información necesaria para el planeamiento y la operación del Sistema Interconectado debe ser suministrada en forma rápida, precisa, en tiempo real y en el momento adecuado por todas las entidades que hacen parte del sistema, la generación, la transmisión y la distribución.

Los centros de control se encargan de supervisar, controlar y muchas veces operar los diversos elementos que conformar el sistema eléctrico. Esta labor se logra gracias a la información recibida en forma directa desde las subestaciones o plantas, utilizando un Sistema de Adquisición de Datos (SCADA). Las subestaciones o plantas envían la información necesaria a través de una RTU (Remote Terminal Unit, Unidad Terminal Remota), un Sistema de Control Digital –SCD o un sistema de datos equivalentes hacia los centros de supervisión a través de los equipos y medios de comunicación.

De igual manera, los sistemas de automatización de las subestaciones están basados en equipos de última tecnología que necesitan compartir funciones e información gracias a su capacidad de comunicación. Para ello utilizan las redes de comunicaciones locales las cuales pueden utilizar cables coaxiales, par trenzado o fibras ópticas o combinaciones de estos.

Las subestaciones del CTE Oriente cuentan con un esquema de redundancia de comunicaciones que le da confiabilidad al sistema utilizando como medios de comunicaciones entre subestaciones redes PLP (Portadora por Línea de Potencia), fibra óptica, satelitales y de microondas que se integran y complementan para ofrecer una red de banda ancha eficiente y confiable.

Por todas estas razones, se plantea la necesidad de disponer de procedimientos operativos que permitan la reacción de los asistentes de subestaciones ante fallas en los equipos de las subestaciones.

Los equipos de comunicaciones presentan sistemas de supervisión que cuando se activan, envían señales de alarmas al sistema de control de la subestación o indican las fallas a través de “leds” en el panel frontal del equipo. Los equipos para comunicaciones pueden ser a través de fibra óptica o a través de portadora por línea de potencia (PLP). Las alarmas pueden ser originadas por: falla en la alimentación del equipo, falla en el canal de voz, falla de emisión en el equipo de Teleprotección, falla en el “hardware” de los diferentes módulos que componen los equipos, lectura de los mensajes de error del equipo y fallas internas en los módulos, entre otras.

Para la realización de las estrategias de atención de fallas de estos equipos se formaron dos grupos de trabajo que realizaron los procedimientos operativos bajo falla e implementaran las metodologías de elaboración de consignas bajo falla, uno enfocado a los procedimientos operativos de equipos que utilizan fibra óptica y el otro a los equipos que utilizan PLP (Portadora por Línea de Potencia).

### 3.3.4. FALLAS NO DESTRUCTIVAS EN EQUIPOS DE TELECOMUNICACIONES PLP

El sistema PLP (o PLC del inglés Power Line Carrier) constituye un medio para la comunicación de voz, mediciones, impulsos de control, etc., de una estación a otra, utilizando como medio de comunicación las líneas de transmisión existentes, sin interferir con su función normal de transmitir energía eléctrica.

La justificación fundamental radica en la utilización de las líneas de energía eléctrica existentes para ganar confiabilidad, economía o características especiales. Las líneas de alta tensión están construidas de tal modo que se ven menos afectadas por los elementos que cualquier otro circuito.

El sistema de onda portadora está compuesto por los equipos de patio, como trampas de onda, condensadores de acople y unidades de acople, y por los equipos de la sala de control, como cable de alta frecuencia y equipo terminal PLP. La disposición de estos equipos se observa en la Figura 40.

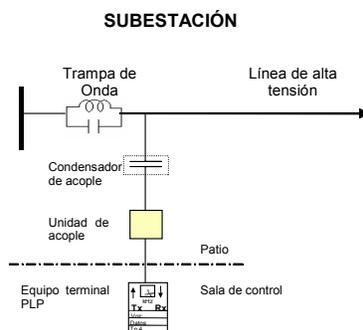


Figura 40: Esquema general del sistema de comunicaciones PLP

El equipo terminal PLP permite realizar una comunicación "full duplex": transmisión y recepción simultánea de señales del orden de cientos de kHz como voz, datos y teleprotección entre dos subestaciones. Su principal función en el lado transmisor es convertir la señal de baja frecuencia en alta frecuencia a partir de una doble modulación<sup>10</sup>, y realizar una amplificación de potencia de acuerdo con las características del sistema para la transmisión de la frecuencia portadora sobre la línea de alta tensión.

---

<sup>10</sup> Modulación. Proceso de conversión de frecuencias donde la señal de información se transpone a un rango de frecuencia más elevado para efectos de transmisión.

Uno de los aspectos de mayor importancia en un enlace de onda portadora es el acoplamiento realizado entre el equipo terminal PLP y la línea de alta tensión, tanto en el lado transmisor como en el receptor. Este acoplamiento se realiza a través de la unidad de acople y el divisor capacitivo de tensión (“transformador” utilizado en la medición y protección de línea, llamado comúnmente PT).

La unidad de acople tiene como función enlazar el cable coaxial proveniente del equipo PLP transmisor con el condensador de acople, y adaptar la impedancia entre la parte de baja tensión y la línea de alta tensión. A través del condensador de acople la potencia de la frecuencia portadora es inyectada a la línea de alta tensión.

Una vez inyectada la potencia de la señal portadora en la línea de alta tensión, se propaga sobre la misma, hasta llegar al otro extremo del enlace. Esta señal de alta frecuencia es recibida por la trampa de onda, cuya función es bloquear la frecuencia de transmisión y evitar que la información se pierda en la subestación.

La señal transmitida es tomada de la línea de alta tensión y acoplada al equipo terminal PLP a través del condensador y la unidad de acople. El equipo PLP en el lado receptor efectúa el proceso inverso, y la señal de baja frecuencia se obtiene a partir de una doble desmodulación (proceso inverso a la modulación).

#### **3.3.4.1. Trampas de Onda**

Son dispositivos que se conectan en serie en las líneas de alta tensión. Su impedancia debe ser despreciable a la frecuencia industrial (60 Hz) de tal forma que no perturbe la transmisión de energía, pero debe ser relativamente alta para cualquier banda de frecuencia utilizada para comunicación por PLP.

#### **Condensador de acople**

Denominado también divisor de tensión capacitivo. Es el elemento que permite inyectar la señal de alta frecuencia en la línea de alta tensión, por lo cual su impedancia debe ser mínima a las frecuencias portadoras, y debe ser elevada a la frecuencia del sistema de potencia (60 Hz).

#### **Unidad de acople**

Este dispositivo de acoplamiento va conectado, entre el terminal de baja tensión del condensador de acople y el terminal de salida del equipo PLP (cable coaxial). Su función es acoplar la impedancia del medio de transmisión (línea de alta potencia), con la impedancia de salida de la portadora, a través de un transformador de adaptación. Además permite proteger el equipo PLP de sobretensiones provenientes de la línea.

### **3.3.4.2. Cable de alta frecuencia**

Permite la conexión del equipo terminal PLP (localizado normalmente en la sala de control) y la unidad de acople (ubicada en el patio de la subestación). Estas líneas de conexión generalmente están constituidas por cable coaxial con impedancia de  $75\Omega$ , también se realizan enlaces con líneas de conexión de tipo balanceado (3 conductores) con impedancia característica de  $150\Omega$ , adicionalmente el conductor deberá tener buena robustez mecánica para soportar las difíciles condiciones ambientales de operación.

### **3.3.4.3. Equipo terminal PLP**

El sistema de onda portadora generalmente es implementado para transmisión de servicios tales como: voz corporativa, datos y señales de teleprotección sobre líneas de alta tensión entre dos subestaciones. El equipo terminal PLP (ver figura 31) es el soporte de transmisión del enlace, el cual efectúa todo el manejo de las señales de baja frecuencia para la transmisión y recepción de las mismas.

### **3.3.4.4. Consignas Bajo Falla para Equipos PLP**

Los equipos de telecomunicaciones PLP están instalados en algunas de las subestaciones bajo la dirección del CTE Oriente. Los equipos PLP tienen diferentes características según su marca. Estos equipos pueden presentar tres tipos de fallas: fallas asociadas al "hardware" del equipo, fallas asociadas al Sistema PLP y fallas asociadas al canal de Teleprotección y RTU.

#### **Fallas asociadas al "Hardware"**

Los equipos PLP están compuestos por una serie de módulos o tarjetas responsables de una parte del tratamiento de las señales que son transmitidas por el Sistema PLP. Dependiendo de la marca del equipo, existen LEDs que manifiestan este tipo de fallas.

La estructura del contenido de la consigna bajo falla asociada al "hardware" tiene una casilla de descripción que indica la forma como se evidencia la falla y el estado de los LEDs presentes en el equipo. Después se presentan de forma paralela, las casillas de posible causa y posible solución en un orden de prioridad desde la causa más probable hasta la menos probable. Al final se agrega la casilla de Diagnóstico Preliminar donde se da un reporte de la tarjeta o módulo del equipo en falla y en algunos casos se define la permanencia en operación del equipo.

## **Fallas asociadas al Sistema PLP**

Algunas fallas evidenciadas en los equipos PLP de una subestación dependen o se originan por una falla en el equipo PLP de otra subestación o en otro punto del Sistema de transmisión (canal).

La estructura del contenido de una consigna bajo falla asociada a una falla en el sistema PLP está formada por una casilla de descripción de la falla que explica la conformación del enlace de los equipos PLP donde se puede encontrar la causa de falla y se explica también la forma como se evidencia la misma. Después se presentan de forma paralela, las casillas de posible causa y posible solución en un orden de prioridad desde la causa más probable hasta la menos probable. Por último, se presenta la casilla de Diagnóstico Preliminar donde se reporta al Grupo de Telecomunicaciones de ISA-CTE Oriente la conclusión a la que se llega después de realizar la consigna y se transmite la orden para realizar el seguimiento de otra consigna bajo falla en la subestación donde es posible que esté el daño del sistema.

## **Fallas asociadas al canal de Teleprotección y RTU**

El Sistema PLP está encargado de transmitir los servicios de Teleprotección y los datos de la RTU en algunas subestaciones. Los equipos de cada subestación se configuran para determinar el canal por el cual son enviados estos servicios. Algunas fallas presentes en los equipos mencionados están relacionadas con una falla en el canal de comunicación. Por esta razón, se ha considerado la realización de las consignas bajo falla de los equipos de Teleprotección y RTU relacionadas con este tipo de falla.

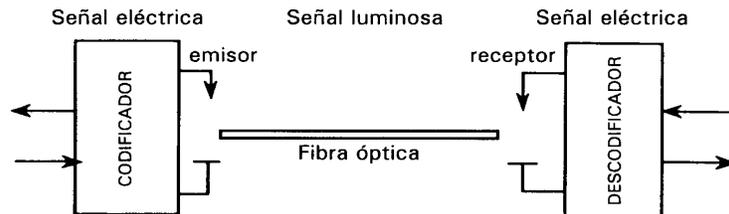
La estructura de las consignas bajo falla para los equipos de Teleprotección y RTU asociadas al canal de comunicación tiene una casilla de descripción que permite identificar la falla por medio del estado de los LEDs. Tienen las casillas de posible causa y posible solución en forma paralela, donde en algunos casos se concluye que la posible solución es pasar a realizar una consigna bajo falla del equipo PLP.

### **3.3.5. EQUIPOS DE COMUNICACIÓN POR FIBRA ÓPTICA**

En pocos años la fibra óptica se ha convertido en uno de los medios más avanzados para la transmisión de datos. Este novedoso sistema revolucionó los procesos de las telecomunicaciones en todos los aspectos: logró una mayor velocidad en la transmisión de información, disminuyó casi en su totalidad los ruidos y las interferencias, y multiplicó las formas de envío en comunicaciones y recepción por vía telefónica, entre otros.

### 3.3.5.1. Elementos principales en la comunicación por fibra óptica

Hay tres elementos principales en un sistema de comunicaciones por fibra óptica: el transmisor, la fibra y el receptor.



*Figura 41: Elementos principales en un sistema de comunicación por fibra óptica*

#### Transmisor

El transmisor es el generador de luz. Los circuitos eléctricos transmisores son llamados Conversores Electro-Ópticos ó circuito Emisor y están compuesto de:

- Conversor o Codificador, el cual convierte las señales eléctricas, analógicas o digitales, en señales ópticas.
- Circuito de unidades: controla la polarización eléctrica y su emisión de potencia.
- Fuente Luminosa: dispositivo emisor de luz, pudiendo ser de tipo LED o Láser.

#### Cable de fibra óptica

La fibra óptica debe tener capacidad para llevar los rayos de luz a una distancia razonable antes que una estación repetidora tenga que re-amplificar la señal. En algunos casos hay que usar varias estaciones repetidoras dependiendo de la distancia recorrida.

Para transmitir las señales ópticas por fibra óptica se utiliza un esquema de modulación de amplitud conocido como “on-off keying” (OOK), en el cual la ausencia de señal indica un cero lógico (“0s”) y la presencia del pulso de luz significa un uno lógico (“1s”)

Para establecer una comunicación entre dos equipos ópticos se requiere de dos fibras ópticas, una encargada de la parte de transmisión y la otra de la recepción.

#### Receptores Ópticos

Los receptores ópticos son los elementos encargados de detectar la señal luminosa y convertirla en una señal eléctrica. Un receptor aceptará solamente los rayos de luz que

tengan los niveles de potencia (en dB) para los cuales fue construido, si el nivel es excedido, el receptor se saturará y el equipo no dará ninguna señal de salida, y si la señal es muy débil el equipo no podrá detectar la presencia de señal lumínica y la salida de la señal eléctrica será nula.

Los elementos utilizados para cumplir esta función se llaman fotodetectores o fotodiodos y se utilizan de dos tipos: los diodos PIN y los de avalancha.

### **3.3.5.2. Equipos utilizados en un enlace con fibra óptica**

Los equipos utilizados en un enlace de fibra óptica se denominan equipos ópticos. Su función radica en convertir las señales eléctricas en señales ópticas y reconvertir las señales ópticas en señales eléctricas (proceso inverso) para su transmisión a través de la fibra óptica.

El equipo óptico está compuesto por convertidores de fibra óptica, repetidores y módems. Estos equipos son de diseño simple, de fácil instalación y de mantenimiento sencillo. En numerosos casos se requiere su conexión con otros equipos para formar un sistema más integrado.

#### **Módem óptico**

El módem (palabra tomada de los términos Modulador y Demodulador) es un equipo de diseño electrónico que se encarga de convertir las señales digitales en analógicas y viceversa. Un módem óptico convierte las señales eléctricas en impulsos de luz para ser transmitidos a través de la fibra óptica o realizar el proceso contrario (señal óptica a señal eléctrica).

Por su sencillez y versatilidad se utiliza en la mayoría de los enlaces de fibra óptica, además que son de bajo costo. Existen módems ópticos que tienen implementado la función de multiplexado, convirtiéndolo en un sistema muy funcional.

#### **Multiplexor óptico**

El multiplexor es un equipo que permite la conversión de varios canales en un solo canal (el módem sólo permite la conversión de un canal), es decir, este dispositivo reparte, según una ley fija en el tiempo, un único canal de comunicaciones (canal de salida) entre varios subcanales de entrada. La señal en el canal de salida equivaldrá a la suma de velocidades de los canales de entrada, teniendo en cuenta que el canal de salida no puede ser mayor a la capacidad de los canales de entrada.

El multiplexor permite incrementar el ancho de banda en la transmisión de información. Permite combinar señales de entrada con diferentes velocidades en una señal mayor, por ejemplo, 32 señales de 64 kbit/s se pueden agrupar en una de 2 Mbit/s.

La conversión de la señal de entrada con respecto a la de salida puede ser de eléctrica a eléctrica (un multiplexor común) o de eléctrica a óptica (multiplexor óptico).

El equipo que demodula la señal en el extremo remoto se denomina demultiplexor y su función es convertir la señal óptica en eléctrica (para el caso del multiplexor óptico) y encausarla de forma adecuada por el canal equivalente al de origen.

El uso de un multiplexor óptico permite la combinación de señales de diversas clases tales como voz, video y datos por una sola fibra óptica, reduciendo el número de fibras en un enlace, lo que significa una disminución en los costos cuando se tienen enlaces de gran longitud.

Los multiplexores son de costo considerable debido a la alta complejidad de su sistema.

### **Repetidor óptico**

Conforme la señal avanza por el medio va perdiendo fuerza hasta un punto en que su potencia es tan baja que no se puede seguir transmitiendo a una mayor distancia. Un repetidor de fibra es un dispositivo que le vuelve a dar potencia a la señal para seguir avanzando. Es aquel que toma una señal de luz, la convierte en señal eléctrica, la regenera y la coloca en un dispositivo de emisión de luz para que se siga propagando.

No existe una distancia fija para colocar un repetidor, todo depende del tipo de fibra, de la potencia de transmisión y del equipo receptor. Este valor puede llegar hasta cientos de kilómetros.

### **Amplificadores Ópticos**

Su función consiste en regenerar la señal óptica sin convertirla en señal eléctrica mediante generadores láser. Los átomos de Erbium contenidos en la fibra se excitan por medio de un diodo láser auxiliar que los «bombea» a un estado de energía superior, energía que puede ceder al desexcitarse para amplificar la señal debilitada que pasa por la fibra. De este modo la potencia de la señal óptica se multiplica en un factor que va de 100 a 10.000.

Los amplificadores ópticos se suelen conectar en los puntos donde se encuentran los equipos ópticos, con el fin de proporcionar un poderoso refuerzo para la transmisión óptica. También se localizan a mitad de camino de la instalación para obtener la

amplificación y el reforzamiento de las señales ópticas débiles a lo largo de las rutas de la fibra óptica.

### **3.3.5.3. Consignas para los equipos de comunicación conectados por fibra óptica**

La principal característica que poseen los procedimientos planteados en las consignas bajo falla de los equipos de comunicación por fibra, es el alto grado de compromiso que poseen con la mayoría de las variables y servicios de la subestación.

Estas consignas están enfocadas en dos tipos de fallas: las presentadas en los equipos de comunicación y las presentadas en los servicios del canal de comunicación.

La consigna de falla de los equipos de comunicaciones de fibra óptica está orientada a los diferentes equipos que conforman el sistema de comunicación y que participan en el enlace del canal de fibra óptica. Estos equipos son multiplexores, amplificadores, repetidores y módems.

Además, como existen diferentes tipos de equipos referentes a la marca fabricante, existen diferencias en el desarrollo de las consignas bajo fallas para equipos del mismo tipo.

El servicio más importante y al cual se prestó especial atención fué el de la transmisión de las señales de teleprotección, primordial en la protección de las líneas del sistema eléctrico. Las consignas también se enfocaron a algunas fallas presentadas en los canales de voz ofrecidos en las subestaciones. Servicios, tales como datos, están atendidos por entes especializados como lo es el CGT (Centro de Gestión de Telecomunicaciones), directo responsable en caso de fallas.

Las consignas operativas presentan de manera clara y sencilla un procedimiento para determinar las condiciones normales de los equipos de comunicación y de teleprotección disponibles en la subestación. Estas consignas se desarrollan para operación del equipo en condiciones normales de trabajo.

Las consignas informativas son documentos que sirven de guía rápida para comprender en forma general, sencilla y breve las características generales de los equipos bajo estudio. Estas consignas se desarrollaron con el fin de ampliar el conocimiento de los operadores acerca de los equipos de comunicación y teleprotección, para que puedan ejecutar los procesos de las consignas de una forma más clara y segura.

### **3.3.5.4. Eventos causantes de fallas**

Dentro de las principales razones de falla se encuentran:

## **Fallas en la red de alimentación**

Los equipos de comunicación, pueden presentar fallas por pérdidas o alteraciones en los niveles de tensión de la red de alimentación a la que pertenecen. Las acciones necesarias para corregir estos problemas involucran un estudio completo sobre el estado de la red y de los elementos que constituyen un factor de falla.

## **Falla por problemas en la fibra óptica**

El cable de fibra óptica puede sufrir deterioros en las fibras o ruptura del cable, entre otros, lo que puede causar atenuación de la señal o pérdida total de señal.

## **Fallas en el sistema modular de los equipos**

Los equipos de comunicación, como los multiplexores y amplificadores, tienen un diseño modular, es decir, están formados por varias tarjetas, de las cuales algunas están comprometidas con el funcionamiento total del equipo, mientras que otras son servicios agregados al equipo. De allí surge que, las fallas presentadas en estos equipos estén orientadas al equipo en general (tarjetas principales) o a algún módulo (tarjeta de agregados).

## **Problemas en las interfases**

Las interfases en los canales de comunicación, de control, de sincronismo y de servicios (datos, voz, teleprotección, etc.) pueden sufrir daños o alteraciones que se ven reflejadas en el funcionamiento del equipo, creando una situación de falla en el mismo.

## **Daños en el sistema de cómputo.**

Los equipos de comunicación poseen un sistema de cómputo que permite la operación sistemática del equipo (similar al sistema operativo en las computadoras tradicionales), y que puede sufrir fallas en el "hardware" y en el "software".

## **Fallas en el circuito regulador del equipo**

Existen circuitos internos en los equipos de comunicación por fibra óptica, que realizan la adecuación y conversión de las señales a niveles electrónicos tolerables por el equipo.

*Falla en otro equipo de la red.* Debido a que la red de comunicación está formada por el enlace de varios equipos, la falla en algunos de ellos puede afectar la red en su totalidad.

### **3.3.5.5. Resultados**

Los resultados logrados están dados en el mejoramiento de los procedimientos implementados en caso de presentarse anomalías o emergencias en los equipos de comunicación que utilizan como medio fibra óptica, y la aplicación efectiva de los lineamientos y metodología de desarrollo de estrategias de reestablecimiento de fallas no destructivas en los equipos de comunicaciones que utilizan como medio de comunicación fibra óptica.

Se reduce el tiempo de indisponibilidad de los equipos de comunicaciones por fibra óptica ocasionados por fallas que se pueden solucionar localmente con la intervención del asistente de subestaciones gracias al seguimiento de la consigna elaborada para este fin.

Las consignas bajo falla para equipos de comunicaciones por fibra óptica, permite la intervención del asistente de subestaciones en condiciones de falla, sin un conocimiento especializado en el tema.

### **3.3.6. FALLAS NO DESTRUCTIVAS EN EQUIPOS DE REGISTRO**

Las actuales normativas sobre la calidad en el suministro de energía, han creado en las empresas prestadoras del servicio, la necesidad de implementar equipos de alta tecnología, para desarrollar sistemas de monitorización, registro y análisis del comportamiento de cada una de las variables del sistema con el fin de identificar puntos donde la calidad de la energía es baja, solucionar el problema y dar así cumplimiento a las normas.

Dichos equipos van desde los tradicionales indicadores de aguja, pasando por los instrumentos digitales, hasta llegar a los analizadores de redes, de los cuales hace parte el Registrador de fallas y cuya función principal es registrar el comportamiento que presentan las variables más importantes del sistema eléctrico durante una perturbación. Los analistas del sistema eléctrico, desarrollan con base en la información capturada por los registradores, procedimientos que permiten controlar la calidad del suministro, corregir las fallas y elaborar consignas preventivas para garantizar la correcta prestación del servicio.

Dada la importancia que tienen los registradores de falla en el sistema eléctrico, es indispensable asegurar su continuo funcionamiento, diseñando mecanismos de recuperación como las consignas elaboradas en este proyecto.

El funcionamiento de un registrador de fallas consiste en vigilar de forma permanente el comportamiento de las señales analógicas y digitales que a él se conectan.

Las señales analógicas corresponden a las variables de tensión y corriente de las líneas de transmisión. Las señales digitales corresponden a los estados lógicos de las

protecciones, contactos de operación y posición de los interruptores, entre otros. Estas señales ingresan al registrador de fallas siguiendo varias etapas de transformación, muestreo y digitalización durante las cuales se realiza la adaptación para su posterior procesamiento.

El desempeño de cada señal analógica y digital es grabado en una memoria RAM cíclica, de manera que cuando alguna de ellas excede alguno de los rangos de operación permitidos por la configuración del registrador o cuando una señal externa lo indica, y este inicia el proceso de grabación del evento y creación de un archivo con información del comportamiento de las variables un tiempo antes, durante y después del evento o señal de disparo.

El registrador guarda el archivo creado en su disco duro, e informa a la central de control que se ha registrado un nuevo evento y que la información de ese evento está disponible para ser enviada. La transmisión de datos desde la unidad de adquisición hasta la estación de control se realiza por medio de una interfase de comunicación que varía en su tecnología dependiendo del tipo de registrador.

La información descargada se guarda en el disco duro de la estación de control y queda entonces disponible para su posterior análisis.

El estudio del comportamiento del sistema durante el evento, se realiza implementando un software especializado propio de la estación de visualización, el cual cuenta con herramientas gráficas que permiten representar de diferentes formas la información para facilitar la comprensión del fenómeno.

### **3.3.6.1. Consignas bajo falla de los equipos registradores de falla**

Aunque el formato de presentación de las consignas es el mismo que se explicó en el capítulo dos para las estrategias de atención de fallas no destructivas, las diferencias en el modelo de consigna de estos equipos hacen necesario que éste se modifique. Las diferencias radican en el tipo de fallas que pueden presentar, y en la relación de los procedimientos que deben ejecutarse para solucionarlas.

Estos procedimientos se llaman "*Procedimientos de Consignas*", las cuales son las acciones que deben aplicarse para la solución de fallas. A estos documentos es remitido el operador cuando está ejecutando la consigna y una vez el procedimiento es aplicado, se debe retornar a ella para continuar con el desarrollo de la misma. Estos documentos se anexan en la parte final de las consignas.

En este formato se observan tres diferencias con respecto al formato general de consignas: el título enuncia el nombre del procedimiento y no el nombre de la falla presentada en el equipo, la numeración en el código del procedimiento no va precedida de la letra F (falla) a diferencia del código de la consigna (por ejemplo PRV2-002-RFG

significa pérdida de disponibilidad del registrador TR-132 por memoria llena) y el contenido no incluye la división de *Causa* y *Solución*, sino el desarrollo del procedimiento.

Además de las consignas bajo fallas y de los procedimientos, se desarrollaron consignas informativas que, al igual que las de los equipos de comunicaciones, presentan una descripción general de los equipos registradores disponibles en las subestaciones.

A continuación se muestra un diagrama esquemático de las consignas elaboradas para los equipos registradores de fallas, donde se especifican los procedimientos, las consignas bajo falla, las consignas informativas y los eventos causantes de fallas.

### **3.3.6.2. Eventos causantes de fallas**

Las consignas realizadas para los equipos Registradores de falla, están diseñadas para superar fallas de tipo no destructivas. Dentro de las principales causas de fallas encontradas, y para las cuales se desarrollaron los procedimientos respectivos, se encuentran:

#### **Fallas en la red de alimentación**

Los equipos registradores de falla pueden presentar fallas cuando su fuente de alimentación se interrumpe o cambia a niveles de tensión fuera de su rango de trabajo. Corregir estos problemas involucra realizar un estudio detallado sobre el sistema de alimentación y cada uno de los elementos que en él participan.

#### **Daños en el canal de comunicación**

El canal de comunicación que enlaza los registradores de falla con la sala de control, posee diferentes tipos de interfases y en algunos casos se presentan varios elementos conversores de tecnología, que al presentar problemas pueden ser interpretados por el “software” de la estación como fallas en el equipo.

#### **Pérdida de sincronismo**

El sincronismo de los equipos registradores de fallas es de vital importancia para que la información tomada de sus lecturas exprese correctamente el tiempo de las variables del sistema durante las fallas del sistema. La pérdida de la señal de sincronismo, también puede provocar problemas con la comunicación entre los registradores de la red y la sala de control.

## **Fallas en la comunicación por cambios en la configuración**

Los valores dados en la configuración de los equipos definen aspectos como el modo de operación, los parámetros de comunicación y la jerarquía que estos equipos tienen en la red. Las modificaciones o variaciones en estos valores pueden provocar fallas en la comunicación con las estaciones de trabajo.

## **Daños en el sistema de interfases**

El registrador de fallas es un equipo que presenta diferentes tipos de puertos. Los daños en las conexiones de estos puertos, pueden provocar fallas en la lectura de datos.

## **Fallas en el circuito regulador del equipo**

Los registradores de falla, al igual que los equipos de comunicación por fibra óptica, poseen circuitos internos que se encargan de transformar la tensión de la señal de alimentación, y de las entradas analógicas y digitales, a niveles electrónicos adecuados para su tratamiento.

## **Fallas por “software”**

El “software” mediante el cual se realizan operaciones como comunicación, control y configuración de los registradores de falla, puede sufrir alteraciones en sus archivos que provocan el mal funcionamiento del sistema.

### **3.3.6.3. Resultados**

Como se ha visto, el sistema de registro de fallas, está compuesto por tecnología de punta, lo cual permite la realización de muchas funciones que facilitan a los operadores el seguimiento y estudio del sistema eléctrico. Sin embargo, esto ocasiona que muchas veces se necesiten la configuración y la operación de personal especializado. Esto se hace más crítico ante fallas en los equipos. Desde este punto de vista, los procedimientos o consignas bajo falla para estos equipos brindan la posibilidad de que el personal que se encuentre en las subestaciones pueda realizar los chequeos de primera instancia, o la restauración, si le es posible, garantizando la seguridad del equipo y del sistema y la integridad del personal que realiza estas labores.

El sistema de registro de fallas presenta alarmas de fallas visualizadas en los “led” indicadores de estados de los equipos. Estas alarmas son: falla alimentación y falla interna originada por falla del canal de comunicación, falla de comunicación entre el concentrador y alguna estación de adquisición de datos, falla de comunicación entre el

concentrador y el registrador de fallas enrutador del sistema de adquisición de datos, y falla en despliegue de las señales en proceso, entre otras.

Las consigas bajo falla y los procedimientos operativos que se realizaron para estos equipos posibilitan el reestablecimiento de las condiciones normales del sistema de registro de eventos de las subestaciones en primera instancia, o en su defecto detecta las causas de fallas y establece los parámetros guía a los grupos de mantenimiento especializado para que realicen su labor en un tiempo menor.

## **4. REPRESENTACIÓN Y MODELADO DEL CONOCIMIENTO PARA PLANES DE CONTINGENCIA**

### **4.1 INTRODUCCIÓN**

La importancia del conocimiento para la realización de una tarea o una acción en situaciones normales o en la solución de problemas, es fundamental. El conocimiento permite la organización y la representación de las leyes, las teorías, los conceptos, las ideas y los métodos de solución que posibilitan la realización de acciones racionales.

La representación del conocimiento por medio de un lenguaje de computador de fácil manejo tiene como objetivo manipular el conocimiento para asegurar el buen desempeño de los sistemas.

La manera de representar el conocimiento exige tener en cuenta criterios generales tales como: adecuación, eficiencia, claridad, transparencia, manejo de primitivas, facilidad para estructuración y representación y manejo de incompletitudes, entre otras. Estos criterios originan que unas formas de representar el conocimiento se adecuen mejor que otras a un conocimiento específico [14].

La representación y modelado de los planes de contingencia para la operación y control de las subestaciones exige la adquisición, el modelado y la representación del conocimiento de la operación y control de una subestación en condiciones normales y bajo falla (capítulos 1, 2 y 3).

Bajo condiciones de falla, el operador debe centrarse en la detección y aislamiento de la parte fallada. Las fallas pueden ser originadas por varias causas. El conocimiento de las causas y los procedimientos para verificación de la causa que la originó, es un requerimiento de la operación. Con esta información el operador puede determinar las posibles reparaciones o procedimientos para recobrar parcialmente el sistema, o elaborar reportes que disminuyan la incertidumbre sobre el origen y la magnitud de la falla optimizando las labores de los grupos especializados.

De manera general, los métodos y técnicas utilizadas para detectar las fallas de un sistema, pueden clasificarse de acuerdo con la naturaleza del conocimiento disponible sobre el proceso en cuestión en: Detección basada en métodos analíticos, detección basada en conocimiento, detección basada en modelos y detección basada en señales o síntomas (que dependen de la organización del conocimiento) [13].

En el caso de las subestaciones algunas de las fallas se pueden evidenciar mediante la activación de alarmas, por la inoperancia de equipos ante las órdenes de control, o por la

respuesta deficiente de las funciones de sus sistemas. Se puede decir que el método de detección de fallas en las subestaciones es la Detección Basada en Señales o Síntomas. En estos casos se necesita la adquisición el modelado y la representación del conocimiento del funcionamiento de una subestación en condiciones normales y anormales.

El conocimiento necesario para la detección de la falla y su causa se encuentra en los procedimientos o consignas bajo falla. Estos procedimientos posibilitan la reposición de los equipos, la recuperación de la operatividad, o el prediagnostico, y fueron expuestos en los capítulos anteriores. Sin embargo se debe presentar un planteamiento metodológico, que con los criterios de modelado del conocimiento, posibilite el enriquecimiento y manejo eficiente de los mismos.

En este capítulo se presenta el planteamiento metodológico y la manera de abordar el modelado y la representación del conocimiento de la operación de las subestaciones eléctricas. Para ello se comienza con la descripción de las técnicas de modelado de los sistemas diferentes a las convencionales, se continúa con la selección de una de estas técnicas y se finaliza con el planteamiento específico para el manejo del conocimiento de la operación de subestaciones.

## **4.2 TÉCNICAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL**

El esfuerzo en el análisis de los sistemas se ha enfocado en las metodologías para el desarrollo de modelos formales matemáticos los cuales vienen desde los campos de investigación de teoría de control y análisis numérico. Dentro de las principales metodologías para desarrollar modelos de los sistemas sin los formalismos matemáticos, se tienen los sistemas basados en el conocimiento, la lógica difusa, las redes neuronales, los algoritmos genéticos y el razonamiento basado en casos.

### **4.2.1. SISTEMAS BASADOS EN EL CONOCIMIENTO**

Una forma de sistemas basados en el conocimiento son los sistemas expertos. Un sistema experto captura el conocimiento de un experto en un área determinada lo implementa en una máquina, para proporcionar soporte a las decisiones en un nivel comparable al del experto humano, siendo capaz, adicionalmente, de justificar este razonamiento.

La estructura del sistema separa el mecanismo de inferencia del dominio específico de conocimiento, y utiliza una o más estructuras como reglas de producción, marcos, combinación de reglas y marcos, redes semánticas, objetos, entre otros para representar el conocimiento específico.

Mas adelante, en este capítulo, se presentan con más detalle, los sistemas basados en conocimientos pues se ajustan a los requerimientos y a la forma del conocimiento de los procedimientos operativos de las subestaciones eléctricas.

#### 4.2.2. SISTEMAS DIFUSOS (FUZZY)

Los sistemas difusos permiten el manejo de incertidumbre e imprecisión en la formulación y manejo de problemas que constituye un método para especificar que tan bien corresponde un objeto a una descripción.

Los elementos fundamentales de la teoría de sistemas difusos son los conjuntos difusos (ver Figura 42). Sobre ellos se pueden realizar operaciones, algunas de ellas semejantes a las que se realizan con los conjuntos clásicos lógicos.

Sea  $X$  un universo de discurso. Un conjunto difuso (fuzzy)  $A$  se define mediante su función de pertenencia:

$$\mu_A : X \rightarrow [0,1]$$

Así, dicho conjunto queda identificado mediante parejas de elementos

$$A = \{(x, \mu_A(x)) \mid x \in X\}$$

La forma específica de la función  $\mu_A$  depende de los objetivos del modelo fuzzy. Por ejemplo, puede ser continua lineal a trozos. Si  $\mu_A$  es la función característica de  $A$ , entonces  $A$  es un conjunto clásico. En la Figura 42, se presenta la función de pertenencia de un conjunto difuso, en ésta se establecen las relaciones de las entradas del mundo real con la valoración de pertenencia al conjunto.

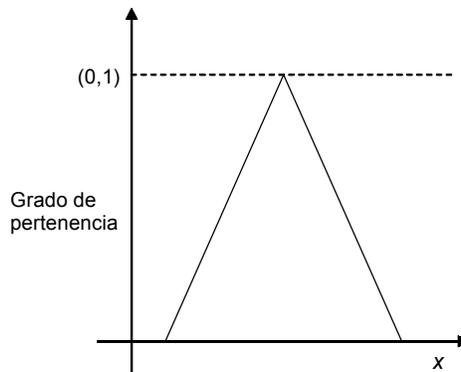


Figura 42: Conjunto difuso

La lógica difusa, está basada en combinaciones de conjuntos difusos mediante las operaciones de unión, intersección y complemento entre las funciones de pertenencia que caracterizan los conjuntos.

En el caso de la unión, la función de pertenencia del conjunto resultante se obtiene realizando la operación de suma lógica fuzzy entre los grados de pertenencia de cada posible elemento (x) a cada uno de los conjuntos. El resultado de la suma lógica fuzzy coincide con el mayor de los grados de pertenencia. En el caso de la intersección, se realiza el producto lógico o determinación del menor de los dos grados de pertenencia de un mismo elemento (x) a cada conjunto. Finalmente, la función de un conjunto complementario coincide con la función de no pertenencia al conjunto original [26]. En la Figura 43 se observan las operaciones para los conjuntos difusos.

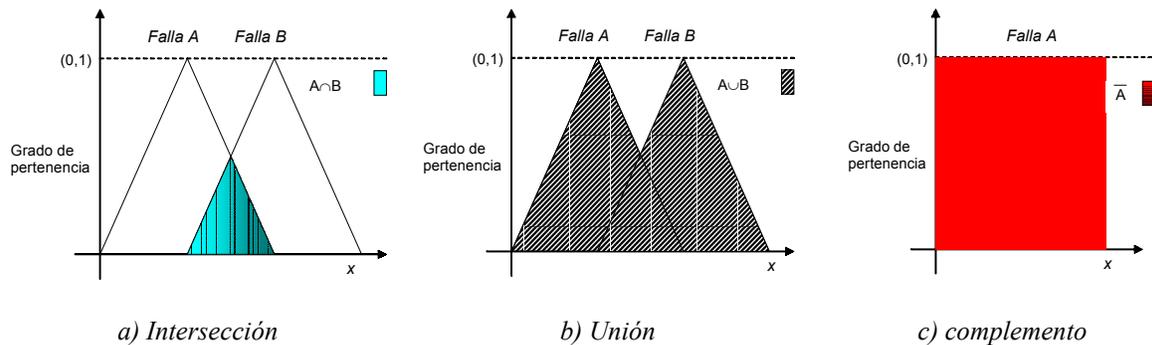


Figura 43: Conjuntos difusos para la activación de fallas en los sistemas de control.

El tratamiento de un problema mediante esta técnica de representación involucra las siguientes operaciones:

- Fuzzyficación: comprende la traducción de los valores del mundo real a valores difusos correspondientes a los conjuntos.
- Evaluación de las reglas: corresponde a la determinación de la fuerza de las reglas basada en los valores de entrada y las reglas.
- Defuzzyficación: se realiza la traducción de vuelta de los resultados difusos a valores del mundo real.

La lógica difusa ha tenido éxito en aplicaciones comerciales, especialmente en los sistemas de control de productos tales como transmisiones automáticas, trenes, videocámaras, y rasuradores eléctricos. Gracias a que sus bases de reglas son pequeñas, no hay encadenamiento de inferencia y tiene parámetros ajustables que permiten mejorar el desempeño del sistema.

Estos sistemas se pueden aplicar para representar las posibilidades de falla de los sistemas de control de los interruptores y seccionadores. Es decir que se pueden utilizar para la activación de las reglas que encadenarían las acciones de los sistemas basados en el conocimiento.

### 4.2.3. REDES NEURONALES

Una red neuronal es el intento de realizar una simulación computacional mediante la réplica en pequeña escala de los patrones que el cerebro humano desempeña para la formación de resultados a partir de los sucesos percibidos [26].

Concretamente, se trata de analizar y reproducir el mecanismo de aprendizaje y reconocimiento de sucesos que poseen los animales más evolucionados. Una de las preguntas más interesantes que se plantean al hablar de este tema es la habilidad del cerebro para poder reconocer patrones. Se denomina reconocimiento de patrones a la capacidad de interpretar una imagen compleja (una foto, lo que ve el ojo) y actuar en consecuencia. Las computadoras digitales fueron diseñadas a partir de una lógica binaria (de 2 valores 0 - 1 o Verdadero - Falso), lo cual si bien facilitó su construcción, ha tenido como efecto una gran dificultad para procesar y reconocer imágenes, fotos, planos y dibujos.

Las definiciones de redes neuronales enfatizan en las ideas de alta interconectividad de unidades, compuestas de elementos no lineales simples. La unidad funcional básica se muestra en la Figura 44.

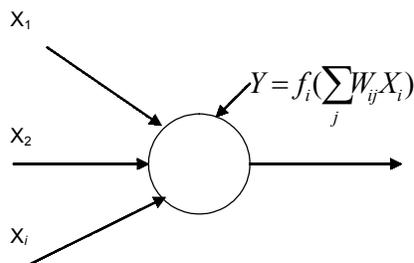


Figura 44: representación esquemática de una neurona

Las redes neuronales se categorizan por su arquitectura (número de capas), su topología (patrón de conectividad, “feedforward” o recurrente etc.) y su régimen de aprendizaje.

Las redes neuronales se muestran especialmente adaptables para la investigación científica de modelos matemáticos de variables no lineales. En estos modelos, los efectos de la interrelación mutua de las variables hacen que los intentos de solución mediante métodos algorítmicos resulten muy difíciles de realizar.

En el caso de los procedimientos operativos de subestaciones, las redes neuronales son poco útiles pues las características que se necesitan representar son específicas y el espacio de estados posibles de las subestaciones se puede identificar con otras técnicas.

#### 4.2.4. ALGORITMOS GENÉTICOS

Los Algoritmos Genéticos (GA) fueron desarrollados inspirándose en el proceso observado en la evolución de los seres vivos. Son métodos sistemáticos para la resolución de problemas de búsqueda y optimización que aplican a estos los mismos métodos de la evolución biológica: selección basada en la población, reproducción sexual y mutación.

Los algoritmos genéticos son métodos de optimización, que tratan de hallar  $(x_1, \dots, x_n)$  tales que  $F(x_1, \dots, x_n)$  sea máximo. En un algoritmo genético, tras parametrizar el problema en una serie de variables,  $(x_1, \dots, x_n)$  se codifican en un cromosoma. Todos los operadores utilizados por un algoritmo genético se aplicarán sobre estos cromosomas, o sobre poblaciones de ellos. En el algoritmo genético va implícito el método para resolver el problema; son sólo parámetros de tal método los que están codificados.

Hay que tener en cuenta que un algoritmo genético es independiente del problema. Los algoritmos genéticos establecen una analogía entre el conjunto de soluciones de un problema y el conjunto de individuos de una población natural, codificando la información de cada solución en un "string" (vector binario) a modo de cromosoma.

Las soluciones codificadas en un cromosoma compiten para ver cuál constituye la mejor solución (aunque no necesariamente la mejor de todas las soluciones posibles). El ambiente, constituido por las otras camaradas soluciones, ejercerá una presión selectiva sobre la población, de forma que sólo los mejor adaptados (aquellos que resuelvan mejor el problema) sobrevivan o leguen su material genético a las siguientes generaciones, igual que en la evolución de las especies. La diversidad genética se introduce mediante mutaciones y reproducción sexual.

Un algoritmo genético se utiliza habitualmente para optimizar sólo una función. Independientemente de lo sofisticado que pueda ser el diseño de un algoritmo genético. Para solucionar un problema mediante esta técnica se requiere definir los siguientes componentes [17]:

- Una representación, en términos de cromosomas de las configuraciones del problema a solucionar.
- Una manera de crear las configuraciones de la población inicial.
- Una función de evaluación que permita ordenar los cromosomas de acuerdo con la función objetivo.
- Operadores "genéticos" que permitan alterar la composición de los nuevos cromosomas generados por los padres durante la reproducción.
- Valores de los parámetros que el algoritmo genético usa (tamaño de la población, probabilidades asociadas con la aplicación de los operadores genéticos, etc.).

Por lo tanto, un algoritmo genético consiste en lo siguiente: hallar los parámetros que representan el problema, codificarlos en un cromosoma y aplicar los métodos de la evolución: selección y reproducción sexual con intercambio de información y alteraciones que generan diversidad.

Los algoritmos genéticos son utilizados para encontrar la solución óptima a problemas de optimización combinatoria de gran escala. Por esto, esta técnica de solución no es adecuada en el manejo del conocimiento de los procesos operativos de las subestaciones.

#### **4.2.5. RAZONAMIENTO BASADO EN CASOS (RBC)**

El razonamiento basado en casos es una manera de resolver problemas nuevos, adaptando soluciones que se han usado en casos viejos. Esta técnica de inteligencia artificial intenta llegar a la solución de nuevos problemas, de forma similar a como lo hacen los seres humanos. Cuando un individuo se enfrenta a un nuevo problema comienza por buscar en su memoria experiencias anteriores similares, establece semejanzas y diferencias, y combina las soluciones dadas para obtener una nueva solución. Este proceso es intuitivo y la persona lo realiza prácticamente sin darse cuenta. Una vez que la persona tiene situaciones anteriores similares a la actual, analiza las variantes en la nueva situación y da respuesta.

El RBC puede definirse como la generación de soluciones a problemas actuales sobre la base de planes pasados. El caso cuyas características se asemejen más a la situación actual, se selecciona mediante una métrica de similaridad [46].

El funcionamiento del RBC parte de estos principios y para ello comprende cuatro actividades principales [29].

- Recuperar los casos más parecidos.
- Reutilizar el o los casos, para tratar de resolver el nuevo problema.
- Revisar y adaptar la solución propuesta, en caso de ser necesario.
- Almacenar la nueva solución como parte de un nuevo caso.

Un nuevo problema se compara con los casos almacenados previamente en la base de casos y se recuperan uno o varios casos. Posteriormente se utiliza y evalúa una solución, sugerida por los casos que han sido seleccionados con anterioridad, para ver si se aplica al problema actual.

A menos que el caso recuperado sea igual al actual, la solución probablemente tendrá que ser revisada y adaptada, produciéndose un nuevo caso que será almacenado.

La elaboración de un sistema que emplea el RBC presenta dos problemas principales: el primero saber cómo almacenar la experiencia de tal forma que ésta pueda ser recuperada en forma adecuada y el segundo conseguir utilizar la experiencia previa en un problema actual.

La forma de representar y almacenar estas experiencias se realiza a través de casos. Un caso mantiene todos los atributos y características relevantes de un evento pasado. Estas características servirán como índices para la recuperación del caso futuro.

De acuerdo con la naturaleza del problema tratado se define la representación del caso, es decir, cuáles son los atributos importantes, qué problemas serán tratados, cuál es la solución propuesta, etc. Además es necesario definir el o los mecanismos de recuperación de casos.

### Estructura de los sistemas basados en casos

Un sistema de RBC posee una estructura simple: está conformado por seis componentes fundamentales, los cuales pueden ser complementados o distribuidos en más componentes, dependiendo de las necesidades del desarrollador u objetivos que el sistema necesite cumplir.

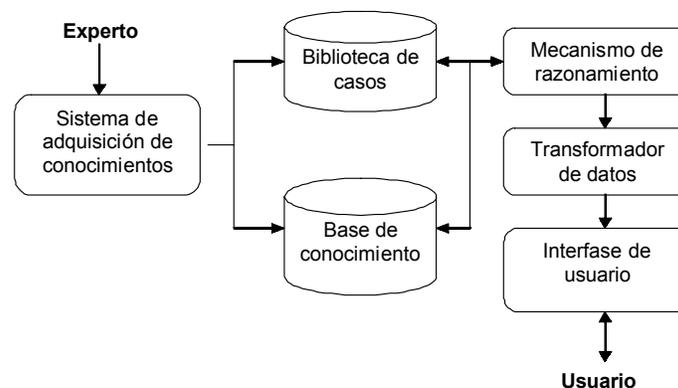


Figura 45: Estructura de los sistemas basados en casos

**Subsistema de Adquisición de Conocimientos:** Es el encargado de permitir al experto, agregar, eliminar o modificar datos de la base de casos y de la base de conocimiento.

**Interfase de usuario:** Realiza la comunicación entre el sistema de RBC y el usuario, para que éste ingrese los datos del problema a solucionar. Una vez que el sistema tenga la solución al problema, la Interfase Persona-Sistema es la encargada de mostrarla al usuario.

**Transformador de Datos:** Se encarga de tomar los datos de la interfase y pasarlos al Mecanismo de razonamiento, mediante un formato adecuado. Una vez que el Mecanismo de razonamiento tiene el resultado, el Transformador de Datos toma los datos y los pasa a la interfaz con un formato claro y sencillo para el usuario.

**Mecanismo de Razonamiento:** Cuando los datos se pasan al Mecanismo de Razonamiento, éste se encarga de realizar el razonamiento sobre la base de casos y la base de conocimiento para resolver el problema.

**Base de Conocimiento:** Contiene información general (teorías, principios, reglas tipo condición acción), que se activa al acceder ciertos casos. Además, en algunos sistemas donde se aprende del error, los errores se guardan en la base de conocimiento para evitar que en un futuro vuelvan a suceder. La base de conocimientos es muy importante, ya que todo sistema aprendiz debe tener conocimientos que le permitan comprender e interpretar nuevas experiencias. También, porque posee información sobre la estructura de datos usada por la base de casos, o sobre estructuras alternas que ayuden a procesos que se deben realizar sobre la base de casos.

**Base de Casos:** Debido a que el objetivo del RBC es solucionar problemas a partir de soluciones anteriores y aprender de ellos, la base de casos es la parte más importante de la estructura de un Sistema de RBC, por esta razón la siguiente sección estará dedicada a la base de caso.

El razonamiento basado en casos es útil para una gran variedad de aplicaciones, ya que en cada una de ellas, el recordar experiencias anteriores permite al razonador ser más rápido, eficiente y considerar múltiples restricciones. Algunas aplicaciones que se le pueden dar a este modelo de resolución de problemas son la clasificación, el diagnóstico, el diseño, la planificación, los problemas legales, la reingeniería redundante, el soporte técnico y la toma de decisiones.

Desde este punto de vista, las consignas bajo falla pueden ser tratadas como casos conocidos, para los cuales se tienen las soluciones, por tanto el razonamiento basado en casos se puede aplicar al conocimiento de operación de subestaciones y aprovechar las ventajas para el manejo de conocimiento. Sin embargo, el espacio de estados reducido y las consideraciones establecidas en la operación de subestaciones hacen que no sea tan ventajoso utilizar esta técnica.

### **4.3 CONOCIMIENTO Y ADQUISICIÓN DEL CONOCIMIENTO**

El conocimiento puede ser de tipo procedimental, declarativo o heurístico. Conocimiento procedimental es aquel conocimiento compilado que se refiere a la forma de realizar una cierta tarea (el saber cómo hacerlo). Por ejemplo, los pasos necesarios para la realización de una operación en una subestación son expresados como conocimiento procedimental.

Por otro lado, el conocimiento declarativo es conocimiento pasivo, expresado como sentencias acerca de los hechos del mundo que nos rodea (el saber qué hacer). El estado de los interruptores es un ejemplo de conocimiento declarativo. Tales tipos de datos son piezas explícitas de conocimiento independiente.

El conocimiento heurístico es un tipo especial de conocimiento usado por los humanos para resolver problemas complejos. Se entiende por heurístico a un criterio, estrategia, método o truco utilizado para simplificar la solución de problemas. El conocimiento heurístico usualmente se lo adquiere a través de mucha experiencia.

La adquisición del conocimiento corresponde a la interacción entre el ingeniero del conocimiento y el área de conocimiento específico. En la operación y control de los sistemas de las subestaciones el conocimiento debe ser adquirido del sistema o proceso y de la experiencia del personal a cargo. Los procedimientos operativos normales son dados en la etapa de diseño del sistema y se encuentran registrados en las consignas operativas (se presentaron en los capítulos anteriores).

La detección y aislamiento de las fallas se pueden realizar mediante técnicas o métodos que pueden clasificarse de acuerdo con la naturaleza del conocimiento disponible sobre el proceso en:

- Detección basada en métodos analíticos: utiliza herramientas matemáticas o analíticas (modelo matemático preciso procesado de señales), para realizar sus funciones.
- Detección basada en conocimiento: incluye herramientas de la inteligencia artificial. Por ejemplo representación simbólica de señales, o modelos cualitativos con imprecisión o incertidumbre.

Del mismo modo, dependiendo de la organización del conocimiento se distingue entre:

- Detección basada en modelos: los fallos son detectados a partir de la comparación del funcionamiento supervisado con el de un modelo en funcionamiento normal.
- Detección basada en señales o síntomas: en este caso los fallos se detectan a partir de las señales procedentes del proceso.

El conocimiento requerido para la detección y la atención de fallas de las subestaciones se encuentra registrado en las consignas bajo falla que se centra en métodos de detección basados en conocimientos, en síntomas y en señales.

#### **4.3.1. SISTEMAS EXPERTOS Y SISTEMAS BASADOS EN CONOCIMIENTO**

La mayoría de los científicos plantean que uno de los objetivos de la inteligencia artificial es tratar de simular comportamientos humanos ya sea en el análisis de información o en la forma de almacenar el conocimiento específico que un experto tiene de un dominio

determinado. La necesidad de representar y usar el conocimiento de los expertos ha hecho que ciencias como la informática, la psicología y la pedagogía se unan y enfoquen sus esfuerzos hacia el desarrollo de sistemas computacionales (“hardware” y “software”) que simulen el conocimiento y la forma de actuar de los expertos. Dentro de estos sistemas se tienen los "sistemas expertos" y los “sistemas basados en conocimiento”; con más exactitud se puede decir que un “sistema experto” es aquel capaz de contener el conocimiento de un especialista en un campo específico, y a su vez, de contener los mecanismos y/o herramientas necesarias para dar solución a problemas del mismo campo mediante técnicas como la inducción-deducción lógica. Con la aplicación de técnicas de Inteligencia Artificial finaliza la transición del procesamiento de datos al procesamiento de conocimientos.

Los “sistemas basados en conocimiento” son un tipo de “software” que a través de la representación explícita del conocimiento de un área de competencia específica, dan soluciones a problemas a través de la utilización de mecanismos de razonamiento lógicos.

Los sistemas expertos son sistemas informáticos que incorporan una componente basada en el conocimiento, que se obtiene a partir de la habilidad de un experto humano, de forma que el sistema puede dar consejos o tomar decisiones inteligentes, y sea capaz de justificarlas o explicarlas.

Los Sistemas Expertos se basan en conocimiento que comprende las siguientes capacidades:

- Utilización de normas o estructuras que contengan conocimientos y experiencias de expertos.
- Deducción lógica de conclusiones.
- Capacidad de interpretar datos ambiguos.
- Manipulación de conocimientos afectados por valores de probabilidad.

Las consignas operativas y en general la operación de subestaciones, contiene conocimiento declarativo, procedimental y heurístico; y las fallas o averías son detectadas utilizando métodos basados en conocimientos, síntomas y señales (según lo expuesto en los capítulos anteriores). Por tanto de las técnicas que más se ajustan para abordar el modelado y la representación del conocimiento de esta área son los sistemas basados en conocimiento o los sistemas expertos, puesto que se ajustan en mayor proporción para el manejo de las consignas y el proceso de operación de las subestaciones.

#### **4.3.1.1. Estructura de los sistemas basados en conocimiento.**

Los sistemas basados en el conocimiento buscan formas de representación y gestión de información similar al conocimiento y razonamiento de las personas. La estructura básica de un sistema basado en el conocimiento se presenta en la Figura 46.

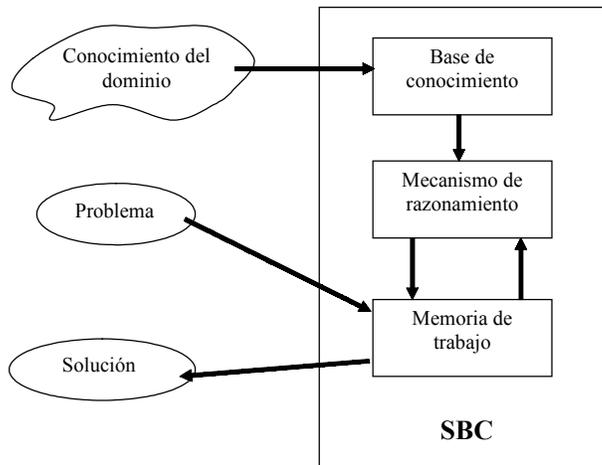


Figura 46: Estructura de los sistemas basados en el conocimiento.

### La base de conocimientos

La Base de Conocimientos de un Sistema Experto contiene el conocimiento de los hechos y de las experiencias de los expertos en un dominio determinado.

La base de conocimientos dispone de reglas. Estas reglas se representan en forma de:

*Si premisas<sup>11</sup> Entonces Conclusión y/o Acción*

En la zona de las premisas se solicitan vinculaciones lógicas referentes a las cualidades de los objetos.

En la zona de la conclusión se añaden nuevos hechos y cualidades a la base de conocimientos y/o se ejecutan acciones. Esto se define a menudo como programación orientada a reglas.

### El mecanismo de razonamiento o inferencia

El Mecanismo de Inferencia de un Sistema Experto puede simular la estrategia de solución de un experto. Es la unidad lógica con la que se extraen conclusiones de la base de conocimientos, según un método fijo de solución de problemas que está configurado imitando el procedimiento humano de los expertos para solucionar problemas.

---

<sup>11</sup> Las premisas son los hechos que se encuentran en la base de conocimiento.

Una conclusión se produce mediante aplicación de las reglas sobre los hechos presentes.

Ejemplo: Una Regla es:

*Si  $p$  y  $q$  entonces  $r$*

$p$  y  $q$  son las condiciones para la aplicabilidad de la regla. Aplicar la regla es: deducir de los hechos  $p$  y  $q$  el hecho  $r$ .

En un Sistema basado en el conocimiento existirá un hecho, sólo cuando esté contenido en la base de conocimientos.

Los hechos contenidos en la cláusula "si" se llaman premisas, y el contenido en la cláusula "entonces" se llama conclusión. Cuando se aplica una regla sobre algunos hechos se dice que se dispara. El disparo de una regla provoca la inserción del nuevo hecho en la base de conocimientos.

Las funciones del mecanismo de inferencia son:

- Determinación de las acciones que tendrán lugar, el orden en que lo harán y la forma como lo harán entre las partes del Sistema Experto.
- Determinación del cómo y del cuándo se procesarán las reglas, y dado el caso, también la elección de qué reglas deberán procesarse.
- Control del diálogo con el usuario.
- Decisión sobre los mecanismos de procesamiento de reglas, es decir, qué estrategias de búsqueda se implementarán. Esto es de vital importancia para la efectividad del sistema en su conjunto.

Ante problemas o clases de problemas distintos se estructuran, como es lógico, diferentes mecanismos de inferencia. El mecanismo de inferencia debe estar "adaptado" al problema a solucionar. Un depósito de dinero exige, bajo ciertas circunstancias, una estrategia distinta de procesamiento del conocimiento que un diagnóstico de fallos de máquina.

### **La interfase de usuario**

La Interfase de Usuario sirve para que éste pueda realizar una consulta en un lenguaje lo más natural posible. Es la forma en la que el sistema se presentará ante el usuario. Los requisitos o características más relevantes de la interfase son cuatro:

- El aprendizaje del manejo debe ser rápido.
- Debe evitarse en lo posible la entrada de datos errónea.

- Los resultados deben presentarse en una forma clara para el usuario.
- Las preguntas y explicaciones deben ser comprensibles.

#### 4.3.2. LENGUAJES DE PROGRAMACIÓN DE SISTEMAS EXPERTOS

La inteligencia artificial es un conjunto de métodos y filosofía que no está atada a un lenguaje en particular. Los problemas de IA requieren que los programas manipulen conocimiento en lugar de números.

Los lenguajes de programación y herramientas de sistemas expertos se pueden presentar en un rango continuo desde los lenguajes de programación más flexibles y de propósito general hasta los programas de diagnóstico más específicos. En la Figura 47 se muestran algunas herramientas y programas utilizados en la elaboración de sistemas expertos, por ejemplo "Test Bench" es un sistema experto desarrollado específicamente para el diagnóstico de sistemas.

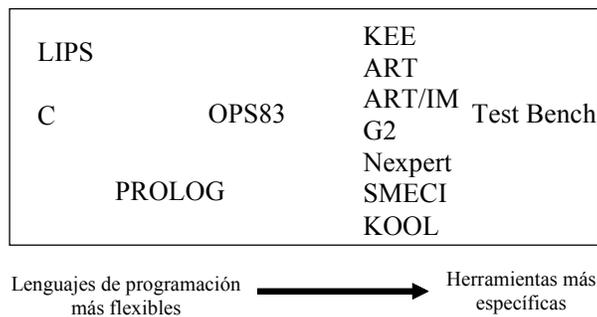


Figura 47: Software para sistemas expertos: lenguajes Vs herramientas.

##### 4.3.2.1. Lisp

El nombre LISP es la abreviatura de List-Processing ya que Lisp fue desarrollado para procesamiento de listas; la lista es la estructura más importante de Lisp. Fue creado por McCarthy (MIT) en los '60. Es un lenguaje de propósito general, procedural, basado en aritmética y manipulación de símbolos. Lisp usa datos de entrada, y una función Lisp específica para obtener los resultados. La programación en términos de relaciones entre símbolos se denomina programación simbólica, dado que el conocimiento consiste de símbolos y asociaciones entre ellos, Lisp resulta uno de los lenguajes más convenientes en aplicaciones de inteligencia artificial.

En Lisp se dan los siguientes conceptos característicos:

- Listas y Átomos: La estructura más importante es la lista. Los átomos pueden subordinarse a cualidades.

- La Función: Cada función Lisp y cada programa Lisp tienen estructura de lista. Los programas no pueden distinguirse sintácticamente de los datos. LISP ofrece sus propias funciones básicas.
- Forma de Trabajo: Lisp es un lenguaje funcional. Ofrece la posibilidad de realizar definiciones recursivas de funciones. La unión de procedimientos se realiza de forma dinámica, es decir en plena ejecución. El sistema realiza automáticamente una gestión dinámica de memoria.

La estructura más importante en Lisp es la lista, y la lista está compuesta por átomos, por ejemplo:

*(A (B C) D) es una lista con tres elementos:*

*A átomo*

*(B C) lista de átomos B y C*

*D átomo*

*También se permite una lista vacía, "()" ó "NIL", que significa lo mismo.*

Con esta estructura se pueden configurar estructuras de cualquier complejidad.

Los átomos pueden ser números, cadenas de caracteres o símbolos. Un símbolo puede tener varios valores, al igual que una variable en otros lenguajes de programación, como por ejemplo un número, el nombre de una función, ambos. Además a un símbolo pueden subordinarse cualidades, que además del valor del símbolo, contienen información adicional. Estas cualidades también reciben el nombre de atributos.

### **Componentes de un sistema Lisp**

Un componente importante de un sistema Lisp es la gestión dinámica de la memoria. El sistema administrará la memoria sin que el usuario lo deba solicitar. Libera los espacios de memoria que ya no son necesarios y los pone a disposición para usos posteriores. La necesidad de este proceso se deriva de la estructura básica de Lisp, las listas, que se modifican de forma dinámica e ilimitada.

Además un sistema Lisp abarca más espacio que el solo intérprete del lenguaje Lisp. Consta de algunos módulos que ofrecen ayuda en el desarrollo y control del progreso en programas, como son el Editor, el "File-System" y el Trace. Por supuesto estos módulos sólo están en versiones de LISP que contienen interfase gráfica, IDE típica de los lenguajes visuales (IDE = entorno de desarrollo integrado).

La idea principal de Lisp es la programación simbólica que permite la manipulación de objetos mediante su asignación o representación mediante símbolos. En contraste con otros lenguajes de programación que se concentran en el cálculo numérico. Esta característica lo convierte en una herramienta que permite el manejo de conocimiento más fácil que otros programas de computación.

#### **4.3.2.2. Prolog**

Prolog es la abreviatura de programación lógica, con lo que se hace mención a la procedencia del lenguaje: Es una realización de lógica de predicados, como lenguaje de programación.

Estos predicados aparecen en tres formas distintas: como hechos, como reglas y como preguntas. La lógica formulada como hechos y reglas se define como base de conocimientos. A esta base de conocimientos se le pueden formular preguntas.

Los mecanismos importantes del Prolog son: recursividad, instanciación, verificación, unificación, "backtracking" e inversión.

La Recursividad representa la estructura más importante en el desarrollo del programa. En la sintaxis del Prolog no existen los bucles "for" ni los saltos; los bucles "while" son de difícil incorporación, ya que las variables sólo pueden unificarse una sola vez. La recursión es más apropiada que otras estructuras de desarrollo para procesar estructuras de datos recursivas como son las listas y se destacan en estos casos por una representación más sencilla y de mayor claridad.

La instanciación es la unión de una variable a una constante o estructura. La variable ligada se comporta luego como una constante.

La Verificación es el intento de derivar la estructura a comprobar de una pregunta desde la base de conocimientos, es decir, desde los hechos y reglas. Si es posible, la estructura es verdadera, en caso contrario es falsa.

La Unificación es el componente principal de la verificación de estructuras. Una estructura estará comprobada cuando puede ser unificada con un hecho, o cuando puede unificarse con la cabecera de una regla y las estructuras del cuerpo de dicha regla pueden ser verificadas.

Los sistemas de programación Prolog y Lisp sirven como herramientas para crear programas que pueden solucionar los problemas de una manera diferente, a través del manejo de datos diferentes a los numéricos utilizando para esto representaciones simbólicas o a través del procesamiento lógico. Por otro lado el estudio y comprensión de estos programas permitió la comprensión de la mecánica que se utiliza para el procesamiento de datos no numéricos posibilitando el desarrollo del sistema basado en conocimientos en otros sistemas de programación.

#### 4.4 REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO

La representación del conocimiento constituye una de las máximas prioridades de la investigación en IA puesto que representa la piedra angular de un sistema o agente inteligente. Lo que se busca en la representación del conocimiento es poder representarlo abstractamente y utilizarlo para apoyar el proceso de razonamiento. Una representación del conocimiento puede ser un esquema o dispositivo utilizado para capturar los elementos esenciales del dominio de un problema. Una representación manipulable es aquella que facilita la computación. En representaciones manipulables, la información es accesible a otras entidades que usan la representación como parte de un cálculo.

La idea de representar el conocimiento implica simbolizar las complejas estructuras de información con el objetivo de apoyar el proceso de razonamiento. La representación del conocimiento abarca:

- La estructura: empleada para describir los elementos del conocimiento y el proceso interpretativo.
- El Proceso Interpretativo: que se requiere para emplear el conocimiento descrito.

Existen muchas formas diferentes de representar el conocimiento en IA, pero la característica común a todas las representaciones es que tienen en cuenta dos tipos de entidades:

- Hechos ó verdades en un cierto mundo: Lo que se desea representarse.
- Representaciones de los hechos en un determinado formalismo: Lo que realmente se es capaz de manipular.

Se pueden clasificar estos tipos de entidades en dos niveles:

- Del conocimiento: se describen los hechos (contiene el comportamiento y objetivos de cada agente).
- Simbólico: se describen los objetos del nivel del conocimiento en términos de símbolos manipulables por programas.

Los modelos de representación actuales son los resultados de investigaciones y análisis empíricos antes que de consideraciones filosóficas. En los modelos de representación actuales no existe una técnica de representación universal considerada la mejor. Todo depende del área de aplicación. Sin embargo es posible evaluar los esquemas de representación según ciertos criterios generales, que se resumen en la Tabla 1 [43].

Criterio	Definición
Transparencia	Hasta qué punto podemos identificar fácilmente el conocimiento

	almacenado.
Claridad	Hasta qué punto el conocimiento se puede representar directamente.
Naturalidad	Hasta qué punto el conocimiento se puede representar en su forma original.
Eficiencia	Facilidad relativa con la cual se puede acceder a conocimientos específicos durante la ejecución.
Adecuación	Hasta qué punto una estructura dada se puede emplear para representar todos los conocimientos que requiere el sistema.
Modularidad	Hasta qué punto los fragmentos de conocimiento se pueden almacenar independientemente uno del otro.

*Tabla 1: Criterios generales de evaluación de Técnicas de Representación del Conocimiento[43]*

#### **4.4.1. ESQUEMAS DE REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO**

La clasificación clásica de los esquemas de representación del conocimiento establece dos formas: declarativa y procedimental, puesto que el conocimiento que se aplica para resolver un determinado tipo de problemas puede expresarse en estas formas.

Las formas básicas de la representación declarativa son las reglas, las cláusulas, los marcos y las restricciones. Una representación declarativa del conocimiento se diferencia de una representación procedimental en que en la primera se especifica el conocimiento de forma independiente a su uso posterior. Sin embargo se verá que asociada a cada forma de representación se dispone de formas de manipulación específicas.

##### **4.4.1.1. Esquemas declarativos**

La forma más básica de representación declarativa consiste en la descripción de los objetos de un dominio con base en las propiedades y relaciones entre los objetos. Esta es la forma de representación que subyace, en las bases de datos relacionales. Sin embargo el modo de inferencia aportado es muy básico (búsqueda en las tablas en las que se representan las relaciones), aunque hacen posible inferencias más complejas, al incorporar otro tipo de formas.

Los formalismos basados en la lógica de predicados permiten combinaciones de propiedades y relaciones entre los objetos de un dominio. De hecho existe una versión de reglas lógicas que aportan un nivel de formalización superior al de las reglas implicativas no lógicas pero menor que las cláusulas del formalismo lógico.

Ciertos valores de los atributos son conocidos en el momento de la formalización del conocimiento, pero hay dominios en los que de forma natural esto no ocurre sino que sólo se conocen algunas de sus características como puede ser el rango de estos valores, restricciones sobre sus valores posibles a partir de otros valores (por ejemplo la edad de una persona no puede ser un número mayor que la de su padre) o formas de calcular esos valores cuando son necesarios. Además puede darse el caso que ciertos valores de

un atributo provoquen acciones o efectos sobre otro conocimiento. La formalización con base en restricciones aporta mecanismos para el tratamiento de estos casos.

Otras formas de representación del conocimiento exigen la utilización de vocabularios predefinidos de primitivas de representación (de bajo nivel) que restringen la libertad de la representación presente en cualquiera de los otros formalismos. Existen variadas razones en contra de este tipo de representación pero en determinados dominios son una solución computable válida.

### **Lógica como lenguaje de representación**

A través de la historia el hombre se ha preguntado sobre la capacidad que posee y que lo diferencia de las demás especies, y gracias a ésta posee la habilidad de interrogarse respecto del medio donde vive, del porque de las cosas y del porque de su existencia. Con el manejo de esa capacidad le es posible la creación y el manejo de conceptos e ideas.

La lógica (estudio de las leyes del pensamiento y simulación de la operación de la mente) en gran parte ha logrado que máquinas realicen funciones que hace algunos años no se imaginaban y se pensaba que, únicamente, eran posibles de realizar por personas. Hoy día la lógica está inmersa en todas las actividades humanas, y en especial en las que compete a las computadoras.

Al tratar de utilizar la lógica como lenguaje de representación en el diseño de sistemas basados en el conocimiento se encuentran con algunas dificultades:

Para algunas aplicaciones es “demasiado expresivo”. El problema no está en el lenguaje en sí, porque siempre se puede prescindir de lo que para la aplicación no sea necesario. Así, si la formalización de la aplicación no requiere mayor poder expresivo que el de la lógica de proposiciones, basta con que no se utilicen variables; si necesita poder expresar propiedades de objetos pero no relaciones entre objetos, basta con que sólo se utilicen predicados monódicos. El problema es que los algoritmos de inferencia para el caso general son complejos y hay ciertos tipos de problemas en los que resulta suficiente un lenguaje intermedio entre la lógica de proposiciones y la de predicados, con algoritmos más sencillos.

Para otras aplicaciones, sin embargo, “se queda corto”. Existen extensiones de la lógica de predicados, elaboradas para modelar tipos de razonamiento que no caben en su marco. Cuando se aborda una de esas aplicaciones y se analiza su ontología y el tipo de razonamiento que se necesita es frecuente que pueda servir como modelo una de esas extensiones o una combinación de ellas. Pero aquí el problema mencionado más arriba sobre la complejidad, se agudiza. Por ello se han ideado diversos mecanismos (la mayoría de naturaleza heurística) para problemas de modelado que suelen aparecer en las aplicaciones.

## Sintaxis de la Lógica Propositiva

La sintaxis de la lógica propositiva es sencilla. Los símbolos utilizados son las constantes lógicas *Verdadero* y *Falso*, símbolos de proposiciones tales como  $P$  y  $Q$ , los conectivos  $\wedge$ ,  $\vee$ ,  $\Leftrightarrow$ ,  $\Rightarrow$ ,  $\neg$  y paréntesis  $()$ . En la Tabla 2 se presentan los signos junto a una breve explicación de cada uno [43].

Todas las oraciones se forman combinando los signos anteriores mediante las siguientes reglas:

- Las constantes lógicas *verdaderas* y *falsas* constituyen oraciones en sí mismas.
- Un símbolo propositivo tal como  $P$  ó  $Q$  es una oración en sí mismo.
- Encerrar entre paréntesis una oración produce también una oración, por ejemplo  $(P \wedge Q)$ .

Signo	Significado	Explicación
$\wedge$	y	A la oración cuyo conector principal es $\wedge$ como en $P \wedge (Q \vee R)$ se le denomina <b>conjunción</b> (lógica); a sus partes se les llama conjuntos. (El $\wedge$ se parece a la “A” de “Adición”).
$\vee$	o	En una oración donde aparece $\vee$ , como en $A \vee (P \wedge Q)$ se le denomina <b>disyunción</b> de $A$ y $(P \wedge Q)$ . (Históricamente, $\vee$ se originó de la palabra latina “vel” que significa “o”. Para la mayoría de las personas es más fácil recordarla como una “V” de “Victoria”.)
$\Rightarrow$	Implica	Una oración como $(P \wedge Q) \Rightarrow R$ se conoce como <b>implicación</b> (o condicional). Su premisa o antecedente es $P \wedge Q$ y su conclusión o consecuente es $R$ . A las implicaciones también se les conoce como reglas o aseveraciones si-entonces. El símbolo de implicación a veces se escribe en otros libros $\supset$ como $\rightarrow$ .
$\Leftrightarrow$	Equivalente	La oración es una <b>equivalencia</b> (también conocida como bicondicional).
$\neg$	No	A una oración como por ejemplo $\neg P$ se le conoce como <b>negación</b> de $P$ . Los demás conectores combinan dos oraciones en una sola; $\neg$ es el único de los conectores que funciona en una oración.

Tabla 2: Sintaxis de la lógica propositiva

## Semántica de la Lógica Propositiva

La semántica de la lógica propositiva también es bastante sencilla. Se define especificando la interpretación de los signos de proposición y de las constantes y especificando el significado de los conectores lógicos [43].

Una proposición significa lo que se desee. P podría interpretarse como que París es la capital de Francia o que el Wumpus está muerto. Las oraciones que contienen solo un signo de proposición son satisfacibles pero no válidas: son verdaderas sólo cuando el hecho al que aluden es relevante en un momento dado. En el caso de las constates lógicas no hay opción: la oración *Verdadero* siempre quiere decir aquello que sucede en la realidad: el hecho de la verdad. La oración *Falso* siempre quiere decir aquello que no existe en el mundo.

El significado de una oración compleja se obtiene del significado de cada una de sus partes. Se puede considerar que cada conector es una función. Una manera de definir una función es construir una tabla mediante la que se obtenga el valor de salida de todos los valores de entrada posibles. A este tipo de tablas se les conoce como tablas de verdad. La Tabla 3 es una tabla de verdad de los conectores lógicos.

P	Q	$\neg p$	$P \wedge Q$	$P \vee Q$	$P \Rightarrow Q$	$P \Leftrightarrow Q$
Falso	Falso	Verdadero	Falso	Falso	Verdadero	Verdadero
Falso	Verdadero	Verdadero	Falso	Verdadero	Verdadero	Falso
Verdadero	Falso	Falso	Falso	Verdadero	Falso	Falso
Verdadero	Verdadero	Falso	Verdadero	Verdadero	Verdadero	Verdadero

Tabla 3: Tabla de verdad proposicional

### Validez e Inferencia de la Lógica Propositiva

La inferencia es el procedimiento mediante el cual se obtienen nuevas oraciones a partir de otras previas. El diseño de procedimientos de inferencia confiables, mediante los que se obtienen conclusiones verdaderas a partir de premisas verdaderas requiere gran esfuerzo en los programas. Una oración verdadera, en todos los mundos, bajo todas las interpretaciones, es válida. Cuando es posible demostrar que una oración de implicación es válida, su conclusión se puede obtener si se conoce su premisa. Es fundamental la capacidad para mostrar la validez independientemente del significado.

Las tablas de verdad sirven no sólo para definir los conectores, sino también para probar la validez de las oraciones. Si se desea considerar una oración, se construye una tabla de verdad con una hilera por cada una de las posibles combinaciones de valores de verdad correspondientes a los signos propositivos de la oración. Se calcula el valor de verdad de toda la oración, en cada una de las hileras. Si la oración es verdadera en cada una de las hileras, la oración es válida.

### Sistemas de Representación basados en Reglas

Independientemente del tipo de lógica adoptado, es interesante observar que las reglas pueden reflejar conocimiento de dos tipos: las reglas causales y las reglas de diagnóstico.

**Las reglas causales** representan un conocimiento sobre la causa o las causas de determinados efectos. “Todos los afectados de gripe tienen fiebre” es una regla causal: la causa de la evidencia (fiebre) es la gripe. Del razonamiento con este tipo de reglas se dice que es **basado en modelos** (las sentencias toman como base conocimientos implícitos, “modelos”, mundos posibles). Un sistema que trabaje con este tipo de reglas aplicará un razonamiento deductivo. Puede haber incertidumbre en el conocimiento (“el 95% de los afectados de gripe tienen fiebre”), y en ese caso el razonamiento ya no puede ser deductivo, sino aproximado.

**Las reglas de diagnóstico** van “en sentido contrario”: del efecto a la causa, un ejemplo es: “Si se observa la evidencia de fiebre, una causa puede ser la gripe”. En el razonamiento abductivo explicado en el apartado anterior “se le da la vuelta” a una regla causal para convertirla en una de diagnóstico. Para distinguirlo del caso anterior, se le puede llamar **razonamiento basado en hipótesis**. Como normalmente un efecto puede tener varias causas (hipótesis), será siempre un razonamiento no deductivo. Además, salvo raras excepciones (que sólo haya una posible causa) el conocimiento siempre es incierto.

Los sistemas basados en reglas son los más comúnmente utilizados. Su simplicidad y similitud con el razonamiento humano, han contribuido a su popularidad en diferentes dominios. Las reglas son un importante paradigma de representación del conocimiento.

Un sistema basado en reglas utiliza el “modus ponens” para manipular las afirmaciones y las reglas durante el proceso de inferencia. Mediante técnicas de búsqueda y procesos de unificación, los sistemas basados en reglas automatizan sus métodos de razonamiento y proporcionan una progresión lógica desde los datos iniciales, hasta las conclusiones deseadas. Esta progresión hace que se vayan conociendo nuevos hechos o descubriendo nuevas afirmaciones, a medida que se va guiando hacia la solución del problema.

En consecuencia, el proceso de solución de un problema en los sistemas basados en reglas va realizando una serie de inferencias que crean un sendero entre la definición del problema y su solución. Las inferencias están concatenadas y se las realiza en forma progresiva, por lo que se dice que el proceso de solución origina una cadena de inferencias.

Los sistemas basados en reglas difieren de la representación basada en lógica en que son en general no-monotónicos, es decir hechos o afirmaciones derivadas, pueden ser retractados, en el momento en que dejen de ser verdaderos y además, pueden aceptar incertidumbre en el proceso de razonamiento.

## **Redes Semánticas**

Las redes semánticas, fueron originalmente desarrolladas para representar el significado o semántica de oraciones en inglés, en términos de objetos y relaciones. Se trata de un lenguaje gráfico, fácilmente traducible a forma simbólica, muy útil para representar

conocimiento taxonómico, es decir, aquél que permite agrupar los elementos del universo en una jerarquía de clases y subclases entre las cuales existe una relación de herencia.

Las redes semánticas o asociativas se caracterizan por representar el conocimiento en forma gráfica. Agrupan una porción de conocimiento en dos partes: objetos y relaciones entre objetos. Los objetos se denominan también nodos (elementos del conocimiento) y las relaciones entre nodos se denominan enlaces o arcos. Cada nodo y cada enlace en una red semántica, deben estar asociados con objetos descriptivos.

Son muy apropiadas para representar conocimiento de naturaleza jerárquica. Su concepción se basa en la asociación de conocimientos que realiza la memoria humana. Las principales aplicaciones son: comprensión de lenguaje natural, bases de datos deductivas, visión por computadora, sistemas de aprendizaje.

Las redes asociativas tienen dos ventajas sobre los sistemas basados en reglas y sobre los basados en lógica: Permiten la declaración de importantes asociaciones, en forma explícita y sucinta y además, debido a que los nodos relacionados están directamente conectados, y no se expresan las relaciones en una gran base de datos, el tiempo que toma el proceso de búsqueda por hechos particulares puede ser significativamente reducido.

Entre las desventajas de las redes asociativas, se tiene que no existe una interpretación normalizada para el conocimiento expresado por la red. La interpretación de la red depende exclusivamente de los programas que manipulan la misma. Además, la dificultad de interpretación a menudo puede derivar en inferencias inválidas del conocimiento contenido en la red. Finalmente, la exploración de una red asociativa puede derivar en una explosión combinatoria del número de relaciones que deben ser examinadas para comprobar una relación.

#### **4.4.1.2. Esquemas procedimentales**

Conocimiento procedimental o procedural es aquel conocimiento compilado que se refiere a la forma de realizar una cierta tarea (el saber como hacerlo). Por ejemplo, los pasos necesarios para resolver una ecuación algebraica son expresados como conocimiento procedimental. Las representaciones procedimentales, por el contrario de las declarativas, pueden ser más compactas, sacrificando flexibilidad.

#### **Representación mediante Marcos**

Un marco o plantilla (“frame”) es una estructura de datos apropiada para representar una situación estereotípica. Las plantillas organizan el conocimiento en objetos y eventos apropiados para situaciones específicas. Evidencia psicológica sugiere que la gente utiliza grandes plantillas para codificar el conocimiento de experiencias pasadas, o conocimiento acerca de cosas que se encuentran comúnmente, para analizar y explicar una situación

nueva en su cotidiana actividad cognoscitiva semejándose de esta manera a los ya mencionados sistemas basados en casos.

Una plantilla representa un objeto o situación mediante la colección de atributos que posee. Están formadas por un nombre y por una serie de campos de información o ranuras ("slots"). Cada ranura puede contener uno o más enlaces ("facets"). Cada enlace tiene un valor asociado. Varios enlaces pueden ser definidos para cada ranura, por ejemplo:

- Rango: El conjunto de posibles valores para la ranura.
- Valor: El valor de la ranura.
- Default: El valor a ser asumido si no se especifica otro.

Además los enlaces pueden ser procedimientos que residen en la base de datos y están aguardando para ser utilizados cuando se los necesite. Entre los más comunes se pueden mencionar:

- Si-Necesitado: Procedimiento(s) para determinar el valor actual de una ranura.
- Si-Agregado: Procedimiento(s) a ejecutarse cuando un valor es especificado para una ranura.
- Si-Modificado: Procedimiento(s) a ejecutarse si el valor de una ranura es cambiado.

A estos procedimientos también se los denomina "Demons" y representan un concepto poderoso en las plantillas, esto es, la habilidad de combinar conocimiento procedimental dentro de la estructura de conocimiento declarativo de la plantilla. Esto sugiere que una plantilla puede ser un medio poderoso de representación del conocimiento, especialmente si se la incorpora en una red de plantillas.

Las ventajas que se pueden establecer para los sistemas basados en plantillas son las siguientes:

Facilidad de proceso guiado por las expectativas. Un sistema basado en plantillas, mediante los "Demons" es capaz de especificar acciones que deben tener lugar cuando ciertas condiciones se han cumplido durante el procesamiento de la información.

El conocimiento que posee un sistema basado en plantillas es significativamente más estructurado y organizado que el conocimiento dentro de una red asociativa.

Las plantillas pueden ser estructuradas de tal forma que sean capaces de determinar su propia aplicabilidad en determinadas situaciones. En caso de que una plantilla en particular no sea aplicable, puede sugerir otras plantillas que pueden ser apropiadas para la situación.

Se pueden fácilmente almacenar en las ranuras valores dinámicos de variables, durante la ejecución de un sistema basado en conocimiento. Esto puede ser particularmente útil para aplicaciones de simulación, planeamiento, diagnóstico de problemas o interfases para bases de datos.

Entre las principales desventajas que se pueden establecer para la representación del conocimiento mediante plantillas, se tiene: dificultad de representar objetos que se alejen considerablemente de estereotipos, no tiene la posibilidad de acomodarse a situaciones u objetos nuevos y además, dificultad para describir conocimiento heurístico que es mucho más fácilmente representado mediante reglas.

## **Representación mediante Objetos**

Un objeto se define como una colección de información representando una entidad del mundo real y una descripción de cómo debe ser manipulada esta información, esto es los métodos. Es decir, un objeto tiene un nombre, una caracterización de clase, varios atributos distintivos y un conjunto de operaciones. La relación entre los objetos viene definida por los mensajes. Cuando un objeto recibe un mensaje válido, responde con una acción apropiada, retornando un resultado.

Los objetos, son similares a las plantillas. Ambos sirven para agrupar conocimiento asociado, soportan herencia, abstracción y el concepto de procedimientos agregados. La diferencia radica en que en las plantillas, a los programas y a los datos se los trata como dos entidades relacionadas separadas. En cambio en los objetos se crea una fuerte unidad entre los procedimientos (métodos) y los datos. Además, los "Demons" de las plantillas sirven sólo para calcular valores para las diversas ranuras o para mantener la integridad de la base de conocimientos cada vez que una acción de alguna plantilla, afecta a otra. En cambio, los métodos utilizados por los objetos son más universales ya que proporcionan cualquier tipo general de computación requerida y además soportan encapsulamiento y polimorfismo.

Los objetos, como forma de representación del conocimiento ofrecen las siguientes ventajas:

- Poder de abstracción.
- Encapsulamiento o capacidad de esconder información.
- Herencia, es decir pueden recibir características o propiedades de sus ancestros.
- Polimorfismo, que permite crear una interfase común para los diversos objetos utilizados dentro del dominio.
- Posibilidad de reutilización del código.
- Mayor facilidad para trabajar eficientemente con sistemas grandes.

Por otro lado, las desventajas son similares a las que se indicaron para las plantillas: dificultades para manejar objetos que se alejan demasiado de la norma y dificultades para manejar situaciones que han sido encontradas previamente.

#### **4.5 FORMULACIÓN DE LA REPRESENTACIÓN DEL CONOCIMIENTO**

El trabajo de investigación que se presenta, tuvo como uno de sus objetivos principales: la representación del conocimiento de un dominio específico, en este caso los procesos operativos y de falla, llamados "Consignas", de las subestaciones eléctricas del CTE Oriente de la empresa Interconexión Eléctrica E.S.P. S.A. - I.S.A. Fundamentalmente se buscó construir las bases para el desarrollo de herramientas computacionales que contribuyan en los procesos de aprendizaje y entrenamiento, enmarcados en la filosofía de competencias laborales, de los asistentes de subestaciones. La solución implicó no sólo la representación del conocimiento como tal, sino también, la implementación de herramientas para el análisis de dicha información, ya que éstas son esenciales en procesos de enseñanza asistidos por computador. La elección de la mejor forma de manipular el conocimiento y la información, exigió resolver tres problemas: encontrar la forma de representar todo el conocimiento del dominio, realizar inferencias automáticas, y actualizar y construir nuevos conocimientos. La estructura básica de estas herramientas se presentan en el siguiente capítulo.

El planteamiento de la solución específica de la representación partió del análisis de las consignas desde la perspectiva del conocimiento y se estructuró como se muestra en la Figura 48. Se determinó también, el tipo de conocimiento que estaba inmerso en ellas y si era solamente conocimiento declarativo, procedimental o la unión de ellos. Una vez formalizado el tipo de conocimiento contenido en las consignas se procedió a determinar cuál era la mejor forma de representarlo. Teniendo en cuenta que, las consignas operativas involucran tanto conocimiento declarativo como procedimental, se determinó para cada uno de ellos, cuál era la mejor manera para abordar su representación, teniendo en cuenta los criterios fundamentales para evaluar su correcta representación.

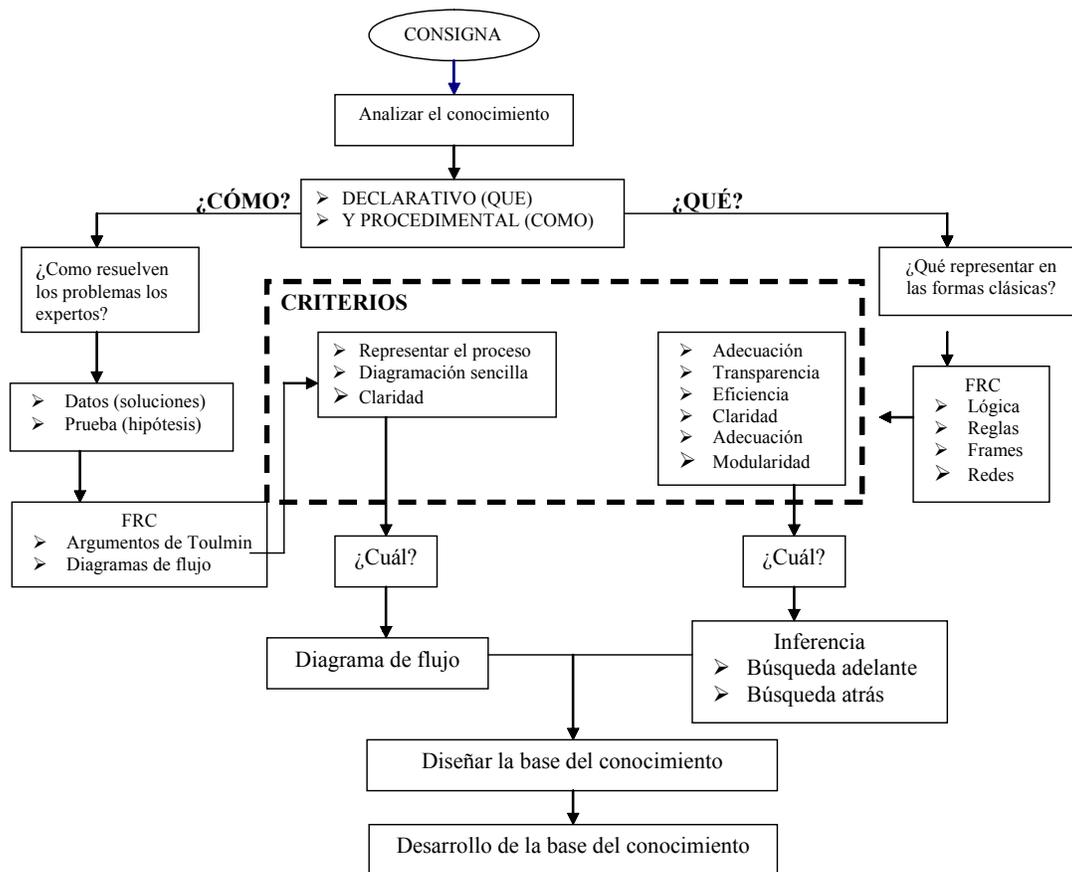


Figura 48: Pasos para alcanzar la mejor técnica de representar el conocimiento

Una subestación funciona acorde con las reglas impuestas por su configuración, control y protecciones. Estas reglas, definidas por los expertos, rigen las operaciones que se pueden realizar en ella: energización, desenergización, transferencia y aterrizaje. Para operar las subestaciones se debe realizar una serie de acciones que requieren de unas condiciones determinadas como requisito inicial para su ejecución y se efectúan en un nivel especificado de la subestación. Cada acción, que involucre elementos de potencia de la subestación, arroja como resultado un nuevo conjunto de estados de los elementos, dichos estados conforman las nuevas condiciones que son claves para la siguiente acción y así sucesivamente. Si ante la realización de una acción el cambio de condiciones no se da como resultado de la misma, se asume inmediatamente que se entra en estado de falla. El estado de falla está igualmente regido por unas reglas dadas que determinan las acciones a realizar para salir de dicho estado en el menor tiempo posible y ubicar el elemento que generó el error en el proceso (consignas bajo falla). La Figura 49 muestra un diagrama que resume lo anterior.

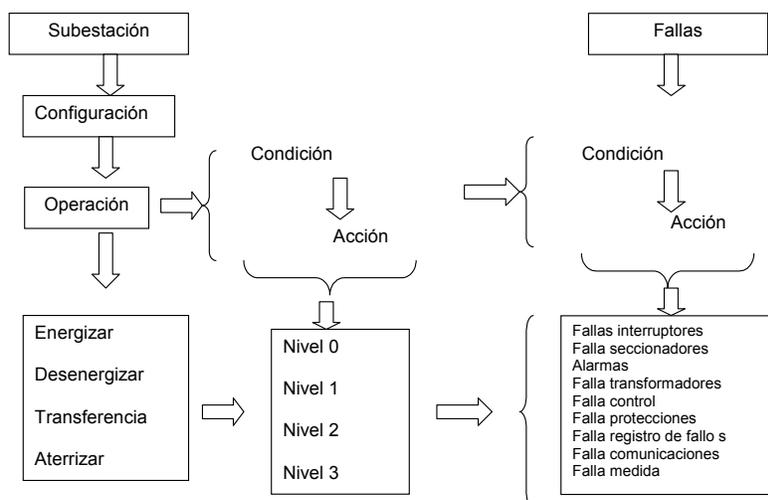


Figura 49: Operaciones generales en los procedimientos operativos

La realización de las acciones contenidas en las consignas requiere no solamente de tener conocimiento del proceso como tal, sino también, de los elementos constitutivos de la subestación, su funcionamiento, sus estados y la incidencia en la interacción entre tales elementos. Es claro por tanto, que el conocimiento inmerso en las consignas es tanto declarativo como procedimental y por ello se requiere el uso de varias técnicas de “representación del conocimiento” para su correcto modelado.

#### 4.5.1. CONOCIMIENTO DECLARATIVO DE LAS CONSIGNAS

Si se tiene en cuenta que el conocimiento declarativo consiste en hacer una descripción de los objetos de un dominio con base en sus propiedades y sus interrelaciones, se puede observar entonces que este tipo de conocimiento aparece en las consignas, ya que éstas almacenan en forma implícita: las propiedades de algunos elementos como los códigos asignados por la empresa, los posibles estados que un elemento puede tener, las descripciones propias de una acción o de un elemento, la configuración de los elementos de potencia que conforman una subestación y la forma como se deben relacionar con los demás elementos, etc.

En el proyecto se determinó como conocimiento declarativo de “primer nivel” aquel que está determinado exclusivamente por especificaciones dadas por la empresa y que no incide de manera directa en la toma de decisiones de la base del conocimiento, pero es necesario para ubicar al operario en su entorno real, es decir, es útil en el proceso de individualizar las consignas, para un determinado campo de una subestación, puesto que es imperativo presentar estos códigos para que los operarios se vayan familiarizando con ellos y vayan identificando su aplicación y la forma de utilizarlos. Un ejemplo del tipo de información se presenta en la Tabla 4, esta tabla contiene los códigos determinados para los “grupos operativos o áreas” de las subestaciones, siendo estos el conjunto de elementos que realizan una labor específica en el flujo de potencia que pasa a través ellos, labor por la cual es necesario caracterizar cada uno de estos grupos. De igual

manera, existen códigos que determinan otras propiedades de los elementos como la identificación del campo al que pertenecen, y la posición exacta que ocupan en dentro de dicho campo.

SIGNIFICADO	CODIGO	FUNCIÓN	CÓDIGO
Asociado a barra virtual o ficticia	01 a 09	Acoplador	I
Asociado a barra 1, a sección 1 de barra o anterior al acoplador	11 a 19	Seccionamiento de barras	S
En anillo	11 a 19	Transferencia de interruptores	B
Principal en doble interruptor/barra sencilla	11 a 19	Acoplador de barras y transferencia de interruptores	M
Principal en doble Interruptor/barra sencilla	20	Circuito del generador	G
Asociado a barra 2, a sección 2 de barra, o posterior al acople	21 a 29	Circuito de la unidad de generación	U
Reserva en doble interruptor/barra sencilla	21 a 29	Circuito de transformación	T
Segundo seccionamiento	30	Circuito de autotransformación	A
Asociado a la sección 3 de barra	31 a 39	Circuito de línea	L
Asociado a sección 4 de barra	40	Circuito de reactor	R
		Circuito de condensador	C
<b>Código asignado a los grupos operativos</b>		<b>Código Asignado a la identificación del campo</b>	
	<b>FUNCIÓN</b>	<b>CÓDIGO</b>	
	Interruptor	0	
	Conexión a barra principal 1	1	
	Conexión a barra principal 2	2	
	Conexión a barra de reserva	3	
	Conexión en serie con nodo intermedio cómo primera opción o conexión a sección 4 de barra 1	4	
	Conexión en serie a nodo intermedio cómo segunda opción	5	
	Conexión en paralelo a interruptor (by-pass)	6	
	Conexión de circuito de salida (de línea, transformador)	7	
	Cuchilla de puesta a tierra cómo segunda opción	8	
	Cuchilla de puesta a tierra cómo primera opción	9	
<b>Código asignado a la posición del equipo en el campo</b>			

Tabla 4: Conocimiento declarativo de primer nivel: Codificación de grupos, campos y elementos

La aplicación de esta codificación es más evidente cuando se presenta el diagrama unifilar de la subestación, ver Figura 50, en el cual se encuentran los elementos con sus respectivos códigos. Estos diagramas son la manera más adecuada de hacer que el operario se forme una imagen mental clara de la subestación y por ende, le ayudan a ubicarse con facilidad en ella y a tomar decisiones con más fundamento y en el menor tiempo posible. Por ello es imprescindible que esta información haga parte de la base del conocimiento; sin embargo, como se mencionó anteriormente no es información relevante para el motor de inferencia.

Dentro del grupo de conocimiento declarativo denominado de “primer nivel” está también la clase de los elementos de potencia, un elemento de potencia puede ser un interruptor, un seccionador, etc., la clase de los elementos de control: selector, pulsador, etc., las posibles configuraciones que existen de subestaciones: barra sencilla, barra sencilla con transferencia, etc. y una información descriptiva de todos los entes, elementos y acciones involucradas en el desarrollo de una consigna operativa. Toda esta información está contenida en la base de datos que conforma la “base del conocimiento”, dicha información

se almacenó en forma de tablas que se caracterizan exclusivamente por contener datos con criterios similares.

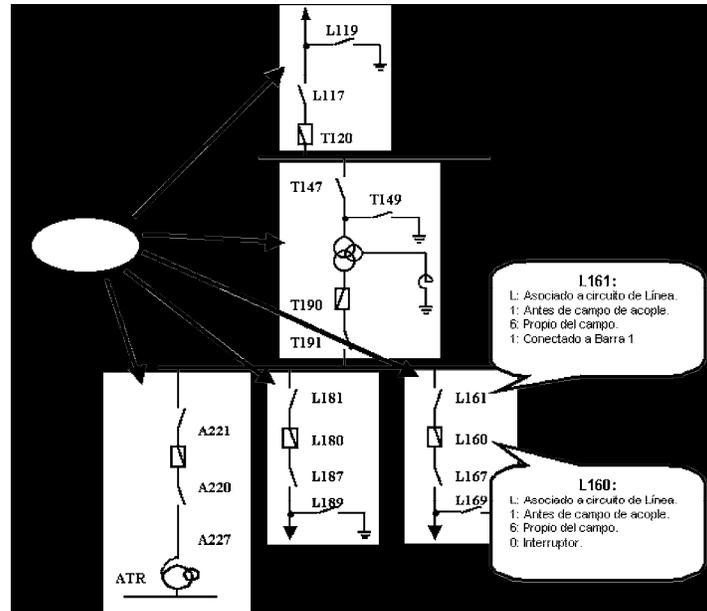


Figura 50: Diagrama unifilar de una subestación

Determinada la forma de representar el conocimiento descriptivo, el siguiente problema a solucionar es cómo representar el conocimiento que relaciona toda la información, lo cual se determinó como conocimiento declarativo de “segundo nivel”. Para esto se abordaron dos soluciones posibles: la representación mediante “frames” o marcos y la representación a través de redes semánticas. A continuación se presenta una descripción detallada de cada una de estas técnicas, cómo se implementó y las ventajas y desventajas de cada una de ellas.

#### 4.5.1.1. Marcos

Siendo los marcos una de las alternativas para representar el conocimiento se decidió ensayar y evaluarla para determinar las ventajas que ofrecía en la implementación, Figura 51. Sin embargo, se concluyó que construir el conocimiento, contenido en las consignas, bajo esta metodología es bastante tedioso y era difícil de almacenarlo en una base de datos puesto que los “frames” o marcos tiene una estructura más parecida a un diagrama de clases como los usados en la programación orientada a objetos, y no conservan una estructura de relaciones directa y clara como ocurre en las bases de datos.

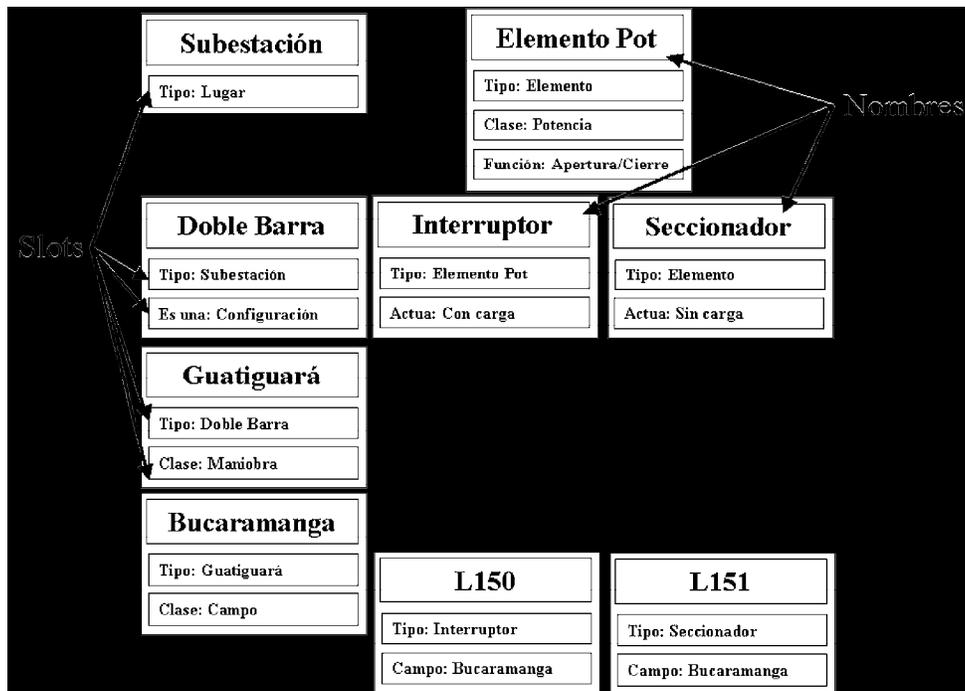


Figura 51: Representación de consignas mediante Marcos

#### 4.5.1.2. Redes semánticas

Este tipo de representación se adoptó para construir el conocimiento declarativo de “segundo nivel” de las consignas (relaciones), puesto que es fácil de implementar y tiene una estructura parecida a los diagramas “entidad-relación” de las bases de datos. Manejan la herencia al igual que los marcos pero en su implementación se encontró que las relaciones de información eran más parecidas a la realidad y por lo tanto se convirtió en la herramienta más sencilla para inferir conocimiento básico que el operario puede necesitar durante su proceso de aprendizaje y entrenamiento.

Como se expuso en el capítulo 2, las “consignas operativas” son documentos con una estructura determinada (ver Figura 52), realizados por expertos para operar eficientemente las subestaciones. En ellas está plasmada la forma óptima de ejecutar una maniobra ya sea operativa o bajo falla, y cuyo fin es usar el menor tiempo posible, sin perder de vista la seguridad de los operadores, del sistema y de la operación de la subestación en sí. Por ello, existen consignas para cada una de las maniobras que se deba realizar; y como cada subestación es un ente aparte con su propia identidad en cuanto a configuración, elementos de potencia, controles y protecciones, es de esperarse que cada grupo de consignas tenga inmersa la “personalidad”, por así decirlo, de cada subestación.

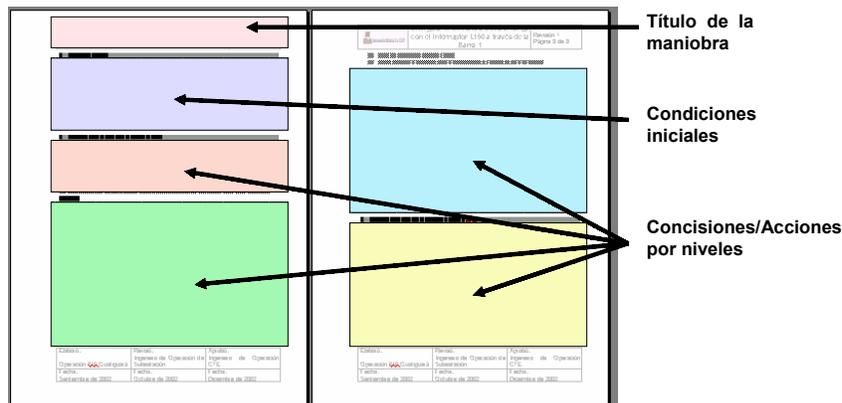


Figura 52: Estructura de las consignas operativas

Sin embargo, el contenido de estos documentos no es exclusivo para cada subestación. En ellos está involucrada implícitamente la función real de ellas: interconectar una serie de sistemas cooperando entre sí para garantizar los requerimientos de seguridad, flexibilidad y confiabilidad del Sistema Interconectado Nacional, y es por esto, que se puede deducir que hay una parte de conocimiento general asociado a todas y cada una de las consignas y que se va particularizando en la medida en que los sistemas funcionales de la subestación van variando para cada una de ellas. Lo anterior permite concluir que es factible obtener algunas generalidades como:

- Todas las subestaciones tienen una configuración.
- Todas las subestaciones tienen líneas.
- Todas las subestaciones tienen niveles.
- Todas las líneas tienen consignas operativas.
- Todas las consignas operativas tienen maniobras.
- Todas las consignas operativas tienen condiciones iniciales.
- Todas las maniobras tienen acciones.
- Toda maniobra se realiza en un nivel.
- Toda acción se realiza sobre un elemento.
- Todo elemento tiene estados.

Con las anteriores frases se puede entamar un conocimiento que se puede representar a través de una red semántica como la mostrada en la Figura 53.





utilizados. Su simplicidad y semejanza con el razonamiento humano, han contribuido a su popularidad en diferentes dominios. Las reglas son un importante paradigma de representación del conocimiento.

Los elementos importantes que conforman esta alternativa son las reglas y los datos, por lo tanto es necesario diferenciar entre datos y conocimiento. El conocimiento se refiere a afirmaciones de validez general tales como reglas, distribuciones de probabilidad, etc. Los datos se refieren a información relacionada con una aplicación particular. Por ejemplo, en un diagnóstico de falla de una subestación, las causas, las fallas y las relaciones entre ellos forman parte del conocimiento, mientras las causas específicas de una subestación en particular forman parte de los datos. Mientras el conocimiento es permanente, los datos son efímeros, es decir, no forman parte del componente permanente de un sistema y muchas veces son destruidos después de usarlos. El conocimiento se almacena en la base de conocimiento y los datos se almacenan en la memoria de trabajo. Todos los procedimientos de los diferentes subsistemas que son de carácter transitorio se almacenan también en la memoria de trabajo.

Ya se ha visto que hay dos tipos de elementos importantes para implementar un mecanismo de resolución por reglas: los datos (hechos o evidencias) y el conocimiento (el conjunto de reglas almacenado en la base del conocimiento). El tercer elemento que compone este mecanismo es el *motor de inferencia* que se apoya en los datos y las reglas para obtener nuevas conclusiones o hechos. Por ejemplo, si la premisa de una regla es cierta, entonces la conclusión de la regla debe ser cierta también. Los datos iniciales se incrementan incorporando las nuevas conclusiones. Por ello, tanto los hechos iniciales o datos de partida como las conclusiones derivadas de ellos, forman parte de los hechos o datos que se dispone en un instante dado.

Las conclusiones pueden clasificarse en dos tipos: simples y compuestas. Las conclusiones simples son las que resultan de una regla simple. Las conclusiones compuestas son las que resultan de más de una regla. Existen tres reglas de inferencia: Modus Ponens, Modus Tollens y Resolución. Las dos primeras reglas de inferencia se usan para obtener conclusiones simples y el resto de reglas y estrategias para obtener conclusiones compuestas.

Y las estrategias de inferencia son: encadenamiento de reglas, encadenamiento de reglas orientado a un objetivo y compilación de reglas.

### **Modus Ponens y Modus Tollens**

El "*Modus Ponens*" es quizás la regla de inferencia más comúnmente usada. Se utiliza para obtener conclusiones simples. En ella, se examina la premisa de la regla, y si es cierta, la conclusión pasa a formar parte del conocimiento. Como ilustración, supóngase que se tiene la regla, "Si A es cierto, entonces B es cierto" y que se sabe además que "A

es cierto". Tal como se muestra en la Figura 55, la regla "modus ponens" concluye que "B es cierto". Esta regla de inferencia, que parece trivial, debido a su familiaridad, es la base de un gran número de sistemas expertos.

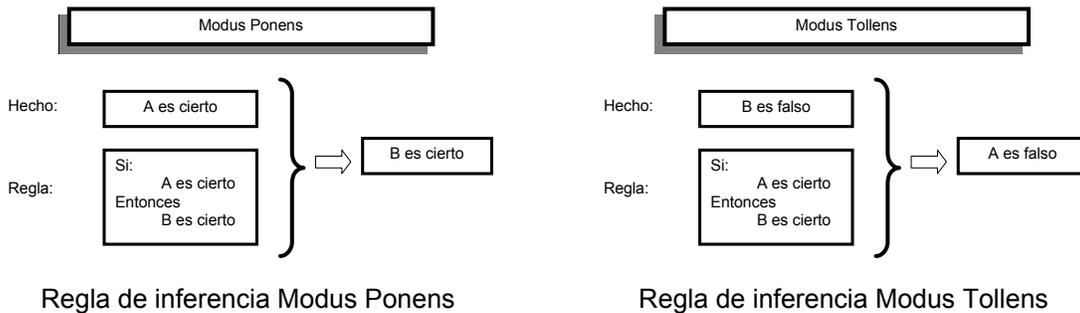


Figura 55: Reglas de inferencia: Modus Ponens – Modus Tollens

La regla de inferencia "Modus Tollens" se utiliza también para obtener conclusiones simples. En este caso se examina la conclusión y si es falsa, se concluye que la premisa también es falsa. Por ejemplo, supóngase que se tiene la regla, "si A es cierto, entonces B es cierto" pero se sabe que "B es falso". Entonces, utilizando la regla "Modus Ponens" no se puede obtener ninguna conclusión, pero, tal como se muestran la Figura 55 la regla "Modus Tollens" concluye que "A es falso". Aunque muy simple y con muchas aplicaciones útiles, la regla "Modus Tollens" es menos utilizada que la "Modus Ponens".

### Mecanismo de resolución

Las reglas de inferencia "Modus Ponens" y "Modus Tollens" se utilizan para conclusiones simples. Por otra parte, las conclusiones compuestas, que se basan en dos o más reglas, se obtienen usando el llamado *Mecanismo de Resolución*. Esta regla de inferencia sigue las etapas siguientes:

- Las reglas son sustituidas por expresiones lógicas equivalentes.
- Estas expresiones lógicas se combinan en otra expresión lógica.
- Esta última expresión se utiliza para obtener de la conclusión.

Estas etapas involucran conceptos tales como la combinación y la simplificación de expresiones lógicas.

Las consignas bajo falla son documentos que consideran, como su nombre lo indica, las causas de las fallas (no destructivas) que se pueden presentar, ya sea durante el desarrollo de una maniobra o por el disparo de una alarma, y las soluciones que se deben abordar para salir de este estado. Al igual que las consignas operativas, éstas guardan una estructura que permite hacer un seguimiento adecuado a la detección de la falla y a la

implementación de la solución. La estructura de las consignas bajo falla se puede ver en la Figura 56

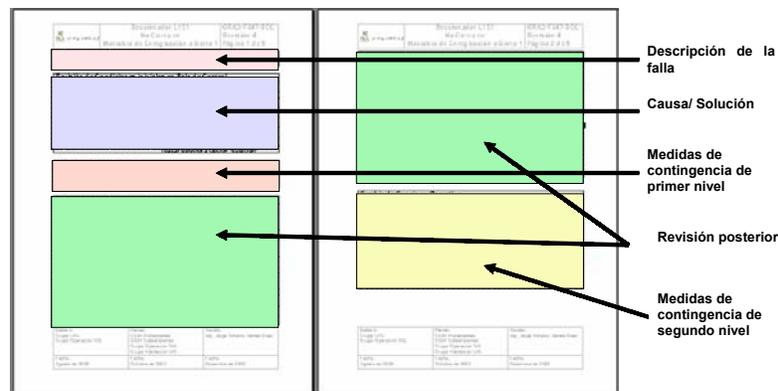


Figura 56: Estructura de las consignas bajo falla

Las consignas bajo falla, retomando el capítulo dos, están compuestas por:

**Descripción de la anomalía:** La descripción de la anomalía contiene una breve descripción de la falla (alarma, disparo, maniobra).

**Causas/Soluciones:** La sección de “posible causa” señala las causas de la aparición de la alarma o disparo. En la sección de “posible solución” se establece el procedimiento general de solución del problema y va desde la aceptación o reconocimiento de las alarmas; hasta la ejecución de acciones que conduzcan a determinar la permanencia en servicio del equipo fallado.

**Medidas de contingencia de primer nivel:** Dado el caso que en la línea de Causas/Soluciones no se encuentre la falla, estas medidas plantean otro camino a seguir para continuar con la operación.

**Revisiones posteriores:** Son acciones que se deben realizar después de ejecutada la operación, para ubicar los elementos que fallaron y dar pronta solución a estas fallas.

**Medidas de contingencia de segundo nivel:** Si definitivamente no se pudo dar solución a una falla, se debe buscar otra alternativa que permita llegar al objetivo de la maniobra que falló pero por otros caminos, es decir, realizar otra consigna cuyo objetivo final sea idéntico al original.

La filosofía de las consignas está más detallada en el capítulo 2 de este informe. Para esta sección sólo se necesita focalizar en la forma de detectar un posible estado de falla y como abordar esta detección a través de un sistema experto.

Por ser la detección de las fallas un proceso de diagnóstico, se determinó que su representación era más eficiente a través de las reglas de producción, ya que toda falla tiene unas condiciones que la caracterizan. La Figura 57 muestra la consigna bajo falla GRA2-F0015-SEC (Seccionador L152 no cierra en maniobra transferencia programada campo de línea a campo de acople). Allí se ven las condiciones que activan la falla en la operación del seccionador y la forma de aplicar las reglas para determinar la causa.

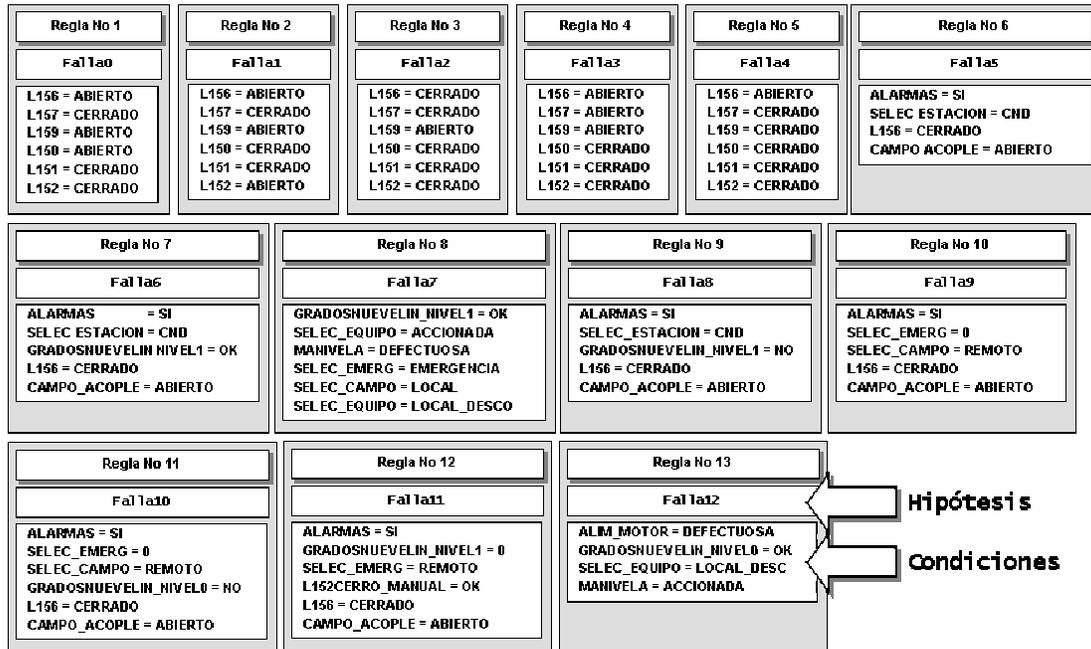


Figura 57: Condiciones de falla

Se puede observar que cada falla tiene unas condiciones dadas que se convierten en reglas. Además, para cada condición hay una solución a implementar con relación uno a uno, es decir, para cada falla existe su propia solución. La inferencia de las fallas se efectúa a través del *mecanismo de resolución* que permite obtener conclusiones compuestas dado que provienen de múltiples reglas mientras que la inferencia de las soluciones se realiza a través del “Modus Ponens” por ser una conclusión simple, esto es, dada la relación uno a uno existente, el cumplimiento de una regla (una falla determinada), conduce a una “única” solución asociada a ella. Por ejemplo, de acuerdo con la consigna bajo falla GRA2-F0015-SEC, para que ocurra la falla denominada falla0 (ver Figura 57), hay unas condiciones (reglas) determinadas. Estas son:

Si:

L156 = ABIERTO,  $\wedge$ , L157 = CERRADO,  $\wedge$ , L159 = ABIERTO,  $\wedge$ , L150 = ABIERTO,  $\wedge$ , L151 = CERRADO,  $\wedge$ , L152 = CERRADO

Entonces:

FALLA=FALLA0

Si:

FALLA=FALLA0

Entonces:

SOLUCIÓN = SOLUCIÓN0

Como se puede ver la “Falla0” requiere del cumplimiento de una regla compuesta por las condiciones de varios elementos mientras que para la implementación de la “Solución0” sólo se necesita que exista la “Falla0”.

Para tener un marco de referencia y poder contrastar lo realizado, se buscó validar la veracidad de la implementación obtenida para las *consignas bajo falla*, de manera que, se utilizó la herramienta “software” llamada *Esvac V2.0*, elaborada en la Universidad Industrial de Santander, donde se validaron las reglas que se utilizaron para detectar fallas obteniendo buenos resultados. El entorno de esta herramienta se puede observar en Figura 58. *Esvac* solicita las condiciones a evaluar en las reglas, verifica que las reglas se cumplan y con esto, evalúa todas las posibles soluciones y da el resultado que más se adapta a las condiciones dadas.

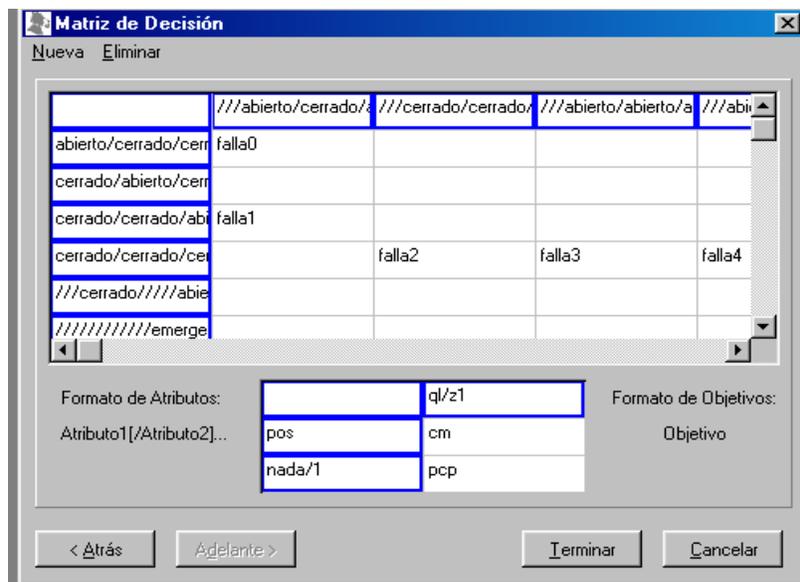


Figura 58: Matriz de decisión

#### 4.5.2. CONOCIMIENTO PROCEDIMENTAL DE LAS CONSIGNAS

Existe otro conocimiento en las consignas que necesita ser representado, el ¿cómo se hace?, esto es, ¿cómo realizar una labor determinada?, que pasos hay que seguir desde el inicio de una labor hasta su final (desarrollo de una tarea). Esto es lo que comúnmente se denomina conocimiento procedimental. Los modelos procedimentales pueden estar caracterizados por gramáticas formales, usualmente implantadas por sistemas o lenguajes procedimentales.

Existen dos tareas específicas en las consignas: la realización de una consigna operativa como tal, y si se presenta una falla, los pasos a seguir para solucionarla. Ambas labores son totalmente diferentes y aunque existe un punto de convergencia en el desarrollo de una de ellas, prevalecen en su interior dos formas particulares de realizar dichas tareas. Sin embargo, aquí se considera que la forma más adecuada de representar este tipo de conocimiento es a través de los diagramas de flujo. En la Figura 59 están representados, secuencialmente, los pasos a seguir para realizar una consigna operativa. Como se puede observar, la cantidad de pasos necesarios para realizar una energización depende tanto del número de elementos de potencia involucrados en la maniobra como de sus estados. Por ello, conocer de antemano los elementos involucrados da una idea aproximada de los pasos a seguir.

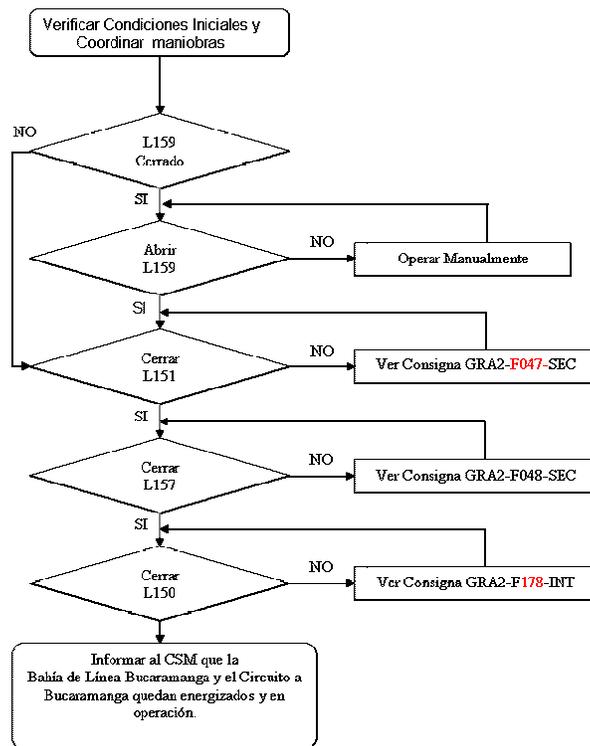


Figura 59: Conocimiento declarativo: Consignas operativas

Finalmente están las tareas a realizar cuando se sigue una consigna bajo falla. Como se puede observar en la Figura 60, se puede determinar que la forma de enfrentar la tarea, cambia de perspectiva, y los pasos van determinados no por los elementos involucrados en la operación sino por los niveles de control de la subestación o por las consignas alternativas.

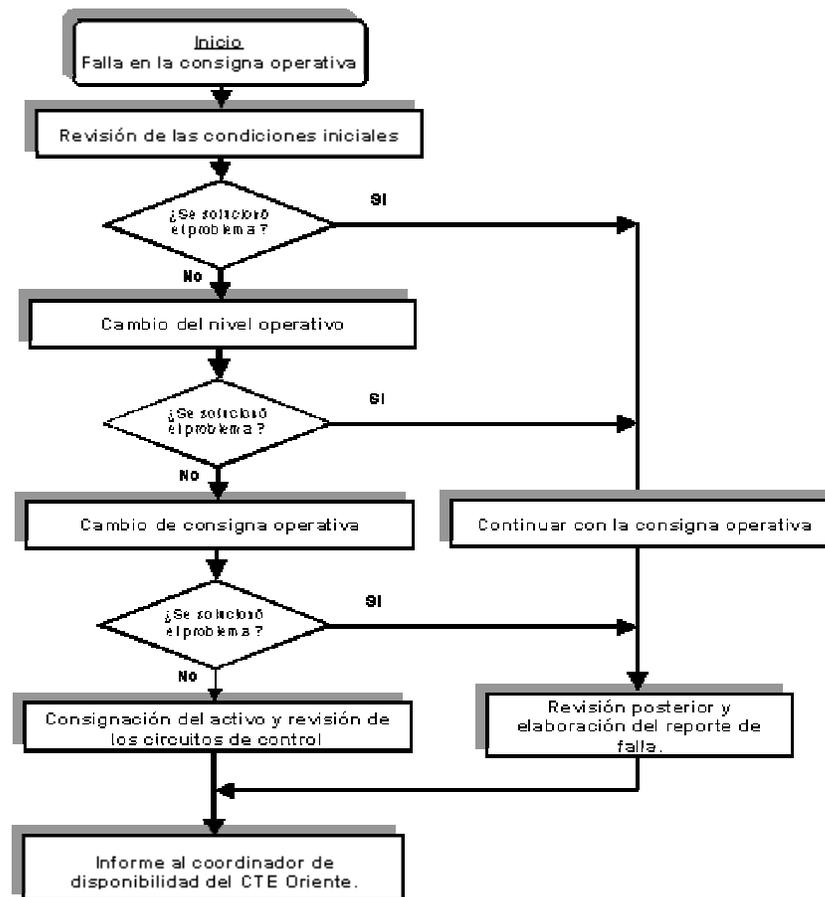


Figura 60: Conocimiento declarativo: Consignas bajo falla

Como se pudo apreciar, el conocimiento contenido en las consignas no sólo es extenso en cuanto a contenidos sino también en sus estructuras. Por tanto, para este caso específico, la inteligencia artificial y sus teorías han aportado una valiosa ayuda en la labor de presentar toda esta información a los asistentes de subestaciones a través de herramientas informáticas que potencializan el proceso su aprendizaje.

En el trabajo se puede observar adicionalmente la implementación de una herramienta “software” construida bajo los criterios que se han expuesto en este capítulo para el manejo los procedimientos operativos, desarrollada a través de un proyecto de grado de la escuela de sistemas [24]. De igual manera, en el siguiente capítulo se presenta la estructura para la base de conocimientos que se plantea para el manejo de los procedimientos operativos.

## **5. ESTRUCTURA DEL SISTEMA DE APOYO AL ASISTENTE DE SUBESTACIONES**

### **5.1 INTRODUCCIÓN**

En la operación y control de un sistema o proceso, se deben tomar continuamente decisiones acerca de las acciones que se ejecutarán, con el ánimo de mantener los parámetros característicos bajo las condiciones requeridas, o que el sistema o proceso responda de una manera determinada. Estas decisiones deben ser tales que la conducta resultante del sistema satisfaga de la mejor manera posible los objetivos planteados.

En la selección de las acciones correctas para lograr los efectos requeridos es necesario saber la evolución del sistema o proceso ante su ejecución, lo cual se podría establecer mediante la experimentación real, ejecutando las acciones en el sistema y registrando su comportamiento; pero factores de costos, seguridad y otros hacen que esta opción generalmente no sea viable. Con el propósito de superar estos inconvenientes, se reemplaza el sistema real por un modelo del sistema con características similares que permita la experimentación a costos razonables, sin exponer el sistema.

Las técnicas de simulación proporcionan una herramienta útil para superar los problemas mencionados, y realizar análisis e investigación de sistemas o procesos (diseño de sistemas de control, optimización de sistemas, optimización de los procesos). El desarrollo experimentado en las dos últimas décadas en el área de informática ha permitido superar estas dificultades y ha potencializado la simulación como una de las áreas con más desarrollo en la capacitación.

Aunque los sistemas de control moderno, a través de la detección, diagnóstico y reconfiguración, facilitan en gran parte la labor de los operadores bajo condiciones normales y anormales del sistema, las competencias y conocimiento que el operador tenga del proceso hacen que la interacción entre él y el control maximicen la eficiencia del proceso.

En la actualidad, las subestaciones de transmisión realizan el control de los equipos primarios de potencia con la ayuda de un sistema de control remoto centralizado. Este tipo de instalaciones ha incrementado la capacidad de los operadores para conocer en todo momento el estado del sistema eléctrico. Sin embargo, la operación segura y efectiva del sistema depende estrechamente de la comprensión que el operador tenga de la red eléctrica, así como de su experiencia con el sistema de control. Por consiguiente, es clara la necesidad de un proceso de entrenamiento de los operadores que incremente, si cabe, su eficacia.

De igual manera, los procedimientos operativos se encuentran registrados en documentos disponibles para su estudio y seguimiento (tratados en los capítulos uno dos y tres); sin embargo, en su ejecución efectiva, rápida, segura y confiable, se hace necesario que el operador de la subestación tenga conocimiento práctico y los esté ejecutando continuamente.

Resulta evidente la necesidad de un sistema que apoye la labor del operador de la subestación en la realización de los procedimientos operativos y ante eventos de fallas de equipos. En principio, este sistema facilita la adquisición y práctica de los procedimientos operativos y el conocimiento de los sistemas de las subestaciones, y dadas sus ventajas, se pueda apoyar en simulaciones. En consecuencia, el disponer de un “simulador de la subestación y de los equipos de control”, es muy útil en el proceso de formación y entrenamiento de dichos operadores.

El trabajo de maestría que se presenta, tuvo como objetivo el planteamiento de un sistema que apoye la labor del operador de la subestación ante eventos de fallas de equipos, mediante la simulación de consignas operativas y de fallas en los equipos. Junto con la representación del conocimiento se buscó plantear una herramienta que permita la capacitación del operador de subestación en la realización de maniobras y en la atención de fallas en equipos. El planteamiento de este sistema no solo implicó estos factores, sino que además se incorporaron otros que intervienen en la adecuada formación del operador de subestaciones.

Este capítulo presenta el modelo del sistema para entrenamiento de operadores. El modelo comprende la estructura y la interrelación de los componentes que forman el sistema, así como el funcionamiento básico de cada uno de sus componentes. Se muestran los componentes del sistema que satisfacen las necesidades planteadas, seguido de una presentación de los temas a tener en cuenta en la realización de estudios de simulación y se finaliza con la descripción de los componentes haciendo énfasis en módulo que representa la subestación.

## **5.2 SIMULACIÓN**

La simulación de un proceso es una palabra que es utilizada por los profesionales en la mayoría de las disciplinas. Se podrían resumir las definiciones de simulación planteadas en [37], [42] y [16] en: La simulación es el empleo de un modelo para representar características esenciales de un sistema o proceso que se estudie. La dinámica del comportamiento del sistema representado puede inferirse por el funcionamiento del modelo.

La simulación puede intervenir en cualquiera de las fases del ciclo de vida de un sistema, tanto en la concepción del mismo, como en su diseño preliminar y consiguiente estudio de factibilidad, en el diseño detallado y en la fase de construcción para proceder a evaluaciones y asesoramientos, o en la fase de utilización y mantenimiento para poder evaluar escenarios alternativos y encontrar respuestas a preguntas del tipo “que pasaría si”. La simulación puede entrar a formar parte de un estudio de cualquier tipo en

cualquiera de las fases de un proyecto industrial: Estudio preliminar, ingeniería básica, ingeniería de detalle, construcción, funcionamiento y operación.

De acuerdo con la naturaleza del modelo empleado, la simulación puede ser de varios tipos [20]:

- **Identidad:** Es cuando el modelo es una réplica exacta del sistema en estudio. Es la que utilizan las empresas automotrices cuando realizan ensayos de choques de automóviles utilizando unidades reales.
- **Cuasi-identidad:** Se utiliza una versión ligeramente simplificada del sistema real. Por ejemplo, los entrenamientos militares que incluyen movilización de equipos y tropas pero no se lleva a cabo una batalla real.
- **Laboratorio:** Se utilizan modelos bajo las condiciones controladas de un laboratorio.

**Juego operacional:** Personas compiten entre ellas, ellas forman parte del modelo, la otra parte consiste en computadoras, maquinaria, etc. Es el caso de una simulación de negocios donde las computadoras se limitan a recolectar la información generada por cada participante y a presentarla en forma ordenada.

**Hombre-Máquina:** Se estudia la relación entre las personas y la máquina. Las personas también forman parte del modelo. La computadora no se limita a recolectar información, sino que también la genera. Un ejemplo de este tipo de simulación es el simulador de vuelo.

**Simulación por computadora:** El modelo es completamente simbólico y está implementado en un lenguaje computacional. Las personas quedan excluidas del modelo. Un ejemplo es el simulador de un sistema de redes de comunicación donde la conducta de los usuarios está modelada en forma estadística. Este tipo de simulación a su vez puede ser:

Digital: Cuando se utiliza una computadora digital.

Analógica: Cuando se utiliza una computadora analógica. En este grupo también se pueden incluir las simulaciones que utilizan modelos físicos.

Teniendo en cuenta la función de la naturaleza de los sistemas a simular, las técnicas de simulación convencional se dividen en cuatro grupos:

- Simulación de sistemas continuos.
- Simulación de procesos por lotes.
- Simulación combinada.

- Simulación de Monte Carlo.

El criterio que se toma para establecer esta división es la variable que se emplea para el control de la simulación, el tiempo.

El tiempo es intrínsecamente una variable continua; así, para realizar una simulación real de un proceso se debería manejar un tiempo que variase de forma completamente continua, lo que únicamente es posible en la simulación analógica. La primera aproximación para introducir el tiempo desde una simulación digital es tomar como reloj un contador con incrementos constantes, lo que produce un reloj sincrónico. A medida que los incrementos disminuyan, la aproximación al sistema físico mejorará, a costa de un mayor tiempo de cálculo.

Existe otra serie de procesos, denominados por lotes, en los cuales no es precisa una evolución continua del tiempo, ya que las modificaciones que existen en el sistema a simular se produce cada ciertos intervalos de tiempo, de valor elevado y espaciados no uniformemente en el tiempo. En este caso se precisa un reloj asincrónico, cuya actualización depende de los eventos producidos en el sistema.

La simulación combinada contempla procesos mixtos en los que existen subprocesos de tipo continuo, junto con subprocesos en lotes. En este caso el tiempo se trata como un reloj sincrónico, pero teniendo en cuenta los eventos que se producen de forma asincrónica. Uno de los tipos de simulación de mayor novedad es la Simulación Cualitativa, en la que se utilizan modelos simbólicos de sistemas continuos capaces de predecir la evolución de los sistemas. En este tipo de simulación no se manejan valores numéricos del tiempo, utilizándose los conceptos de instantes e intervalos de tiempo entre los que se puede fijar únicamente una relación de orden (anterior-posterior).

Por último, existe una serie de sistemas en los que el factor tiempo no influye significativamente, produciéndose las técnicas de simulación mediante el método de Monte Carlo.

Dentro del trabajo que se está realizando la simulación por computador presenta mayor interés. Un simulador por computador está compuesto por el modelo, el evaluador y la interfase de usuario.

El modelo es una representación simbólica del sistema. Puede ser un conjunto de ecuaciones, reglas lógicas o un modelo estadístico.

El evaluador es el conjunto de procedimientos que procesan el modelo para obtener los resultados de la simulación. Puede contener rutinas para la resolución de sistemas de ecuaciones, generadores de números aleatorios, rutinas estadísticas, etc.

La interfase es la parte dedicada a interactuar con el usuario, recibe las acciones del mismo y presenta los resultados de la simulación en una forma adecuada. Esta unidad

puede ser tan compleja como la cabina utilizada en los simuladores de vuelo profesionales.

### **5.2.1. SISTEMA**

Un sistema es una combinación de elementos o componentes con atributos interrelacionados, y relacionados con el entorno, que actúan juntos para lograr un cierto objetivo, un sistema puede estar constituido por otros sistemas más simples que realizan funciones específicas, y se pueden destacar los atributos que caracterizan su conducta, y que proporcionan las interrelaciones. El estudio del comportamiento temporal del sistema puede permitir diseñarlo adecuadamente, controlarlo, sacarle máximo provecho, disminuir riesgos en su operación y control, etc.

Un sistema puede realizar una función que no es realizable por sus componentes individuales. Los objetos o componentes que forman parte del sistema se denominan entidades. Estas entidades poseen propiedades denominadas atributos, y se relacionan entre sí a través de relaciones o funciones. Estas relaciones pueden ser estáticas, estructurales, dinámicas o funcionales.

Los valores asumidos por los atributos de las entidades en un momento dado determinan el estado del sistema. El estado puede ser estático o estacionario, esto significa que se mantiene constante en el tiempo; o por el contrario, puede ser dinámico o transitorio si evoluciona con el tiempo. Un sistema puede presentar los dos tipos de conductas; generalmente, cuando inicia su funcionamiento pasa por un estado dinámico y luego alcanza un estado estacionario o de régimen.

Un estado estacionario es estable si el sistema retorna a él luego de una perturbación. Por el contrario, un estado estacionario es inestable si el sistema se aleja de él luego de una perturbación. Este alejamiento puede dar lugar a una respuesta acumulativa (crece o decrece continuamente, o alcanza otro estado estacionario) o a una respuesta oscilatoria (crece y decrece continuamente).

Los atributos también se denominan variables o parámetros. Los parámetros son atributos que se fijaron durante el diseño del sistema ya sea por el diseñador o por su naturaleza. Las variables se clasifican a su vez en:

- Variables de entrada o exógenas: Son fijadas por el medioambiente del sistema. Pueden ser manipulables (se fijan a voluntad)- o no (D).
- Variables de salida: Son las variables de estado, o combinación de ellas, que son medidas o traspasan la frontera del sistema.
- Variables internas: Son las variables del sistema que no son ni de entrada, ni de salida, ni parámetros.
- Variables de estado: Conforman el conjunto mínimo de variables del sistema necesarias para describir completamente su estado interno.

De acuerdo con su naturaleza, un sistema puede ser clasificado como [31]:

- **Determinístico:** Cuando el sistema no contiene ningún elemento aleatorio es un sistema determinístico. En este tipo de sistema, las variables de salidas e internas quedan perfectamente determinadas al especificar las variables de entrada, los parámetros y las variables de estado. Es decir, las relaciones funcionales entre las variables del sistema están perfectamente definidas.
- **Estocástico:** En este caso algún elemento del sistema tiene una conducta aleatoria. Entonces, para entradas conocidas no es posible asegurar los valores de salida. Cuando un sistema determinístico es alimentado con entradas estocásticas, la respuesta del sistema es también estocástica. Por ejemplo, la temperatura ambiente es una variable estocástica que afecta la respuesta del calentador eléctrico. En el mundo real, los sistemas siempre tienen elementos estocásticos ya sea por su propia naturaleza o porque son fenómenos no comprendidos actualmente; por ejemplo, a un cavernícola le podía parecer que los eclipses eran fenómenos aleatorios, hoy se pueden predecir. Sin embargo, se puede considerar un sistema real como determinístico si su incertidumbre es menor que un valor determinado.
- **Continuo:** Se tiene un sistema continuo cuando las relaciones funcionales entre las variables del sistema sólo permiten que el estado evolucione en el tiempo, en forma continua (basta que una variable evolucione continuamente).
- **Discreto:** Se tiene un sistema discreto cuando las relaciones funcionales del sistema sólo permiten que el estado varíe en un conjunto finito de puntos temporales. Las causas instantáneas de los cambios de estados se denominan eventos. El interruptor del calentador es un subsistema discreto porque la intensidad sólo puede variar en los instantes que se abre o se cierra el interruptor. La apertura y el cierre del interruptor son eventos. Un sistema continuo puede comportarse en forma discreta si las entradas son discretas. Los sistemas reales son combinaciones de continuos y discretos. Y la forma de tratarlos se adopta de acuerdo a la característica dominante.

Los sistemas reales se pueden percibir de dos formas, mediante una aproximación continua, y mediante una aproximación discreta. Para elegir una u otra aproximación se deben tener en cuenta factores como: precisión, tamaño, facilidad en hallar la solución y tiempo necesario para estudiarlo.

### **5.2.2. MODELADO DE SISTEMAS**

Modelado es el proceso de construcción de un modelo. Un modelo es una representación de un objeto, sistema, o idea. Usualmente, su propósito es ayudar explicar, entender o mejorar un sistema [47].

En el contexto de un trabajo de simulación, los modelos son la base para su implementación. El modelado es el proceso de construcción de un modelo. Un modelo de un sistema es un esquema de su funcionamiento básico, es una abstracción de la realidad que captura la esencia funcional del sistema, con el detalle suficiente como para que pueda utilizarse en la investigación y la experimentación en lugar del sistema real, con

menos riesgo, tiempo y costo. Los modelos son también sistemas que están conformados por otras dos partes: Un conjunto de variables y un conjunto de relaciones entre las variables.

Las variables del modelo representan habitualmente magnitudes físicas mientras que las relaciones describen el comportamiento del sistema que se modela ante cierta clase de situaciones.

La realización de un modelo requiere definir el conjunto de suposiciones básicas acerca de la estructura y la interrelación de los componentes que forman el sistema y acerca del funcionamiento básico de cada uno de los componentes.

Los modelos necesarios para la realización de los experimentos de simulación no se utilizan exclusivamente para predecir el comportamiento de sistemas reales, sino que pueden ser empleados en otro tipo de tareas como diagnóstico, control basado en modelos, optimización y enseñanza, entre otras.

Existe gran cantidad de técnicas de modelado, y, por ello es posible construir gran cantidad de modelos para un sistema dado. En la Figura 61 se recoge en un diagrama las posibilidades de modelado más comunes:

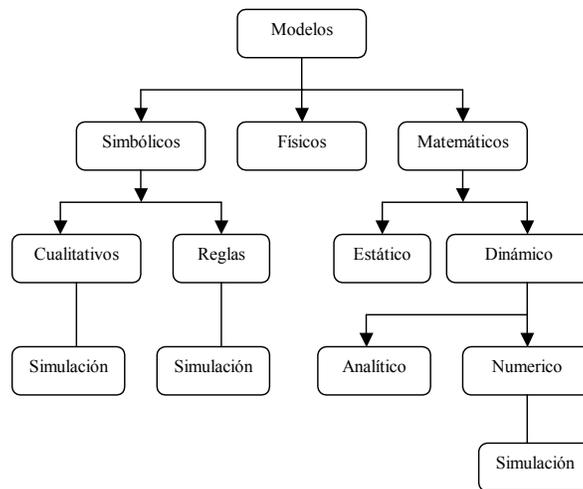


Figura 61: Tipos de modelos comunes

Para que los modelos puedan reflejar algo sobre el objeto que representan, es necesario que se construyan estableciendo una relación simétrica con la realidad, es decir, la relación de correspondencia entre el objeto real y el modelo debe ser al menos parcialmente reversible y debe permitir la traducción a la realidad de algunas propiedades del modelo.

La existencia de una relación simétrica permite que un resultado particular relativo al modelo pueda traducirse en otro idéntico, relativo al objeto real y, de esta forma, que las

respuestas derivadas del modelo sean aplicables a la realidad sin perder el sentido. Comúnmente se refieren a estas propiedades que se deducen del modelo como propiedades emergentes.

La utilidad de los modelos para conocer o predecir está condicionada por una buena selección de los factores relevantes para el problema y una adecuada descripción de sus relaciones funcionales.

Así, cuando se construye un modelo, se está construyendo un sistema cuyos componentes (partes e interrelaciones) se han reducido a una cantidad manejable para simplificar el sistema real. Para que los resultados sean aceptables es necesario una precisa selección de los componentes importantes, cada uno de los cuales debe, a su vez, ser un modelo adecuado del componente real.

La calidad de las propiedades emergentes de un modelo puede valorarse sometiendo una parte de los resultados a una verificación experimental que, aunque sólo pueda ser parcial, servirá de orientación sobre la magnitud de los errores derivados del modelo y pueden permitir correcciones.

Dado que el modelo representa la realidad con una cantidad menor de información, existe un error inherente al proceso de modelado que puede ser reducido pero no eliminado. La reducción del error puede hacerse por dos caminos complementarios: Mayor precisión en la medida y mejor selección de los componentes (no implica mayor complejidad del modelo), y mayor cantidad de componentes (partes e interrelaciones funcionales) que implica una mayor complejidad del modelo.

La eliminación del error implicaría la identificación del modelo con el objeto real, por lo que no resulta posible. En este sentido, debe buscarse un compromiso entre la complejidad del modelo y el error aceptables.

En la construcción del modelo hay varias necesidades que el modelado debe cubrir como el establecimiento de las reglas básicas de funcionamiento del sistema de interés y el establecimiento de una estrategia general de organización de la solución que permita razonar sobre las propiedades de la misma. Esto lleva a la necesidad de identificar dos tipos de modelos: fundamentales y de arquitectura. Los modelos fundamentales representan las características funcionales del sistema, y los modelos de arquitectura representan la división de componentes, relación entre componentes, colocación de los datos, heterogeneidad de los nodos, etc.

### **5.2.3. ESTRUCTURA DE LOS MODELOS DE SIMULACIÓN**

Existen dos puntos de vista diferentes para estructurar modelos para simulación, una es más sencilla de aplicar a sistemas continuos y la otra es más sencilla de aplicar a sistemas discretos. Con la primera se obtienen modelos determinísticos y con la segunda modelos discretos o estocásticos.

### 5.2.3.1. Metodología aplicable más fácilmente a sistemas continuos

La estructura del modelo está compuesta por:

**Componentes:** También llamados elementos o subsistemas.

**Variables:** Asociadas al concepto matemático de variable.

- Exógenas, de entrada o independientes: son las que afectan al sistema, pero éste no puede modificarlas. Pueden modificarse arbitrariamente desde el medio ambiente.
- Endógenas o Dependientes: Son variables del sistema que se modifican de acuerdo con relaciones, no pueden ser modificadas arbitrariamente.
- De estado: Es el conjunto mínimo de variables dependientes que permiten describir el sistema en  $t + \Delta t$ ; si se conocen sus valores más los valores de las independientes en  $t$ .
- De salida: Es el conjunto mínimo de variables de estado que permiten evaluar los objetivos del modelo.

### 5.2.3.2. Metodología aplicable más fácilmente a sistemas discretos

La estructura del modelo está compuesta por:

- Entidades: Objetos de interés en el sistema.
- Atributos: Propiedades o características de las entidades. Son los que permiten describir cuantitativamente al sistema.
- Estado: Valores de los atributos de las entidades en un instante de tiempo. Los atributos describen el estado de una entidad, y los estados de las entidades más importantes definen el estado del sistema.
- Evento: Cambio instantáneo de estado. Los eventos pueden ser continuos si los cambios se producen continuamente en el tiempo, o discretos si los cambios se producen a intervalos de tiempo.
- Actividad: Operación que produce transformaciones en los estados del sistema. Las actividades comienzan y terminan con eventos.
- Funciones: Establecen relaciones entre los atributos.

### 5.2.4. ETAPAS DE UN PROCESO DE SIMULACIÓN

Las etapas para realizar un estudio de simulación son [16]:

- Definición del sistema. Para tener una definición exacta del sistema que se desea simular, es necesario hacer primeramente un análisis preliminar del mismo, con el fin de determinar la interacción del sistema con otros sistemas, las restricciones del sistema,

las variables que interactúan y sus interrelaciones, las medidas de efectividad que se van a utilizar para definirlo y estudiarlo y los resultados que se espera obtener del estudio.

- **Formulación del modelo.** Una vez definidos con exactitud los resultados que se espera obtener del estudio, el siguiente paso es definir y construir el modelo con el cual se obtendrán los resultados deseados. En la formulación del modelo es necesario definir todas las variables, sus relaciones lógicas y los diagramas de flujo que describan en forma compleja al modelo
- **Colección de datos.** Es posible que la facilidad de obtención de algunos datos o la dificultad de conseguir otros, pueda influenciar el desarrollo y formulación del modelo. Por consiguiente, es muy importante que se definan con claridad y exactitud los datos que el modelo va a requerir para producir los resultados deseados. Normalmente, la información requerida por un modelo se puede obtener de registros
- **Implementación del modelo en la computadora.** Es la parte donde se escoge el programa o se decide si es necesario el desarrollo de un software especial.
- **Validación.** Es la parte donde se detectan los errores y deficiencias del modelo.
- **Experimentación.** Consiste en generar los datos deseados y en realizar análisis de sensibilidad de los índices requeridos.
- **Interpretación.** Se interpretan los datos que arroja la simulación y con base en estos se toma una decisión.
- **Documentación.** Se presenta la información técnica y el manual de usuario para facilitar la interacción y uso del modelo.

Actualmente las técnicas de simulación están bien establecidas y existen razones que inducen a pensar que el modelado de los sistemas es una tarea sencilla. Entre ellas se pueden destacar que los experimentos y sistemas físicos son reproducibles de un modo fiable, las medidas de los sistemas físicos son de gran calidad y están disponibles de forma abundante y las meta-leyes de la física son bien conocidas. Sin embargo, esto no es así, existe una compleja problemática en torno a las tareas de modelado.

La simulación es una herramienta muy utilizada para el entrenamiento en la operación de los sistemas, una de las etapas más complejas en el proceso de simulación es la realización del modelo o representación de las características de interés del sistema. Sin embargo, el hecho de que un sistema no esté enfocado a la simulación y predicción, sino al entrenamiento, permite que los modelos sean más sencillos que los utilizados en otros estudios. Así pues, se pueden realizar simplificaciones que hacen que la complejidad del modelo se reduzca en comparación con los modelos utilizados para predicción, diseño, etc.

### **5.3 MODELO FUNCIONAL DEL SISTEMA DE ENTRENAMIENTO Y SIMULACIÓN**

El cambio del sector energético ha generado un nuevo funcionamiento del sistema interconectado y éste ha llevado a replantear el rol desempeñado por los operadores de las subestaciones de transmisión.

La operación de una subestación de transmisión (interruptores y seccionadores), es realizada por los asistentes de la subestación, por los operadores del Centro de Supervisión y Maniobras (CSM) o por personal del Centro Nacional de Despacho (CND). Los asistentes de la subestación utilizan los niveles de control inferiores, desde la operación directa sobre los equipos hasta el control por computador desde las salas de control, mientras que los operadores del CSM o del CND utilizan los sistemas de comunicaciones para realizar las órdenes de control sólo sobre los equipos primarios de potencia. Las actividades de supervisión y registro de los equipos las realiza el asistente de la subestación mediante inspección visual y a través de la toma de medidas de las variables que proporcionan los sensores de la subestación.

En la Figura 62 se muestran las interrelaciones existentes entre los asistentes de subestaciones, los operadores del CSM y del CND, el Sistema Interconectado Nacional (SIN) y la Subestación Eléctrica (S/E). Se puede observar el flujo para la realización de operaciones de maniobra sobre los equipos primarios de potencia y los demás sistemas de la subestación. Los operadores del CSM y del CND, encargados de supervisar y controlar la configuración del sistema, ejecutan o autorizan a los asistentes de las subestaciones, la realización de maniobras sobre los equipos primarios de potencia, según los requerimientos del sistema de transmisión. Los asistentes de las subestaciones informan a los operadores del CND o del CSM de las anomalías que origina la realización de una operación de los equipos primarios de potencia o fallas en los sistemas, y piden su autorización para realizar o ejecutar acciones encaminadas a superarlas.

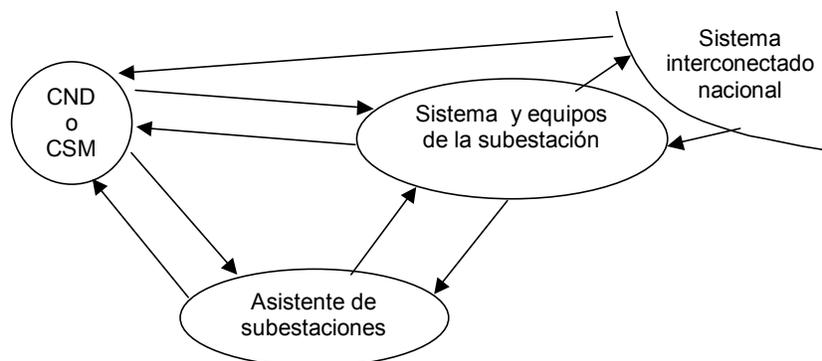


Figura 62: Estructura causal entre operadores y los sistemas

Así, la función del operario consiste en la toma de decisiones. Por ello, debe tener conocimiento preciso del sistema sobre el que va actuar y una visión global del estado del sistema completo, pues sus acciones o intervenciones afectan al todo. El nuevo rol del asistente de la S/E, entonces, requiere de nuevas y mejores destrezas en el seguimiento y modificación de los parámetros de la subestación, el conocimiento de los procedimientos establecidos, los alcances y las restricciones de dichos procedimientos, y las destrezas que le permitan la actuación rápida en el momento de actuar.

Las tareas básicas que realiza el asistente de subestación son: supervisar, administrar, operar, controlar, interpretar y diagnosticar. Las nuevas acciones que realiza, les permiten realizar el seguimiento de las señales de tensión de control de los equipos de

patio, realizar acciones ante alarmas, realizar maniobras sobre la configuración tanto de servicios auxiliares como de equipos de patio y realizar ciertas actividades de mantenimiento.

Por lo tanto, la estructura del sistema que se plantea debe tener en cuenta todos estos factores para que pueda lograr su objetivo: facilitar la labor de entendimiento y manejo de los procedimientos operativos. Esta estructura es la base para la construcción de paquetes de “software” para los operadores de subestaciones con interfases que permitan y faciliten la familiarización, capacitación y entrenamiento en los fenómenos que caracterizan el comportamiento de las subestaciones de transmisión, a través de la experimentación.

La estructura comprende los componentes y sus relaciones, así como su funcionamiento básico correspondiente a los objetivos de la simulación. Además estos componentes están relacionados con características o divisiones del sistema en cuestión; la operación de las subestaciones.

### **5.3.1. PROPÓSITO DEL SISTEMA**

El Propósito del Sistema es contribuir al “Programa de Capacitación y Evaluación” de Interconexión Eléctrica S.A. E.S.P., para que el desempeño del rol “asistente de operación de la subestación” alcance el nivel de madurez deseado.

La creación de una visión sistémica es necesaria para dar inicio a la presentación del proyecto. Sin embargo, se considera que éste es el inicio de un continuo proceso de investigación acción, mediante el cual se brinden soluciones a las necesidades que enfrenta ISA.

Una vez expuestas las principales ideas sobre las que se edifica el proyecto de investigación, es necesario recurrir a los conceptos teóricos relacionados con la operación y atención de fallas de subestaciones que serán los contenidos que, el usuario del sistema de capacitación, entrenamiento y simulación, deberá adquirir.

Para evaluar los conocimientos del usuario del sistema, se llevará a cabo un proceso de evaluación continua, en la que el sistema brindará indicadores para la estimación de su desempeño, en la aplicación de los conocimientos, las habilidades y las destrezas, en situaciones de operación semejantes a las reales.

Con base en las ideas de sistemas expuestas, la recopilación de conceptos de operación y atención de fallas de subestaciones de transmisión de energía, y la formación de personal con base en competencias laborales, se ha desarrollado una imagen que permite tener una visión general que permite plantear una estructura para el sistema que permita la solución de la situación problema que enfrenta ISA E.S.P. Esta estructura y una extensión de los sistemas que la comprenden se presentan en el apartado que sigue.

### 5.3.2. MODELO DEL SISTEMA Y DE SUS COMPONENTES

Como se ha visto hasta el momento, la simulación es una herramienta muy utilizada para el entrenamiento en la operación de los sistemas. Sin embargo, una de las etapas más complejas en el proceso de simulación es la realización del modelo o la representación de las características de interés del sistema.

#### 5.3.2.1. Primeras aproximaciones al sistema

Dentro del desarrollo del trabajo se tomaron percepciones del sistema de simulación requerido que cumpliesen con los objetivos planteados y las necesidades del sistema eléctrico, teniendo en cuenta puntos de vista y referencias diferentes. Inicialmente, se planteó una estructura que contemplaba tres elementos básicos: el sistema educacional, el modelo de la subestación y el sistema de evaluación en un esquema de relación lineal como se observa en la Figura 63. Este modelo tenía como referencia el sistema de entrenamiento de operadores de red planteado en [33].

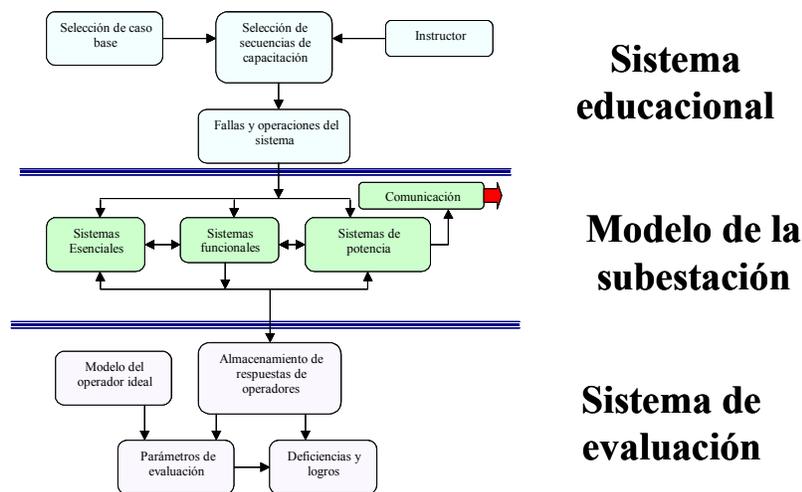


Figura 63: Modelo Inicial Proyecto Simulador

El Sistema Educacional permitía registrar y administrar las necesidades de formación del Asistente de subestaciones. En el caso de consignas se encuentra la secuencia de actividades y prácticas a desarrollar por el operador con el fin de adquirir y afianzar, destrezas y habilidades necesarias para la operación de subestaciones.

El Modelo de la Subestación Eléctrica representa los sistemas físicos de una subestación. El modelo permite entre otras actividades: configurar la subestación, realizar maniobras en los equipos de patio y modificar la configuración de los elementos de la subestación.

El Sistema de Evaluación se encarga de registrar las acciones del asistente de subestaciones y de compararlas con parámetros establecidos para hacer una

ponderación de las necesidades de capacitación, es decir de las deficiencias y de los logros de los usuarios.

Este modelo presenta una flexibilidad limitada, por lo cual se realizó una nueva estructura del modelo funcional “sistema simulador”.

En esta nueva estructura (ver Figura 64) se incluyen más detalles y causalidades de la problemática operativa de las subestaciones eléctricas y de la empresa ISA Interconexión Eléctrica S.A [11].

La estructura del modelo está compuesta por cuatro grandes bloques que integran el sistema: Componente Administración (C1), Componente Competencias (C2), Componente Consignas (C3) y Componente Formación (C4) [11].

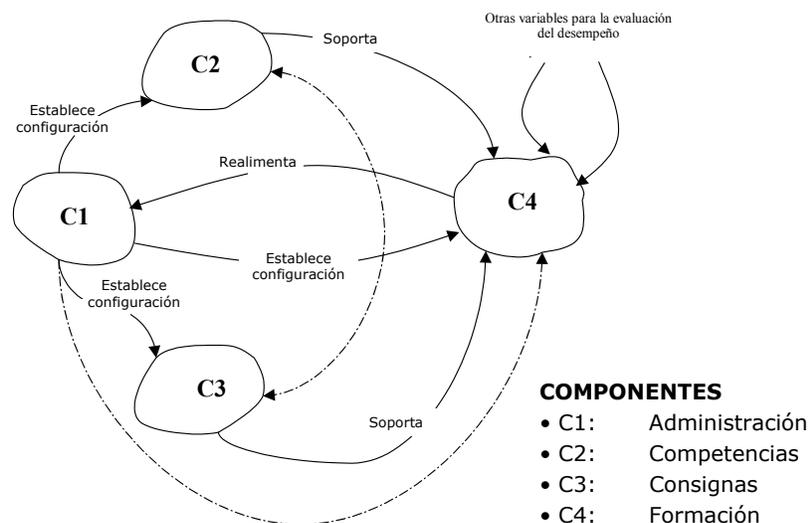


Figura 64: Diagrama General de Componentes del Sistema

Sin embargo, este modelo presenta una gran complejidad, por lo cual se definió una estructura un poco más sencilla que integra algunas de las características de este modelo y permite el desarrollo de los primeros prototipos de simulación, y que se presenta a continuación.

### 5.3.2.2. Estructura implementada

La estructura actual del modelo para la simulación y entrenamiento de asistentes de subestaciones eléctricas se observa en la Figura 65 que corresponde a una simplificación de la estructura anterior, reduciendo las relaciones que tienen menor implicación de la actividad operativa. Las características de esta estructura son: claridad en los elementos que intervienen, simplicidad en su relación e inclusión de los sistemas esenciales en la

labor de entrenamiento de los operadores, lo ideal (competencias necesarias) y la práctica (el sistema de simulación y los procedimientos operativos).

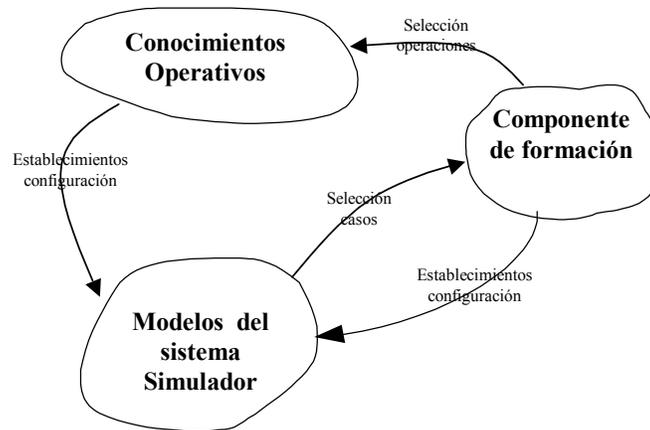


Figura 65: Estructura del sistema de simulación de procesos operativos

En este modelo se pueden ver tres grandes sistemas: el Sistema de Conocimientos Operativos, el Sistema de Formación y el Modelo del Sistema (simulador). En la Figura 66 se muestra un esquema completo y detallado del modelo funcional.

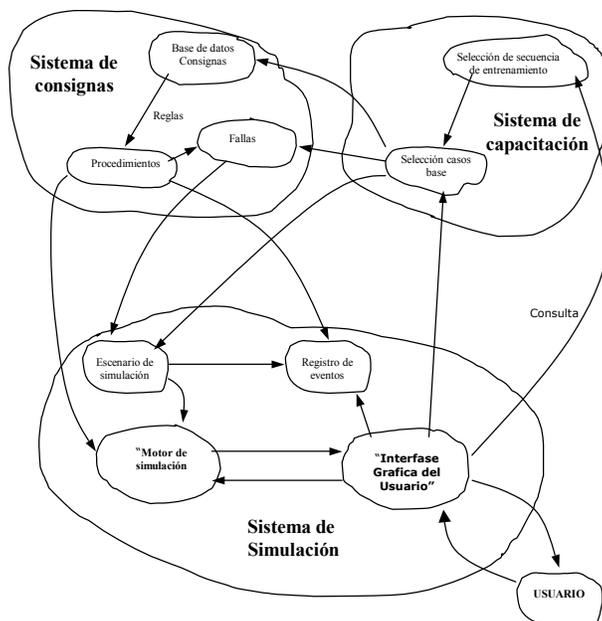


Figura 66: Modelo Funcional Proyecto Simulador

El Sistema de Simulación se encarga principalmente de representar el funcionamiento y la representación de los componentes de las subestaciones eléctricas. Está conformado por

cuatro componentes: el Motor de simulación, la GUI, el Sistema de escenarios de simulación y el sistema de registro, los cuales se describen a continuación.

**Motor:** Incluye el modelo de la subestación, el cual presenta una abstracción de la subestación, necesaria para la realización de los procedimientos de las Consignas. Está conformado por pequeños modelos que representan el funcionamiento de cada elemento de la subestación. Interactúa con la GUI permitiendo el cambio de estado de los elementos del modelo, y a su vez actualiza la GUI con los estados de los elementos del modelo.

**Escenarios de Simulación:** Establece el estado que tendrá cada uno de los elementos que conforman la subestación. Esta configuración es cargada dentro del Motor y almacenada en el sistema de Registro.

**Sistema de Registro:** Se encarga de registrar las acciones que realiza el usuario, los procedimientos de los casos base, y los valores iniciales del escenario de simulación.

**GUI:** Permite al usuario la interacción con el sistema de simulación y la visualización física de cada uno de los elementos modelados de la subestación. Además, a través de ella se puede cambiar el estado de los diferentes elementos del modelo de la subestación eléctrica.

El Sistema de Consignas se encarga del manejo, representación y soporte de las consignas. Contiene la estructura que permite la representación y manejo de los conocimientos operativos. Está constituido por:

**Base de datos de Consignas:** Su función principal es el almacenamiento de las consignas de la subestación.

**Procedimientos:** Este mecanismo abstrae de las consignas, la secuencia de pasos a seguir y los elementos que intervienen.

**Fallas:** Se encarga de identificar para una consigna, las fallas que pueden originar la pérdida de operabilidad de la subestación o que pueden arrancar una alarma.

El Sistema de Entrenamiento se encarga del manejo de las competencias de los operadores de las subestaciones. Está constituido por:

**Selección de secuencias de Entrenamiento:** El propósito principal de esta parte del sistema, es la selección de la secuencia de consignas a presentar al asistente de operación, necesarias para que adquiera cierta destreza o habilidad.

**Selección del caso base:** Particulariza la secuencia de consignas y los posibles escenarios que ayuden al incremento de destrezas y habilidades.

Esta estructura del sistema de simulación de procesos operativos no solo requiere de un modelo de simulación de las subestaciones eléctricas, sino que requiere una estructura para el manejo de los componentes básicos del sistema de formación y capacitación del personal, soportadas en las competencias laborales que maneja ISA, y una estructura para la implementación y soporte de los procedimientos operativos de las subestaciones que contemplan en gran parte la experiencia del personal en la operación, con los criterios planteados en el capítulo cuatro.

Antes de entrar en detalle en los elementos que integran el sistema, es necesario aclarar aspectos conceptuales del modelo de simulación. Paralelamente en [11] se presenta una descripción detallada de la funcionalidad, la arquitectura y el lenguaje de implementación de los prototipos de prueba del sistema que se implementaron.

#### **5.4 MÓDULO DE SIMULACIÓN: MODELO DEL FUNCIONAMIENTO DE UNA S/E**

Para la construcción del modelo del sistema de la subestación se tomó como base la desagregación funcional presentada en el capítulo uno, en donde se presentó una relación bien definida de sus sistemas.

La función principal de una Subestación de Conmutación es la de conectar y desconectar diferentes puntos del Sistema Eléctrico. Dicha tarea se realiza a través de los interruptores y seccionadores, además debe posibilitar la seguridad y confiabilidad del Sistema Interconectado ante perturbaciones de los parámetros de tensión y corriente a través de los Sistemas de Protecciones. Para ello, el sistema de la subestación está dividido en elementos claramente definidos con funciones e interrelaciones definidas en el momento de su diseño.

El sistema de la subestación es gobernado por subrutinas (consignas de operación) y se enfoca en identificar las actividades y las condiciones bajo las cuales las actividades pueden realizarse. El modelo de la subestación necesario para la realización de consignas debe incluir la lógica de control, la realización de los procesos operativos de los asistentes de subestaciones y los operadores del CND y la presentación de fallas en los equipos en los casos que permite la realización de maniobras. El modelo debe permitir las acciones que realiza el asistente de subestaciones y reflejar las implicaciones y consecuencias en el estado del sistema, estas cosas son de importancia para el operador pues son las que debe chequear y en las cuales él puede tomar decisiones. En la Figura 67 se observan los sistemas que conforman el modelo con el cual se ha representado la Subestación.

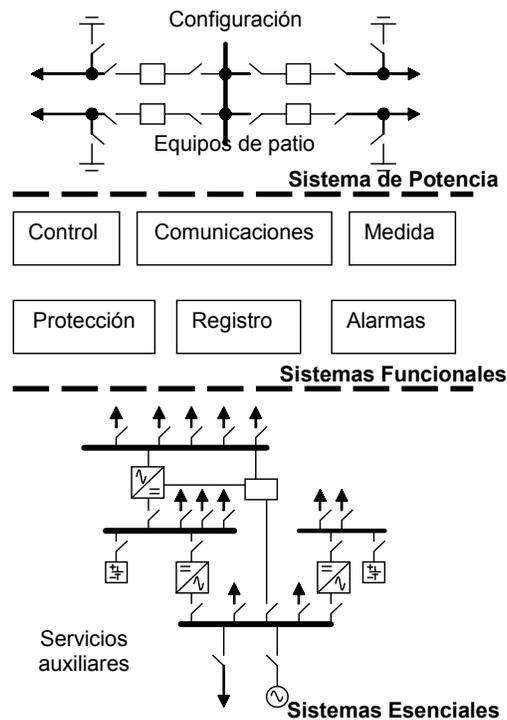


Figura 67: Estructura general del modelo de la subestación.

Como consideración general para el funcionamiento del modelo, no se tienen en cuenta los parámetros de tensión y de corriente en el tiempo. Como parámetro de estado del modelo se toma la tensión que permite la presentación de las condiciones de los equipos y de los sistemas. Lo anterior, debido a que desde el punto de vista de los operadores de subestaciones, el comportamiento en el tiempo de los parámetros de tensión y de corriente que puede presentar el sistema eléctrico no es de interés dadas las necesidades de la simulación, y a la rapidez en el cambio normal de la tensión (presentan un ciclo en 16 milisegundos) y los sistemas de protecciones y registro de fallas se encargan de responder a las variaciones anormales de éstos. Por ello, los operadores no requieren analizarlos para tomar decisiones operativas.

A continuación se estudia y modela el funcionamiento, la caracterización y el establecimiento de relaciones para representar las características operacionales de una subestación de transmisión. Teniendo en cuenta que el modelamiento se pretende usar para el simulador, como instrumento pedagógico para reforzar los procedimientos operativos. De igual manera se plantea la estructura del módulo de simulación.

#### 5.4.1. SISTEMA DE POTENCIA

El sistema de potencia de la subestación es la parte que se relaciona con las funciones de flujo de potencia, corte de corriente y seccionamiento de equipos o áreas de la subestación. Desde el punto de vista de simulación las características relevantes para la simulación de los procedimientos operativos son la energización o desenergización de

líneas, el cambio de elementos de corte y los posibles arreglos que puede permitir una configuración dada. Por tanto, el modelo del sistema de simulación se compone de los siguientes elementos.

#### **5.4.1.1. Configuración**

Se llama configuración al arreglo que presentan los equipos que se encuentran en el patio de la subestación. Los equipos que conforman la configuración de la subestación son: las líneas de transmisión, los interruptores, los seccionadores, las barras, los transformadores de medida, los pararrayos y las trampas de onda. Estos equipos se conectan de diversas formas para formar configuraciones como las que se muestra en el anexo A.

La configuración se puede ver, desde el punto de vista eléctrico, como elementos de entrada y salida asociados a áreas de la subestación (líneas de transmisión, puestas a tierra, alimentadores de transformadores, etc.) es decir, la configuración representa los nodos de un circuito, donde el número de salidas o entradas están determinados por el estado de los equipos de seccionamiento y corte de las áreas. La configuración y el estado que tienen sus equipos (abiertos o cerrados) determinan los flujos de corriente que circulan en el sistema y las condiciones de tensión tanto de los nodos como de los equipos de la subestación, el cambio de estado de estos equipos produce cambios en los flujos de energía en el sistema interconectado al que se asocia la subestación.

Las corrientes que circulan por las líneas y las tensiones de los equipos están determinadas por modelos circuitales simples tomados a partir de la configuración. Estos modelos dependen del estado de los equipos y se utilizan para realizar el flujo de carga que determinan las corrientes y tensiones de la subestación. Las tensiones y corrientes que circulan en los equipos de potencia tienen las características de los sistemas sinusoidales trifásicos con frecuencia de 60 Hz, y varían en el tiempo dependiendo de las condiciones de carga del sistema, las características a representar de la configuración en la simulación permiten su simplificación, ya que allí se utilizan parámetros de tensión y corriente en estado estable, suministrados por equivalentes monofásicos del sistema y con parámetros de los elementos obtenidos de los perfiles de carga.

El modelo de la configuración debe mostrar el estado de los equipos y debe reflejar las relaciones asociadas a las conexiones que determinan la topología de una subestación. El modelo debe representar, de igual manera, el cambio que se tiene en los flujos de corrientes y las condiciones de la configuración que se produce mediante la realización de una operación de cualquiera de los equipos. Para construir el modelo de la configuración se tienen dos modelos básicos que permiten representar sus equipos. El primero permite simular las líneas (generación o carga) y los elementos de conexión de los equipos (cables y barras). El segundo modelo permite representar los interruptores y los seccionadores. Estos modelos se particularizan para representar las características de los equipos de la subestación y se relacionan para representar la conexión de la configuración de la subestación.

## Modelo A (cables)

El modelo A permite representar las líneas y los elementos de conexión como cables y barras; permite la simulación de las características básicas de estos elementos dado que su funcionalidad es la misma, conducir la corriente eléctrica y presentar caídas de tensión nulas. El modelo se define mediante una variable booleana que representa el estado del elemento (operación/falla) y una regla que define el flujo de tensión y de corriente: si el equipo se encuentra en buen estado (no se encuentra averiado) las salidas de tensión y de corriente son las mismas que las de entrada. Estas condiciones se observan en la Figura 68, y permiten el seguimiento de la señal de tensión a través de los equipos, el manejo de las variables básicas de la configuración (las tensiones en los equipos y las corrientes en las ramas) y la representación de las condiciones de la configuración de la subestación.

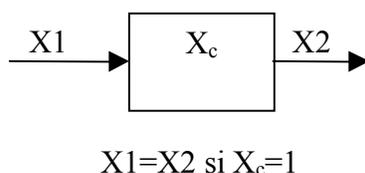


Figura 68: Representación matemática de los cables

## Modelo B (Interrupción)

El modelo B permite representar los elementos de seccionamiento y corte de la configuración gracias a que estos elementos cumplen la misma función, permitir o interrumpir el flujo de las señales de tensión y corriente. El modelo se define mediante dos variables booleanas, que representan el estado (abierto/cerrado) y la condición de operación (operación/falla); y una regla que define el flujo de tensión y corriente entre los elementos que conecta. En la Figura 69 se observa la representación de este elemento que permite la representación de seccionadores y de interruptores.

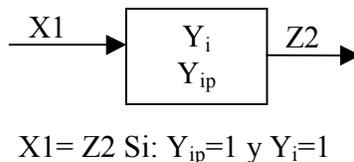


Figura 69: Representación del modelo B

En la Figura 69 se tiene que las dos variables  $X1$  y  $Z2$  representan las tensiones que provienen de los elementos a los cuales están conectados, la variable  $Y_i$  representa el estado interno del interruptor (bueno o malo) que estaría asociado a fallas en los

mecanismos del interruptor; la variable  $Y_{ip}$  representa la posición del interruptor (abierto/cerrado), esta variable es controlada por su sistema de control (el sistema de control nivel cero); en la relación de igualdad entre los valores de entrada y salida prevalece el dominio de la variable de mayor valor y modifica el estado de los elementos a los cuales está conectado.

#### **5.4.1.2. Interruptor**

Los interruptores permiten controlar el flujo de corriente dependiendo de las condiciones de las bobinas de control. Su modelo está conformado por la parte de control y la parte de la configuración. La parte de la configuración está dada por el modelo básico B (ver Figura 69) en donde las dos variables  $X1$  y  $Z2$  representan las tensiones que provienen de los elementos a los cuales están conectados, la variable  $Y_i$  representa el estado interno del interruptor (bueno o malo) que estaría asociado a fallas en los mecanismos del interruptor; la variable  $Y_{ip}$  representa la posición del interruptor (abierto/cerrado), esta variable es controlada por la representación del control que se especifica en la representación de los sistemas funcionales (sistema de control nivel cero); en la relación de igualdad entre los valores de entrada y salida prevalece el dominio de la variable de mayor valor y modifica el estado de los elementos a los cuales esta conectado.

#### **5.4.1.3. Seccionadores**

Desde el punto de vista funcional, estos equipos no tienen la capacidad de interrupción de corriente. Como se está trabajando el modelo con base en la señal de tensión como parámetro característico, el modelo del Seccionador en la configuración se asemeja al del interruptor y está soportado por el modelo B (ver Figura 69). Las variables  $X1$  y  $Z2$  representan la tensión de los elementos a los cuales está conectado, la variable  $Y_s$  representa el estado interno del seccionador (bueno o malo asociado a fallas en sus mecanismos de accionamiento), la variable  $Y_{sp}$  representa la posición del seccionador (abierto/cerrado) que se controla a través de su sistema de control. La regla de igualdad presenta dominio de la variable de mayor valor y modifica el estado de los elementos a los cuales está conectado.

#### **5.4.1.4. Barras**

Las barras son los elementos de conexión de las líneas, eléctricamente representan un nodo. El modelo a utilizar para la representación de las barras es el modelo del cable con múltiples entradas, la regla de igualdad se realiza para afectar las entradas o salidas de los elementos a los cuales está conectada. Esta regla presenta una predominación de la variable que presenta mayor tensión, es decir que a las demás variables de salida se les asignará este valor, equivalente a una tensión homogénea para todos los elementos conectados a ella.

#### **5.4.1.5. Líneas**

Las líneas son los elementos que proporcionan la conexión de la subestación con los demás elementos del sistema Interconectado, se pueden tener dos clases de líneas que son preponderantes para el estado de la configuración, las asociadas a centrales generadoras o alimentación de energía y las asociadas a cargas (estas condiciones pueden cambiar; en ciertos momentos una línea puede alimentar la subestación y en otro puede estar recibiendo energía de la misma). Las líneas asociadas a centrales generadoras presentarán tensiones y frecuencias constantes, en las asociadas a cargas, la tensión y la frecuencia dependerán del estado de la configuración. Los valores de tensión y frecuencia son las entradas o salidas de la configuración para el sistema de potencia.

#### **5.4.1.6. Puestas a tierra**

Las puestas a tierra posibilitan la descarga de energía del sistema, el modelo de estos elementos son parámetros de tensión y de corriente fijos e iguales a cero y la tensión predominante en la relación de igualdad de las variables de entrada y salida es la de tensión cero.

#### **5.4.1.7. Transformadores de tensión**

Los divisores de tensión capacitivos y los transformadores (magnéticos) de tensión, agrupados como transformadores de tensión, son los elementos encargados de capturar las tensiones del sistema. El modelo de este elemento presenta una relación constante entre la tensión de entrada y la tensión de salida en la misma forma que el modelo ideal del transformador.

#### **5.4.1.8. Consideraciones generales del modelo del sistema de potencia**

Para el modelo de la parte de potencia se ha tenido en cuenta como parámetro de estado la tensión del sistema y se han despreciado, en primera instancia las corrientes en las líneas.

Las corrientes en las líneas son indispensables para representar los flujos de potencia del sistema y recrear las características del sistema de medida y de otros sistemas de la subestación. Por lo tanto es necesario realizar un algoritmo que permita simular estas condiciones a través del establecimiento de los equivalentes de Thévenin de las líneas que se conectan a las barras.

#### **Tensión de los equipos dependientes de los estados del sistema**

La configuración de una subestación se puede representar interconectando los modelos de interruptores, líneas, etc., de la misma forma como se conectan en la subestación. Los

valores de tensión de los equipos dependen de la topología y de los estados (abiertos/cerrados). Cada vez que ocurra un evento (cambio de estado de la configuración) se actualiza el estado mediante el procedimiento que se presenta en la Figura 70.

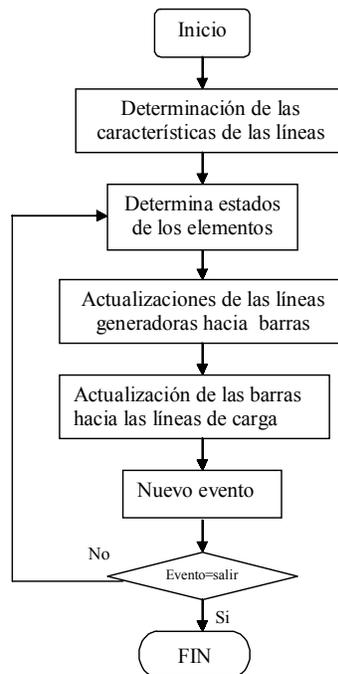


Figura 70: Procedimiento seguido para actualizar el parámetro de tensión en la configuración

Este procedimiento se inicia con la determinación de las características de las líneas, para especificar cuales líneas se comportan como generadores y cuales como cargas.

Continúa con la determinación de los estados de los elementos. Los cuales se inicializan en el escenario de simulación o se pueden cambiar en el proceso de simulación mediante la acción del usuario del sistema o del sistema de procedimientos operativos.

Determinado el estado de los elementos y las características de las líneas, se continúa con la actualización del parámetro de tensión siguiendo los caminos de conexión de las líneas generadoras hacia las barras.

Determinado el estado de las barras, se actualizan los parámetros de tensión del resto de elementos, desde las barras hacia las líneas de carga siguiendo su conexión.

Realizados los procedimientos anteriores se espera la ejecución de un evento nuevo y si es diferente al de "Salir" se continua en el procedimiento de actualización de los elementos y nuevamente se realiza el procedimiento anterior.

## Definición de los flujos de corriente por las líneas

La definición de corrientes que circulan por cada rama de la subestación depende de las características de las líneas y de las condiciones topológicas de la configuración.

El cálculo de los flujos de corriente se realiza mediante los procedimientos que se presentan en el diagrama de flujo de la Figura 71.

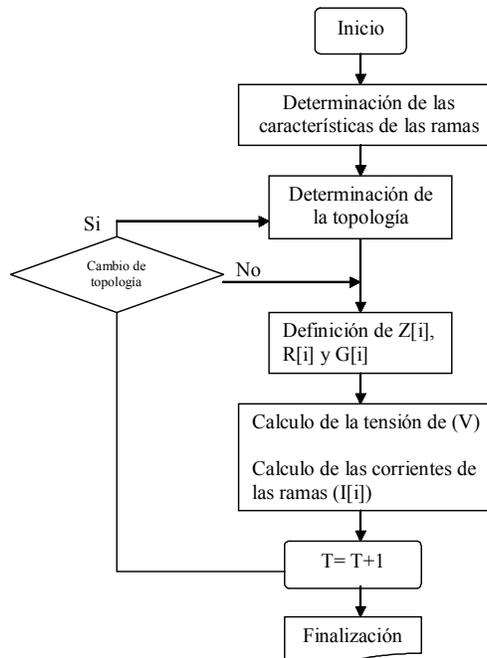


Figura 71: Procedimiento para especificar los flujos de corriente en las líneas

El primer paso que se realiza es la determinación de las características de las líneas. Estas características dependen de las necesidades o condiciones que requiere el escenario de simulación. Para ello se determinaron los perfiles de cargas que en la simulación representan escenarios encaminados a adquirir destrezas específicas o presentar la actuación de sistemas que necesitan condiciones específicas para revisar su funcionamiento. Obligatoriamente se necesita que al menos una línea sea especificada de generación.

Los perfiles de carga se definen mediante vectores de impedancia. Estos se determinan con base en las necesidades de la simulación, cada perfil de carga se seleccionó a partir de un análisis del comportamiento de las líneas de la subestaciones, de las necesidades de representar ciertas características de los sistemas funcionales de la subestación y de las destrezas que se requiere desarrollar en el operador de subestaciones. En la Figura 72 se presentan las gráficas de un perfil de carga en un periodo de 24 horas asociado a una sobrecarga en la línea.

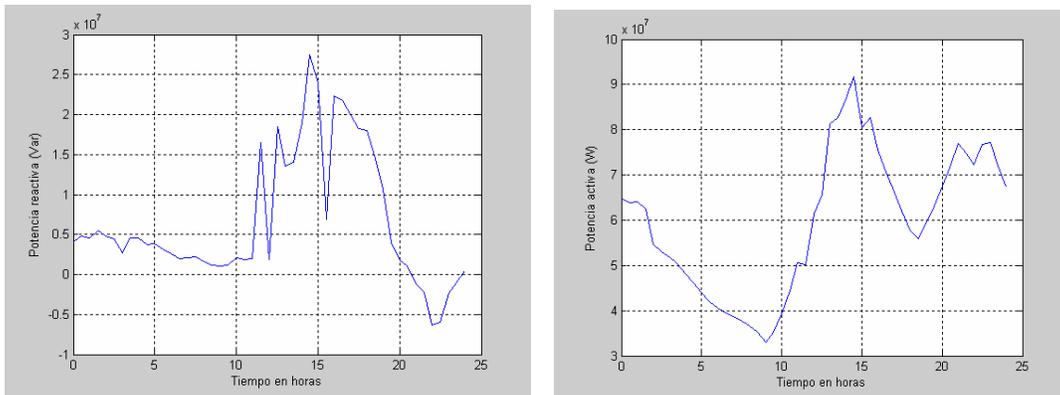


Figura 72: Perfil de carga asociado a una salida en una subestación

Estos perfiles de carga proporcionan el siguiente modelo de impedancia para la caracterizar la línea con el perfil de carga anterior.

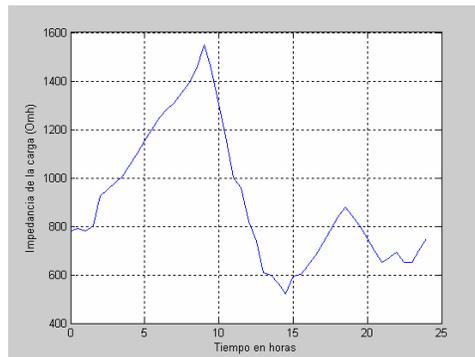


Figura 73: Impedancia que representa el perfil de carga de la figura anterior

Determinadas las características de las líneas se define el modelo eléctrico de la subestación. Este se encuentra determinado por la configuración de la subestación y el estado de las áreas (conjunto de seccionadores e interruptores que representa una entrada o salida de la subestación). El circuito equivalente utilizado para la abstracción del sistema interconectado al que pertenece la subestación se muestra en la Figura 74.

El número de ramas en paralelo depende del estado de la configuración y el número total de ramas y de circuitos depende de la configuración. Una subestación de doble barra con transferencia, dependiendo de su estado se representaría en cierto momento por dos circuitos es decir dos nodos en caso que el interruptor de acople se encuentre abierto. Las ramas en paralelo corresponden a las impedancias que representan los perfiles de carga que se han dado a las líneas según el escenario de simulación.

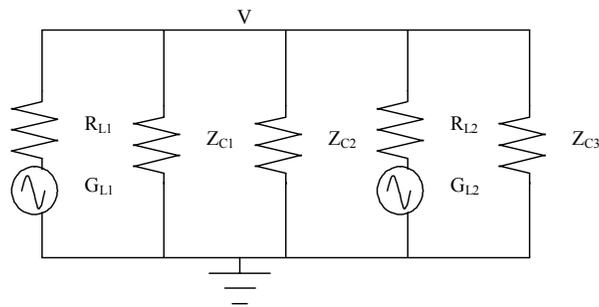


Figura 74: Modelo circuital para determinar los flujos de corriente

En una configuración dada, y con el estado de sus elementos de seccionamiento y corte, se hallan los valores de tensión de nodo que servirá para definir las tensiones de los equipos de la subestación y las corrientes que circulan por las ramas o líneas, los cuales se determinan del modelo circuital de la siguiente manera.

Para determinar el valor de la tensión de nodo se soluciona la siguiente ecuación:

$$V \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \dots + \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} \dots \right) = \frac{V_{G1}}{R_1} + \frac{V_{G2}}{R_2} \dots$$

$$V = \frac{\frac{V_{G1}}{R_1} + \frac{V_{G2}}{R_2} \dots}{\left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \dots + \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} \dots \right)}$$

Determinada la tensión de nodo (tensión de los equipos de la configuración), las corrientes de las líneas están definidas por:

$$I_i = \frac{V}{Z_i}$$

Los perfiles de cargas de las líneas se pueden especificar en los escenarios de simulación asignando el perfil de carga adecuado para la cesión de simulación.

Si en la configuración hay algún cambio que ocasiona el cambio del modelo circuital de la subestación, se modifican los valores de impedancias y se continúa la secuencia planteada en el diagrama de flujo de la Figura 71.

Este modelo del sistema de potencia permite que se puedan introducir cambios, pensando en la posibilidad de representar características de la subestación, en las cuales

las variaciones en el tiempo de los parámetros de tensión y corriente sean significativas (protección, medida, etc.). Estos parámetros pueden ser representados por modelos trifásicos así: las líneas asociadas a centrales generadoras se representarían por fuentes de tensión trifásica balanceada alimentando las líneas, asociadas a cargas variantes en el tiempo, y los elementos de la configuración se representarían como elementos ideales (resistencia cero o infinita) dependiendo del estado.

#### **5.4.2. SISTEMAS FUNCIONALES**

Los Sistemas Funcionales agrupan los equipos y subsistemas que le brindan diferentes características a la subestación y que tiene un grado de complejidad creciente desde el punto de vista físico y funcional. Estos sistemas son: control, protecciones, alarmas, registro de fallas, medida y comunicaciones.

##### **5.4.2.1. Sistema de Protecciones**

Los Sistemas de Protecciones de las Subestaciones son sistemas bastante complejos, compuestos en su mayoría por relés digitales de última tecnología. Esta complejidad está dada en función de la configuración de la subestación; el sistema de protecciones de una configuración de barra sencilla es más simple que el de una de doble barra. Sin embargo, la simplicidad que presentan los procedimientos operativos permite que su modelo se simplifique.

Las acciones operativas en el sistema de protecciones pueden ser de dos clases: procedimientos de fallas de los relés y procedimientos que se realizan cuando actúan en condiciones normales a su función (fallas en los parámetros de tensión o corriente). Los primeros establecen el seguimiento y manipulación del “software” de los relés para chequear su fijación, las funciones y las fallas del equipo. Los segundos se encargan de describir los casos en los cuales se activan, la serie de acciones o efectos que trae la actuación de una protección. Por lo tanto, las consignas de protecciones son informativas, y remiten al Asistente de Subestaciones al chequeo de las señales y software de los relés, y al registro y reposición de los relés activados.

Como ejemplo, dentro de los procedimientos de fallas del sistema de protecciones se tiene: Falla relés de protección principal 1 y 2, Alarmas (Disparo sobre tensión, Disparo PL1 o PL2, Disparo protecciones complementarias), Operación de recierre, Falla comunicaciones PL1 ó PL2, Falla polaridad protecciones, entre otras.

El modelo del sistema de protecciones, más que proporcionar las señales de tensión y de corriente y la lógica de operación, debe representar la activación de los relés y las acciones que realiza (los cambios de estados que originan la actuación de una protección en particular). Este modelo está relacionado, en mayor grado, con el sistema de alarmas.

El modelo básico del Sistema de Protecciones está constituido por cajas negras con las relaciones entre los Sistemas de la Subestación, como se observa en la Figura 75.

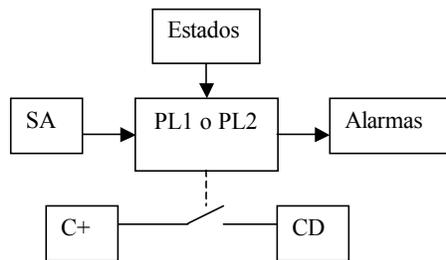


Figura 75: Protecciones Principales de Línea.

Las Protecciones Principales de Línea interactúan con el Sistema de Servicios Auxiliares (SA) que proporciona las señales de tensión para su operación. Asimismo, dependiendo de las condiciones de las señales de tensión y de corriente, las protecciones actuarán sobre los Interruptores, realizando su apertura o cierre a través de los Circuitos de Disparo (CD). Los estados, tanto del sistema como internos del relé, actuarán con las alarmas para registrar su actuación y comunicar al Asistente de Subestaciones el estado general.

Además de las protecciones que se encargan de registrar disturbios en los parámetros de tensión y corriente del sistema, se cuenta con protecciones especializadas para detectar fallas en los sistemas esenciales en el buen funcionamiento de la subestación y el sistema eléctrico. Dentro de estas funciones se tienen:

### **Discrepancia de polos en el interruptor**

Los interruptores de las subestaciones están compuestos por columnas monopolares, que tienen mecanismos y sistemas de control para la apertura y cierre independientes. Esto origina que se puedan presentar problemas en la simultaneidad del cierre o apertura en cada polo que causa el desbalance en los parámetros del sistema y afectar las condiciones normales del sistema. El sistema de protección que se encarga de evitar este problema es la discrepancia de polos y se encarga evitar el cierre o la apertura incompleta del interruptor.

### **Mecanismos de supervisión de interruptores**

Sobre los interruptores recae la responsabilidad de intervenir para que las fallas no afecten los equipos y el sistema, por esta razón requieren que contiguamente se estén comprobando sus condiciones de funcionamiento para que en el momento de ser requeridos puedan cumplir con su función. Los principios mecanismos que se encargan de esto son:

**Baja presión de SF6:** Este sistema lo presentan los interruptores que utilizan esta tecnología para la extinción de arco. Presenta dos etapas; la primera se activa cuando la presión de SF6 se encuentra por debajo de los 0.58 Mpa e indica la falla al sistema y al

operador, y la segunda actúa cuando la presión de SF6 se encuentra por debajo de 0.55 Mpa y originan la señal de alarma e imposibilita la apertura o el cierre del interruptor.

Mecanismos de actuación: estos sistemas se encargan de supervisar los mecanismos que producen la apertura o cierre. Los cuales en las subestaciones bajo estudio pueden ser mecánicos o neumáticos.

### **Protección diferencial**

El principio de funcionamiento de esta función de protección se basa en la diferencia de las entradas de corriente en un área o nodo determinados. Verifica la diferencia de flujos de corriente o potencia que entran al área de protección. Si la sumatoria es de estos flujos es diferente de una tolerancia, significa que hay fallas y se activa esta protección. Dentro de las principales funciones de protección diferencial de las subestaciones se tienen:

**Diferencial de barras:** Se activa por la diferencia entre las entradas y salidas de las barras y del control sobre los equipos de seccionamiento de estas. Si se activa debe dar la orden de apertura a los equipos de corte de las entradas asociadas a la barra.

**Diferencial de transformadores:** Realiza una verificación de las entradas y salidas de los transformadores teniendo en cuenta las relaciones de transformación, y actúa sobre el equipo de corte asociado, si hay una diferencia entre ellas.

**Diferencial de líneas:** Gracias al desarrollo de los sistemas de comunicaciones, es posible la implementación de esta función de protección en las líneas de transmisión puesto que de otra manera, dada la distancia entre los puntos de sensado, no sería posible.

### **Falla interruptor**

Esta función de protección se encarga de supervisar, controlar y sincronizar las fallas de los interruptores asociados a una subestación. Cada interruptor, a partir de la orden de disparo activa un temporizador con un tiempo preestablecido. Si cumplido el tiempo las señales de corriente continúan su tendencia (no se han eliminado la falla) esta función da la orden de disparo sobre los interruptores de respaldo.

### **Recepción de disparo**

Esta función está asociada al sistema de protecciones de las líneas, como las subestaciones deben estar coordinadas con las subestaciones adyacentes, a través de esta función se pueden acelerar los disparos ante fallas en las zonas de protecciones.

El diagrama general de protecciones asociado a un interruptor, en una subestación con transferencia se muestra en la Figura 76.

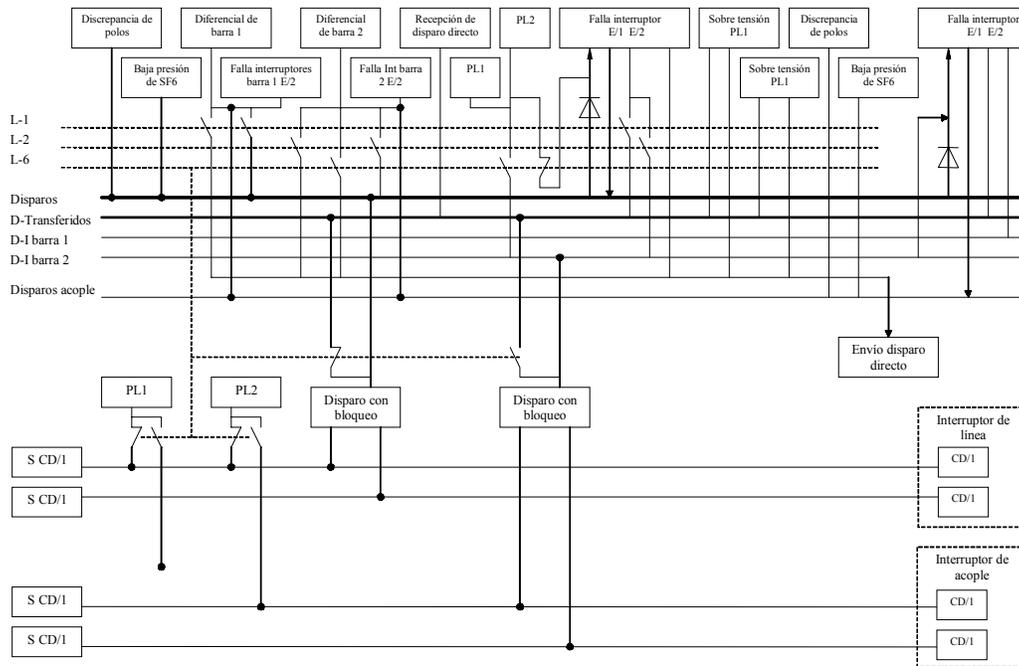


Figura 76: Esquema general de conexión del sistema de protecciones de la S/E

El modelo del sistema de protecciones se esquematiza en la Figura 77. En este modelo se presentan las principales funciones de protecciones y su relación con los sistemas de las subestaciones. Estas funciones se representan de igual forma al esquema presentado en la Figura 75, cada función se representa mediante su regla de actuación, tomando como entrada los parámetros de sensado (tensiones y corrientes del sistema) o las necesidades del sistema de entrenamiento y se relaciona con el sistema de servicios auxiliares, el sistema de alarmas y el circuito de control del elemento de corte (interruptor).

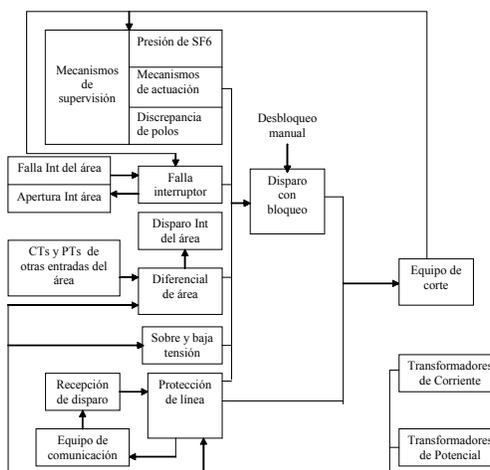


Figura 77: Modelo general del sistema de protecciones asociado a un elemento de corte

#### 5.4.2.2. Sistema de Medida

Las subestaciones de transmisión cuentan con contadores multifuncionales asociados a las Líneas de Transmisión y a los Sistemas de Servicios Auxiliares. Los contadores están conectados por una red independiente, compuesta por un concentrador, que constituyen la unidad de acceso a la red para la conexión y direccionamiento de los contadores de energía, de un “*modem*” para el acceso remoto a la red y de los conversores opto-eléctricos requeridos para realizar la conexión con el medio de comunicación usado en la red. Esta red está integrada al Sistema de Control Coordinado, permitiendo realizar la lectura y programación de forma remota.

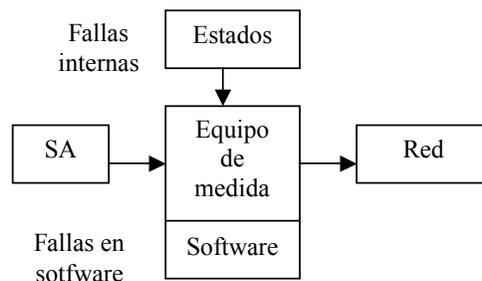


Figura 78: Estructura del Modelo de los Equipos de Medida

Los procedimientos operativos de falla hacen referencia a tres clases de fallas: fallas asociadas al “software” del equipo, fallas asociadas al “hardware” del equipo y fallas asociadas a las señales externas o a la red de contadores. Los modelos del sistema de contadores deben permitir la emulación de estas características de falla.

El modelo está compuesto por tres partes asociadas a las fallas que se pueden presentar: la primera parte establece las variables de estados de fallas que se activan al existir fallas internas del equipo, la segunda corresponde al software del equipo, y permite el acceso para poder realizar las revisiones y configuraciones necesarias de los equipos, y la tercera parte establece la alimentación proveniente del sistema de servicios auxiliares, las conexiones con los equipos de medida y la red de medidores. En la Figura 78 puede observar el diagrama de bloques de este modelo.

#### 5.4.2.3. Sistema de Alarmas

El sistema de alarmas de las subestaciones, se encuentra agrupado en áreas y se encarga de la señalización de las alarmas de los equipos que están asociados al área de la subestación. Estas alarmas se presentan en el panel de alarmas, compuesto en la mayoría de los casos por una matriz de diodos de señalización. Algunos de los elementos de señalización se activan por varias señales de alarmas.

Otra función del sistema de alarmas es presentar la actuación del sistema de protecciones. Cabe anotar que el sistema de alarmas está integrado al sistema de control

de la subestación y a los equipos controladores de campo. Sin embargo, en este modelo se ha desagregado con el fin de facilitar la representación de los procedimientos operativos y disminuir la complejidad del sistema de control.

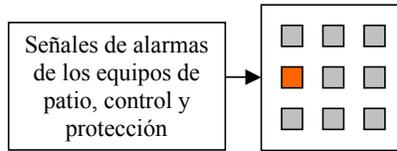


Figura 79: Esquema básico del Modelo de Alarmas

Algunas de las alarmas que se pueden presentar son: falla en las polaridades de los circuitos de disparo, disparo con bloque, discrepancia de polos, baja presión de SF6 etapas 1 ó 2, disparo falla interruptor, falla alimentación motor del seccionador, disparo sobre tensión, disparo PL1 o PL2, disparo protecciones complementarias, falla comunicaciones PL1 ó PL2, falla polaridad protecciones. Estas alarmas pueden diferir dependiendo de la subestación eléctrica.

#### 5.4.2.4. Sistema de Control

El sistema de control de la subestaciones está dividido por equipos que se encargan de controlar diferentes áreas de la subestación, permitiendo supervisar el funcionamiento y control de todo el sistema.

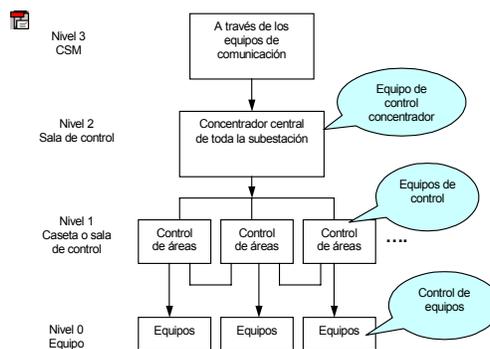


Figura 80: Jerarquización y estructura del sistema de control

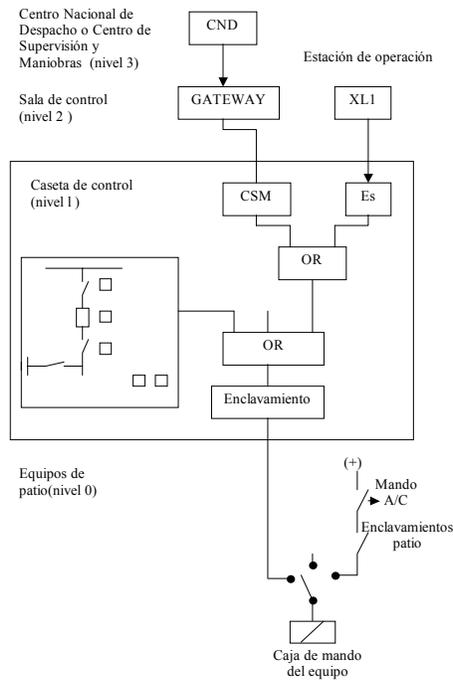


Figura 81: Modos de operación de sistema de control

### Nivel de Control Cero

**Sistema de control del interruptor:** El interruptor es el principal equipo de la subestación dada su función; esta función exige que tenga mandos unipolares independientes, alta confiabilidad en la apertura, y sensores que estén chequeando las condiciones de su operación. Esto hace que las consignas operativas y bajo falla permitan: diferentes puntos de control, la realización de maniobras en sus circuitos de control, la revisión de los equipos su supervisión y la revisión y toma de señales de los elementos de control.

Los interruptores poseen tres polos; cada polo tiene su sistema de control compuesto por dos bobinas de apertura asociadas a distintos relés de protecciones y control y una bobina de cierre. Estos a su vez están compuestos por: bobinas de apertura y cierre, “swiches” de enclavamientos, “swiches” de accionamiento y selectores de control. En la Figura 82 se puede ver el esquema general del interruptor y en la Figura 83 se detalla cada polo y se observa la relación que tienen con los elementos de la subestación.

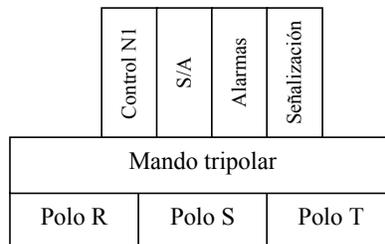


Figura 82: Esquema general del interruptor

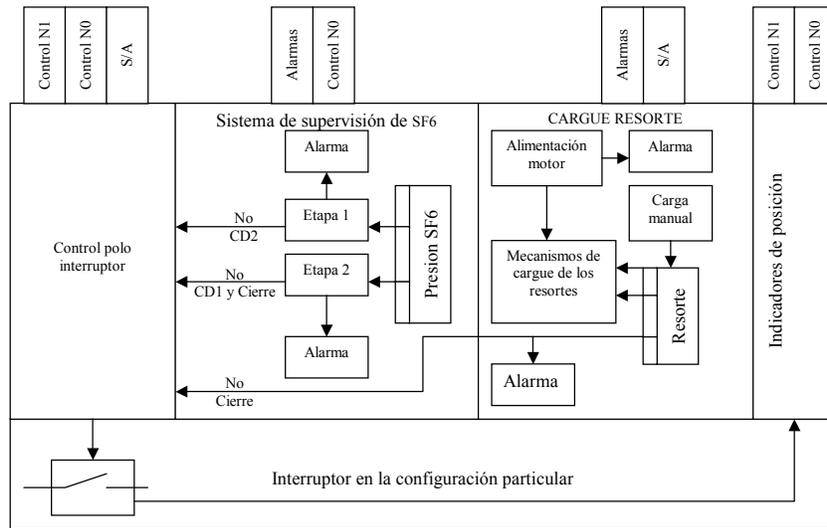
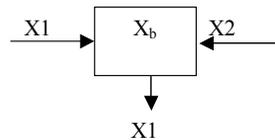


Figura 83: Diagrama funcional del polo del interruptor

El modelo del circuito de control se realiza mediante la conexión de los elementos de control que se modelan de la siguiente manera.

Bobinas de apertura y cierre: Las bobinas de apertura y cierre son los elementos electromecánicos que al energizarse activan las partes mecánicas de los interruptores mediante fuerzas magnéticas que generan el cierre o la apertura. El modelo matemático que representa el funcionamiento está dado por: una variable booleana que representa el estado del elemento (bueno o malo) y una regla que controla su función dependiendo de las condiciones internas de la bobina y sus entradas. Las entradas de la bobina son las señales del sistema de control (polaridades de control X1(+) y X2(-)), la salida del modelo especifica la condición del interruptor en la configuración de la subestación, cero para abierto y uno para cerrado dependiendo de la bobina que se esté representando (apertura o cierre), las reglas del funcionamiento se define mediante el estado de la variable interna de la bobina, y las variables de entrada tal como se presenta en la Figura 84.



Bobina de apertura	Bobina de Cierre
XI=1 Si:	XI=0 Si:
X <sub>b</sub> =1	X <sub>b</sub> =1
X1=+65V	X1=+65V
X2=-65V	X2=-65V

Figura 84: Representación de las bobinas

Selectores de control: Los selectores de control son conmutadores de tres posiciones que permiten seleccionar el modo de mando de los interruptores y seccionadores. Básicamente son elementos de múltiples entradas y una sola salida. La representación matemática esta dada por: tres variables de entrada provenientes de los sistemas de control, una variable de salida para el control de los equipos, una variable de entrada proveniente del operador de la subestación que define la condición (local, remoto o desconectado), y una variable que representa el estado del elemento (falla / normal). La regla que relaciona estas variables se puede ver en la Figura 85.

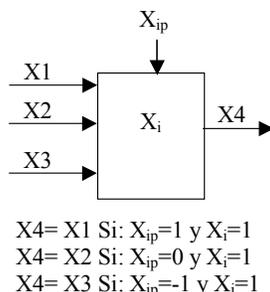


Figura 85: Representación de los selectores de mando

Interruptores pulsadores (apertura / cierre): Interruptores pulsadores (apertura / cierre): corresponden a los pulsadores por polo y por equipo que posibilitan a los asistentes de la subestación el control de los interruptores y seccionadores desde el nivel cero. Al ser accionados por el operador originan los pulsos de control que activan las bobinas de los interruptores y seccionadores. Mientras el operador mantenga accionado el pulsador, la variable de entrada es igual a la variable de salida, después que deje de accionarlo vuelve a las condiciones normales de operación. Su representación consta de una variable de entrada que correspondiente a la señal de tensión proveniente del sistema de control (X1), la variable de salida correspondiente a la señal de salida para las bobinas de control de los equipos (X2), la variable  $X_{ip}$  representa la acción del asistente y la variable  $X_i$  indica el estado del pulsador. La regla que representa su funcionamiento se observa en la Figura 86.

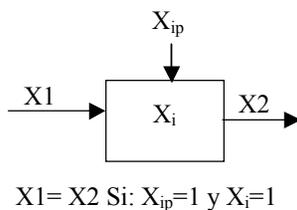


Figura 86: Representación del pulsador

Contactos auxiliares: El funcionamiento de los contactos auxiliares es igual que el de un interruptor, es decir que permiten la interrupción de corriente pero a menor escala, se diferencia en que su posición es gobernada por una bobina de control o un sistema de supervisión. El modelo de estos elementos es el mismo del modelo B en la configuración, la regla que relaciona su funcionamiento se presenta en la Figura 87.

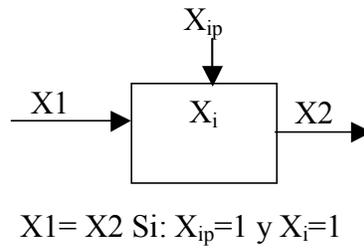


Figura 87: Representación de contactos auxiliares

El modelo del sistema de control del interruptor está compuesto por la integración de los modelos de los elementos del sistema de control, se construye mediante la conexión serie paralelo de estos modelos. En la Figura 88 se puede observar el esquema de control del circuito de control conformado por elementos simples, su representación se realiza mediante la conexión de los modelos elementales que lo componen.

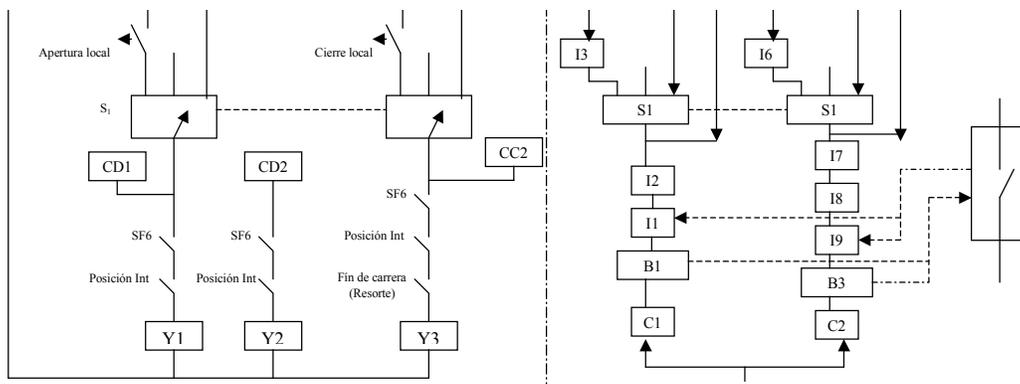
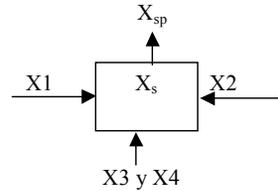


Figura 88: Diagrama de control de un polo de un interruptor y modelo de simulación

**Sistema de control del seccionador:** Los seccionadores desde el nivel de control del equipo (nivel cero) se pueden accionar mediante un motor de corriente continua o a través de una manivela manipulada por el asistente de la subestación que activa los mecanismos de apertura y cierre del equipo. Cuando se activa la manivela, el motor no ejerce ninguna acción sobre el equipo puesto que lo impide el enclavamiento con la manivela. El motor es controlado por los pulsadores que se encuentran en el gabinete de control. El modelo que representa este funcionamiento se compone de los mismos elementos del interruptor: interruptores pulsadores, contactos auxiliares, bobinas y selectores de control. Fuera de estos modelos básicos, es necesario representar el motor y la manivela de accionamiento con sus relaciones. El circuito de control del seccionador se construye de igual manera que en el modelo del circuito de control del interruptor.

**Motor del seccionador:** la representación del motor está dada por dos variables de entrada provenientes de las bobinas de control para la apertura y el cierre ( $X1$  y  $X2$ ), la variable interna que representaría el estado interno del motor, la variable de control ( $X_{sp}$ ) que

representa el estado del seccionador y las señales de tensión y de corriente proveniente del sistema de servicios auxiliares. La regla que define su funcionamiento se presenta en la Figura 89.



X1 Bobina de apertura  
 X2 Bobina de Cierre  
 X<sub>s</sub> Estado interno del motor  
 X<sub>sp</sub> Posición del seccionador  
 X3 y X4 alimentación del motor  
 X<sub>sp</sub>=0 Si: X2=1, X<sub>s</sub>=0 y tensión  
 X<sub>sp</sub>=1 Si: X1=1 y X<sub>s</sub>=0

Figura 89: Modelo del funcionamiento del motor del seccionador

Manivela: su representación está dada por dos entradas y dos salidas. Una de las entradas proviene de la activación de la manivela y la otra de su operación. Estas dos variables las controla el asistente de la subestación. Una de las salidas da el estado del seccionador, y la otra, el estado del contacto auxiliar en los controles de las bobinas del motor (representa el enclavamiento).

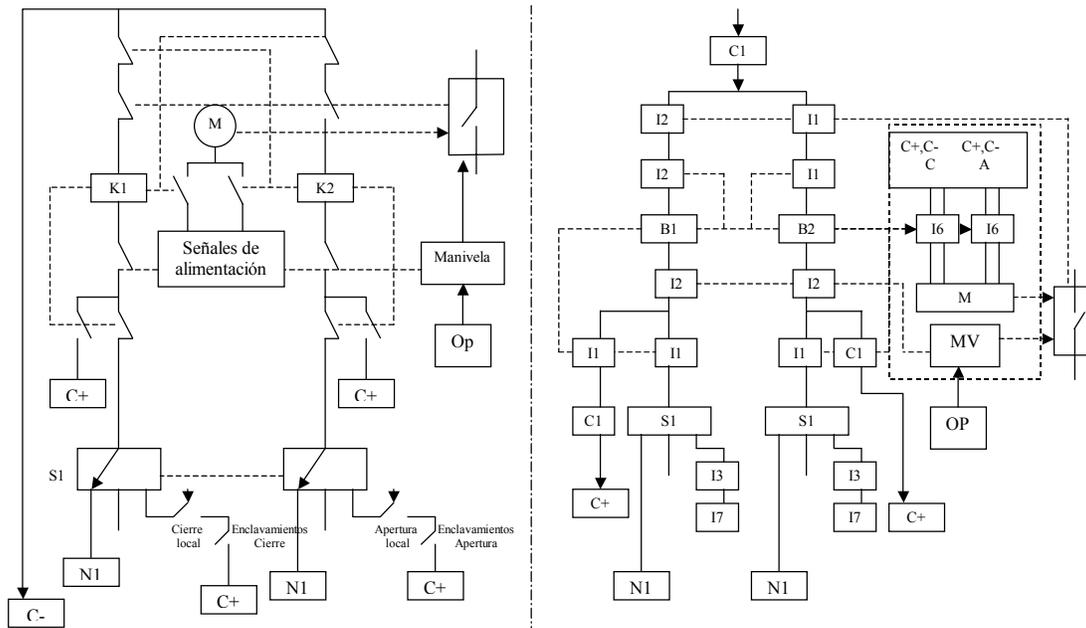


Figura 90: Esquema de control de un seccionador y modelo de simulación

En la Figura 90 se puede observar un esquema del circuito de control del seccionador y su representación. En el esquema de control se observan tres cosas, la primera corresponde al circuito de control, la segunda corresponde a los mecanismos que realizan la apertura o el cierre, y la tercera a la representación del elemento en la configuración de la subestación. El modelo del seccionador se construye de igual manera como se construye el del interruptor; mediante las conexiones serie paralelo de los modelos antes descritos tal como se muestra en la Figura 90.

**Sistema de control de servicios auxiliares:** los equipos y sistemas de servicios permiten el control desde el nivel cero mediante la intervención del Asistente de subestaciones a los equipos, además algunos posibilitan el control desde los niveles de control superiores. Todos los interruptores permiten al asistente de las subestaciones modificar su estado (abrir / cerrar), y el control remoto. La configuración de los servicios auxiliares posibilita gran cantidad de combinaciones que el asistente de la subestación debe conocer. Los elementos a modelar son:

- **Las plantas generadoras:** estas plantas permiten tanto la operación manual realizada por el asistente como la operación por el sistema de control desde los niveles superiores. Inicialmente, se representa como una caja negra.
- **“Swiches” del mímico de nivel uno:** estos interruptores poseen sistemas de control local y remoto. Al igual que en el caso de los generadores las consignas bajo falla requieren modelos mas detallados. Inicialmente, se tendrán modelos simples que reflejen su funcionamiento. El modelo consta de una variable de control que especifica la clase de maniobra ordenada tanto por el sistema de control como por el operador de la subestación; otra variable que representa el estado interno del equipo y finalmente, una variable de salida que representaría la posición. La regla de funcionamiento se puede ver en la Figura 91.

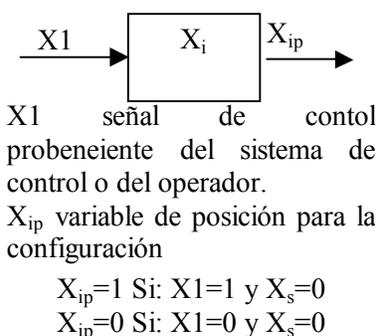


Figura 91: Representación del sistema de control del mímico de servicios auxiliares

### Niveles de Control Uno

El sistema de control desde este nivel consta de dos partes, la primera representa el procesador de control en donde se encuentra la lógica de operación y la segunda está

constituída por el mímico o interfase de usuario que posibilita la actuación del operador desde este nivel.

**El equipo controlador:** se encarga de agrupar las señales de estado de los equipos que controla, las acciones de los equipos de protecciones, las señales provenientes del sistema de medida, de registro de fallas y de alarmas. Está compuesto por un controlador lógico, que desde el punto de vista funcional presenta bastante complejidad.

La representación se basa en la información de la lógica de operación de los equipos. Las principales características a modelar son: los enclavamientos necesarios para la operación de equipos, órdenes de apertura y cierre del mímico, las alarmas del área de control, las salidas son las señales de apertura y cierre de los equipos, produciendo el cierre de los circuitos de control de los equipos con el sistema de servicios auxiliares a través de interruptores controlados que regresan a su posición inicial cuando la señal proveniente del equipo se encuentra en el valor adecuado.

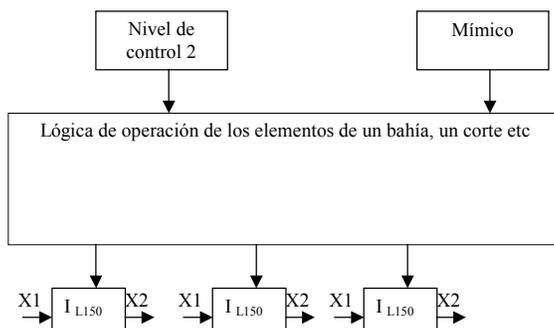


Figura 92: Esquema funcional del modelo del Nivel de Control Uno.

**El mímico de interfase de usuario:** es la interfase del equipo de control del nivel uno con en el operador. Se encarga de comunicarle al asistente de la subestación las alarmas que reportan los equipos que controla. Cuando el operador desea realizar una operación, selecciona el equipo y mantiene activado el selector del equipo (pulsando el selector según la clase de operación que desee realizar). Entonces, el equipo de control revisa los enclavamientos y se encarga de ejecutar la maniobra sobre el dispositivo respectivo. Además, en éste se encuentra el selector de mando y un selector de emergencia. El primero de estos inhibe los controles permitiendo el control (local y/o remoto) o la desconexión, y el segundo permite la realización de maniobra o accionamiento mediante una llave, sin revisar ningún enclavamiento.

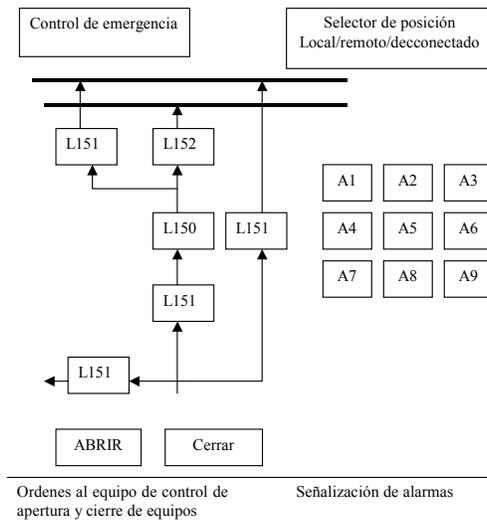


Figura 93: Esquema de un mímico de nivel de control uno de un campo de línea.

## Nivel de Control Dos

Este nivel de control es realizado por una computadora que se encarga de recibir la información de los niveles inferiores. Por esto, el modelo se representa como una caja negra con las funciones de los niveles de control más bajos.

## Nivel de Control Tres

Representa los equipos encargados de establecer la comunicación con el Sistema de Control Central del Sistema Interconectado. Se encarga de establecer las relaciones entre el operador del CSM y el Asistente de la Subestación.

### 5.4.2.5. Sistema de Comunicaciones

Los equipos de comunicaciones, están asociados a las bahías de líneas y permiten la comunicación con la subestación remota. El sistema de comunicaciones en las subestaciones eléctricas es un sistema bastante complejo, puede utilizar fibra óptica o portadora por las líneas de potencia (PLP). La red de comunicaciones está compuesta por: equipos multiplexores, amplificadores, módems ópticos, y el sistema PLP consta de trampas de onda, condensador de acople, unidad de acople, cables de alta frecuencia y equipo terminal PLP.

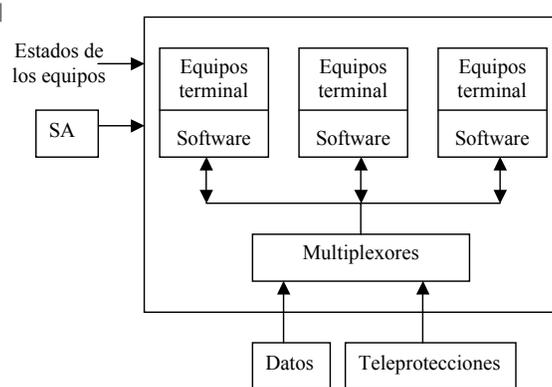


Figura 94: Modelo general del Sistema de Comunicaciones.

En la Figura 94 se presenta el modelo general del Sistema de Comunicaciones para representar las fallas y posibilitar los procedimientos operativos. Cada equipo se presenta como una caja con una variable de estado que refleja la condición interna.

#### 5.4.2.6. Sistema de Registro de Fallas

Las subestaciones cuentan con un sistema de registro de fallas ordenado en estaciones de adquisición de datos, las cuales están formadas por uno o varios registradores de falla conectados directamente o en red, guardando una jerarquía maestro – esclavo sobre el control del canal de comunicación con la estación de visualización y control. Por cada campo de línea asignado a la subestación, existe un registrador encargado de grabar el comportamiento de las señales de tensión y corriente de sus líneas de transmisión. Adicionalmente, se encarga de detectar la operación y el arranque de las protecciones, la operación del recierre y la posición de los polos de los interruptores de las líneas a través de las entradas digitales. Cada subestación posee un computador que sirve como estación de control de las estaciones de registro. Estos computadores se conectan al sistema general de ISA a través de una red LAN permitiendo el control y acceso remoto de cada registrador.

El modelo de este sistema está compuesto por elementos que representan los equipos de registro de fallas con las características de acceso al software, y la representación mediante una variable de estado de falla interna del equipo, controlada por la función de consignas o de entrenamiento del simulador según los requisitos. La relación con los demás equipos se establece mediante cables que proporcionan el flujo de datos (de igual manera que en los circuitos de control). En la Figura 95 se puede observar la estructura del modelo del sistema de registro de fallas.

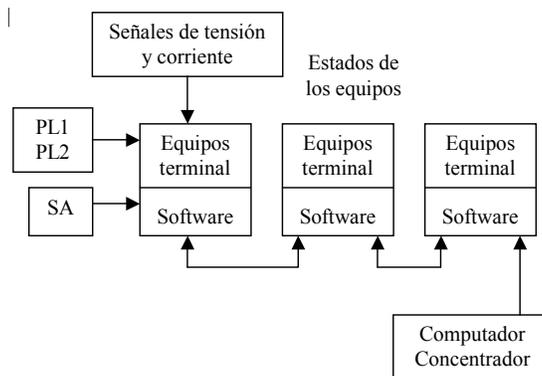


Figura 95: Estructura del Modelo del Sistema de Registro de Fallas

### 5.4.3. SERVICIOS AUXILIARES

Son los encargados de suministrar y distribuir la energía que necesitan los equipos y sistemas de la Subestación para que puedan cumplir con su función. Desde el punto de vista operacional su principal característica es que presenta el estado de los elementos, además de las condiciones de los parámetros de tensión y de corriente. Las características a representar en un modelo de este sistema son: los cambios en los parámetros de tensión y corriente que los equipos proporcionan (clase y nivel de tensión), la configuración o el arreglo físico y de conexión de los elementos, y la función y el estado de cada equipo, con el fin de modelar las consignas tanto en condiciones normales de operación como en condiciones de falla.

El modelo es una representación de conexión, está constituido por las principales características de los elementos y sus relaciones. Los subsistemas y equipos a tener en cuenta para la construcción del modelo son: los alimentadores, las barras y los cambiadores de tensión, los cuales se describen a continuación.

Alimentadores: corresponden a las entradas a las barras distribuidoras provenientes de la red de distribución pública, de transformadores de potencia de la misma subestación, de plantas generadoras (grupos electrógenos) o de baterías. La configuración del sistema de Servicios Auxiliares tiene diferencias de una subestación a otra, debido a que el número y las características de estos elementos varían significativamente. Estos modelos se presentan de forma general con el ánimo de poder obtener las configuraciones particulares para una subestación.

Los Alimentadores asociados a la red de Suministro Público de Media Tensión comprenden la línea de entrada a la subestación de la red pública, el seccionador de media tensión, el transformador de potencia y el seccionador de barra. Además, presenta Sistemas de Protección para el transformador, sistemas de medida, fusibles y otros elementos que en primera instancia no se tienen en cuenta. La línea de entrada de la red de servicios públicos, se representa de la misma manera que una línea de transmisión en la configuración, es decir mediante una tensión constante y una frecuencia constante. En cuanto al seccionador de media tensión y el seccionador de barra se representan a través

del modelo de interruptor presentado en la configuración; es decir, una caja con dos características: el estado (bueno/malo) y la posición (abierto/cerrado) además de la regla de operación. En general estos seccionadores se pueden accionar manualmente y en algunos casos de manera remota.

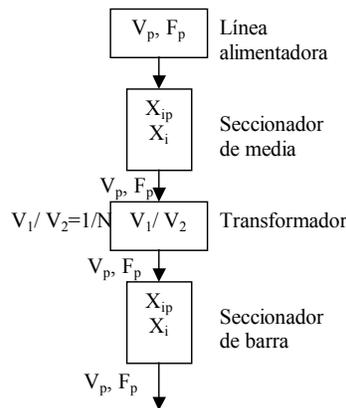


Figura 96: Representación de un Alimentador asociado a la red de servicios públicos

Dada la importancia de suministro constante, en las Subestaciones Eléctricas existen plantas generadoras de emergencia que se activan en caso de falla en el suministro del servicio público. Es así, como los Alimentadores asociados a plantas generadoras comprenden la planta generadora, los interruptores y fusibles necesarios para controlar y proteger la entrada de la planta al sistema.

La planta generadora se representa mediante una fuente de tensión, una variable que representa el estado de la planta (bueno/malo), otra que representa el estado de encendido o apagado y una regla que define la tensión de salida a las barras. Por otro lado, los interruptores (tanto el asociado a la planta como el de barra) se representan mediante los modelos antes mencionados.

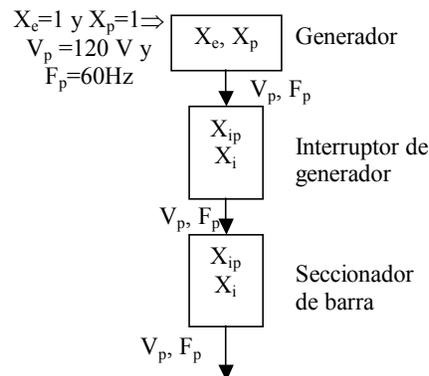


Figura 97: Representación de un Alimentador asociado a una planta generadora

Los bancos de baterías son equipos utilizados para presentar continuidad del suministro de energía ante perturbaciones de los demás alimentadores. Está compuesto por el banco de baterías, el Sistema de Interruptores para controlar el flujo de potencia y los sistemas para medida y protección. El modelo está constituido por el banco de baterías y los interruptores asociados al control del flujo de potencia desde las baterías hacia las barras.

El banco de baterías se modela mediante una fuente de tensión continua, a través de una variable que refleja el estado del equipo y unas reglas que definen la correcta operación del mismo.

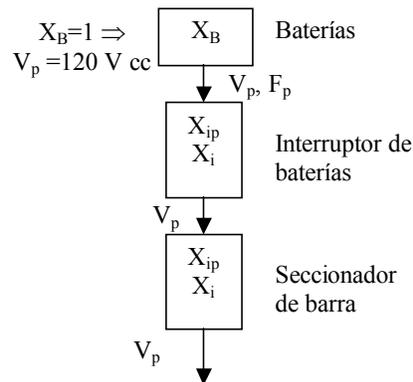


Figura 98: Representación de un Alimentador asociado los bancos de baterías.

**Barras:** al igual que en la configuración de la subestación la función de las barras es servir como nodo conectivo de diferentes puntos. A ellas van conectados tanto los alimentadores que proporcionan la energía, como los rectificadores y los convertidores. Están conformadas por lo que se conoce como barra en si y el conjunto de interruptores de protección o elementos conectivos de los diferentes equipos y sistemas que dependen de la barra.

Su representación consta de dos variables, tensión y frecuencia, definidas por las entradas que provienen de los alimentadores. En el caso de una barra de corriente continua, la frecuencia es igual a cero y se tendrán múltiples salidas según la cantidad de interruptores que estén conectados a esta.

En el caso de los interruptores de distribución se tiene el mismo funcionamiento que en los interruptores de potencia; es decir, que permiten la interrupción de corriente tanto en condiciones normales como de falla. El modelo de estos elementos es el mismo descrito para la configuración.

El modelo general de las barra está conformado como se observa en la Figura 99.

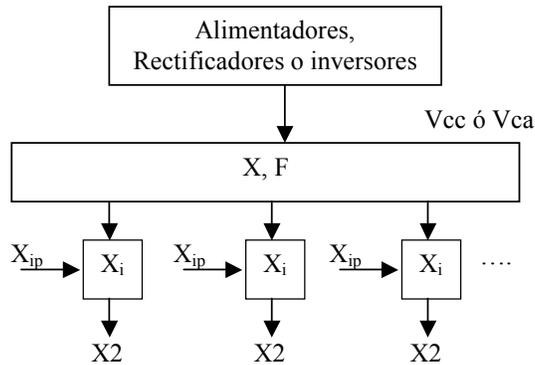


Figura 99: Modelo de representación de las barras de distribución de corriente

**Cambiadores de tensión:** proporcionan cambios de tensión continua a tensión alterna y viceversa. Su función básica es cambiar las características de la señal de tensión en el tiempo. Los equipos que proporcionan estas características son los rectificadores y los inversores.

**Rectificadores:** se encargan de alimentar los bancos de baterías estacionarias evitando su descargue. Su función principal es convertir las señales de tensión senoidales en señales continuas en el tiempo. Físicamente está conformado por elementos electrónicos que dan una característica de integración compleja. Como primer acercamiento para su representación se tiene un modelo simple que especifica su función y estado. Su función está representada mediante una regla y su estado a través de una variable booleana indicando si éste está bien o mal.

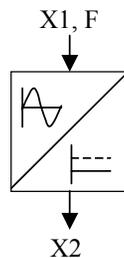


Figura 100: Modelo Rectificador de Tensión

**Inversores:** la principal función de los inversores es convertir señales de tensión continuas en el tiempo en señales senoidales. Cuando la única fuente de tensión disponible proviene de una batería o de cualquier otra fuente de corriente continua, los Inversores proporcionan la tensión de alimentación en alterna más adecuada a las necesidades del equipo a alimentar. El modelo que describe el comportamiento de este elemento tiene en cuenta su función principal y el estado del equipo.

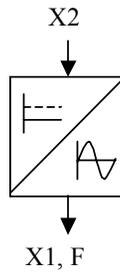


Figura 101: Modelo Inversor de Tensión

En la Figura 102 se observa la Configuración General de los Servicios Auxiliares.

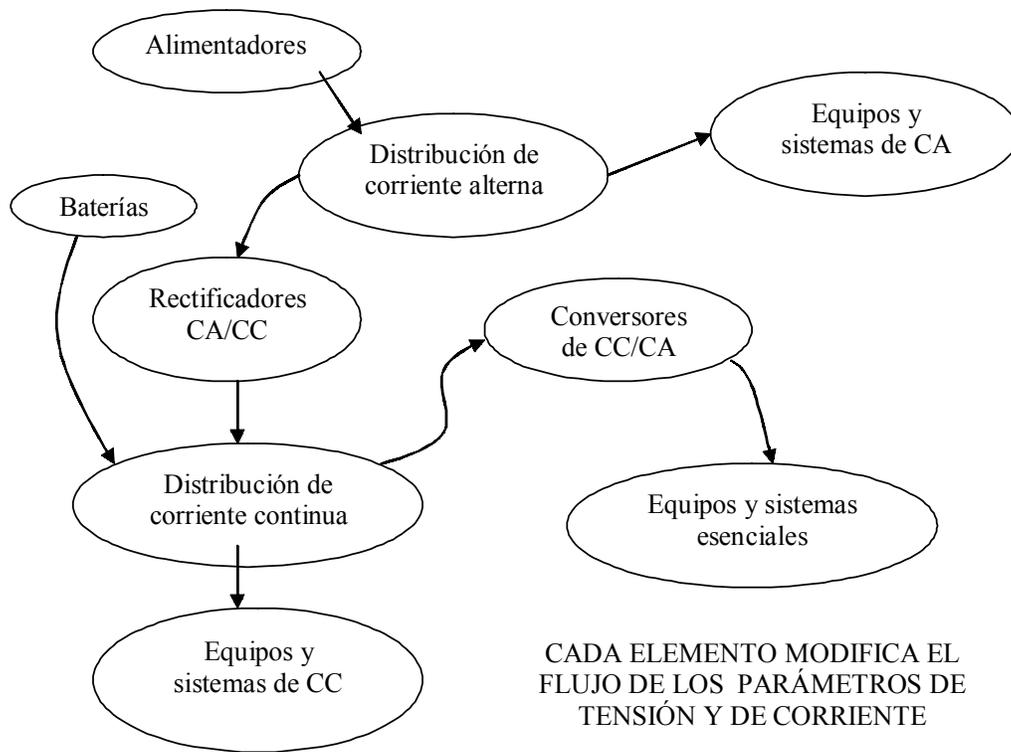


Figura 102: Configuración de los Servicios Auxiliares

Los elementos que conforman la Configuración, se relacionan de una manera clara a través de los parámetros de tensión y de corriente, de acuerdo con las conexiones entre ellos. Estas relaciones son estudiadas por medio de los Esquemas Unifilares, los cuales son simplificaciones de los Sistemas Trifásicos reales, particulares para cada Subestación.

En el anexo B se presenta un ejemplo de simulación que muestra mediante los modelos que se plantean para representar una subestación como se pueden realizar los procedimientos operativos y de falla.

## 5.5 SISTEMA DE SIMULACIÓN

Como se ha visto anteriormente, la simulación es una herramienta muy utilizada para el entrenamiento en la operación de los sistemas. Sin embargo, una de las etapas más complejas en el proceso es la elaboración de un modelo que represente las características relevantes del sistema.

Dentro del “Sistema de Entrenamiento y Simulación” para los asistentes de subestaciones, el componente encargado de representar las características necesarias de los componentes de la subestación es el “sistema de simulación”.

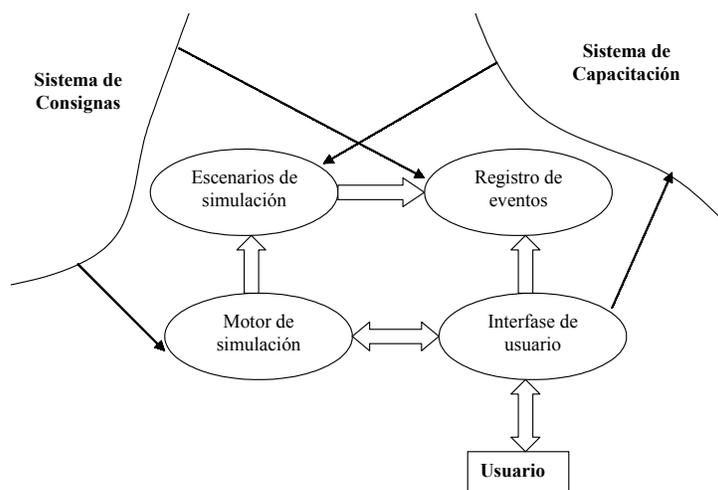


Figura 103: Unidades funcionales del sistema de simulación

El “sistema de simulación” está conformado por unidades funcionales con la estructura mostrada en la Figura 103. Allí se observan cuatro elementos básicos: el motor de simulación, los escenarios de simulación, el registro de eventos y la interfase de usuario.

### 5.5.1. MOTOR DE SIMULACIÓN

La función del “motor de simulación” es representar el comportamiento de los sistemas de las subestaciones. Este motor representa tres características básicas: la configuración, los sistemas funcionales y los servicios auxiliares. Para ellas existe el modelo que simula el funcionamiento individual. Las interacciones de estos tres modelos permite la representación de una subestación de transmisión. El motor de simulación y la interfase de usuario, soportados en la base de conocimiento y el sistema de formación conforman el simulador de una configuración de subestación.

En el motor de simulación se encuentran los modelos que se describieron anteriormente y que representan las características relevantes de la subestación para simular los procedimientos operativos. Con estos se pretende construir los tipos de subestaciones necesarios para las destrezas que se exigen de los operadores de subestaciones. Por lo

tanto, el motor de simulación permite la adaptación de estos tres modelos a las particularizaciones de los tipos de subestaciones que se encontraron en ISA y que, con las salvedades del caso, pueden ser adaptadas a cualquier otro tipo de subestación.

Una vez adaptado el modelo se pueden realizar las simulaciones que conlleven a los objetivos planteados con este sistema, se ejecutan secuencias de maniobras, seguimiento de señales, operación de equipos de patio, etc.

### **5.5.2. ESCENARIOS DE SIMULACIÓN**

Esta función se encarga de presentar los casos de simulación, dependiendo de las necesidades de entrenamiento de los asistentes de subestaciones. Para cada habilidad o destreza que se desee desarrollar, existen escenarios que potencializan su desarrollo. Se encarga entonces, de inicializar el estado de los elementos que componen el motor de simulación. Los criterios de inicialización los propone el “sistema de formación”.

El número máximo de escenarios que se pueden representar en el motor de simulación corresponde al número de estados que tiene el modelo, sin embargo, esta cantidad de estados puede ser reducida considerablemente por el “sistema de formación”.

Los escenarios dependen de las características del modelo del motor de simulación, es decir depende de la clase de subestación que se esté trabajando.

Los escenarios además, están sujetos a las características propias de cada subestación, lo cual implica que si se simula un modelo específico de subestación, no se pueden formar todas las habilidades y destrezas requeridas para la operación global del Sistema Interconectado Nacional, ya que la forma de operar de cada subestación es particular puesto que la configuración le da características propias.

### **5.5.3. REGISTRO DE EVENTOS**

El registro de eventos se encarga de guardar las acciones realizadas por algunos sistemas durante una sesión de simulación. Estas acciones comprenden: el cambio de estados que el usuario ejecuta sobre los elementos de la subestación, las condiciones iniciales de un escenario de simulación, dadas por el sistema de formación y los procedimientos operativos inmersos en las consignas, dados por el sistema de consignas. Este registro de eventos tiene por objeto dar pautas claras del desempeño del asistente, al “sistema de formación”, ya que los diferentes juegos de simulación tienen su base en el paso a paso de la realización de las consignas operativas o bajo fallas, por lo cual se puede contrastar el desempeño del asistente contra el desempeño esperado. Esto es clave para que el sistema de formación tome decisiones y establezca una formación adecuada a cada usuario del simulador.

En el anexo C se muestra un sistema que permite el montaje de una subestación con la configuración que se quiera. Esta subestación se representa mediante los modelos descritos anteriormente y contiene los elementos funcionales que se plantean para el Sistema de Simulación; esta herramienta fue presentada en [21].

#### **5.5.4. INTERFASE DE USUARIO**

Este sistema es el encargado de recibir las acciones del usuario y enviarlas al motor de simulación y viceversa, registrar las fallas o sistema de formación para su interpretación. Su desarrollo se fundamentó en la presentación intuitiva de los elementos sobre los cuales se debe actuar, permitiendo al usuario la interacción con el sistema de simulación y la visualización física de cada uno de los elementos de la subestación modelados.

Los prototipos de sistema de entrenamiento y simulación que se presentan en el capítulo seis y en el Anexo C posibilitan la realización de las acciones que se plantean en Sistema de Simulación. En estos se contemplan los casos de uso implicados en el proceso de construcción de las subestación: parte física (equipos de patio) y parte lógica (enclavamientos). Permiten la realización de simulaciones de las subestaciones que se encuentren en la base de datos, posibilitando la variación de los elementos de control de los equipos de patio, la realización de operaciones, la presentación de escenarios de simulación, etc. Con estos los usuarios pueden asemejar una subestaciones particular.

#### **5.6 SISTEMA DE CONSIGNAS**

Para abordar la solución del problema de implementar una herramienta computacional, para apoyar el proceso de enseñanza y entrenamiento de las consignas operativas, se identificaron las funciones básicas que permitieron construir claramente el camino a seguir para realizar la labor planteada. Estas funciones se muestran en la Figura 104 y muestra las relaciones que debe tener con el “Sistema de Simulación” y el Sistema de Capacitación”.

El sistema de consignas se ha propuesto como un sistema de soporte basado en información actualizada, apoyado en la experiencia y el conocimiento proporcionado por ingenieros expertos y operarios, para que se facilite la toma de decisiones minimizando el tiempo en cuanto a la consecución de personas expertas en la operación de las subestaciones y en el manejo de los procedimientos operativos.

Dentro del “Sistema de Entrenamiento y Simulación”, las funciones básicas del “Sistema de Consignas” son permitir el manejo de los procedimientos operativos y servir de soporte de los “Sistemas de Simulación” y “Sistema de Entrenamiento” para que puedan realizar sus funciones. Específicamente el sistema de consignas se encarga del manejo, representación y soporte de las consignas. Los elementos básicos de este sistema son: la base de consignas, los procedimientos y las fallas.

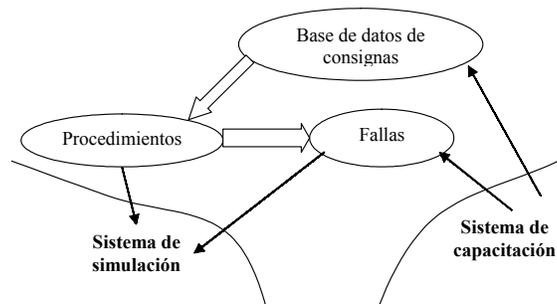


Figura 104: Elementos básicos del sistema de consignas

### 5.6.1. BASE DE DATOS DE CONSIGNAS

Su función principal es el almacenamiento de las consignas de la subestación. Como se ha visto anteriormente los procedimientos operativos de una subestación representan un gran número de documentos, en los cuales se encuentran las secuencias de acciones que se necesitan en la realización de las tareas de operación. Por tanto la base de datos de las consignas permite el manejo eficiente y la consulta rápida, y posibilita la realización del análisis sistémico mediante la construcción de herramientas computacionales que faciliten su gestión actualización y su consulta.

### 5.6.2. PROCEDIMIENTOS

La función de los procedimientos se encarga de abstraer de las consignas la secuencia de pasos a seguir y los elementos que intervienen en los procedimientos operativos. Esta función se encarga específicamente de identificar los equipos en el sistema de simulación sobre los cuales se aplican estos procedimientos.

### 5.6.3. FALLAS

La función del módulo de fallas se encarga de identificar para una consigna, las fallas que pueden originar, ya sea la pérdida de operatividad de la subestación, o una alarma. También mediante los requerimientos de formación, y con base en las habilidades y destrezas que se requiera desarrollar en un escenario de simulación, este sistema se encarga de identificar las fallas permiten el entrenamiento eficiente del operador de subestaciones.

Por diversos motivos, los componentes de los sistemas de las Subestaciones se ven sometidos a fallas, lo que genera en algunos casos pérdida de operabilidad o indisponibilidad de los mismos. Sin embargo las condiciones de las fallas en las subestaciones son poco frecuentes. Por tanto, es necesario un mecanismo que maneje los criterios de iniciación de las fallas en los elementos del simulador con los argumentos que el sistema de entrenamiento establezca. Por tanto otra tarea de esta función es el

establecer las secuencias y la clasificación de las fallas que se pueden presentar en los elementos del simulador.

Dentro de los procedimientos bajo falla, se encuentran las fallas evidenciadas por la falta de operación de los equipos y las evidenciadas por la activación de una alarma. Estas fallas originan la realización de las consignas bajo falla. A continuación se listan las fallas en la operación de los interruptores, los seccionadores, las alarmas, los transformadores de corriente, los transformadores de potencial, el sistema de control, el sistema de comunicación, el registro de fallas y los servicios auxiliares.

### **Interruptores**

Las fallas en la apertura y cierre de los interruptores pueden ser causados por: falla en el sistema eléctrico o mecánico, falla en el sistema de control del equipo, falla en los equipos de control, falla por condiciones inadecuadas.

### **Seccionadores**

Las fallas en la apertura y cierre de los seccionadores pueden ser ocasionadas por: falla en el sistema eléctrico o mecánico, falla en el sistema de control del equipo, falla en los equipos de control, falla por condiciones inadecuadas y activación de sistema de protecciones.

### **Alarmas**

Las alarmas se encuentran agrupadas por áreas de la subestación (diámetros, cortes, o bahías de línea), estas áreas pueden presentar las siguientes alarmas: falla de polaridad en los circuitos de disparo, falla circuitos de disparo 1 ó 2, disparo con bloqueo, discrepancia de polos, baja presión de SF6 etapas 1 ó 2, falla alimentador motor del interruptor, disparo falla interruptor, falla alimentación circuito de disparo 1 ó 2, falla mecanismo del interruptor, falla alimentación motor del succionador

### **Sistema de Control**

El sistema de control puede presentar las siguientes fallas: Falla PLC de control de campos, alarmas y falla polariza de control.

### **Sistema de Protección**

Las fallas en el sistema de protecciones pueden ser: Falla relés de protección principal 1 y 2, Alarmas, disparo sobre tensión, disparo PL1 o PL2, disparo protecciones complementarias, operación de recierre, falla comunicaciones PL1 ó PL2, falla polaridad protecciones,

## **Sistema de Comunicación**

Las fallas que puede presentar el sistema de comunicaciones son: Fallas en el sistema de alimentación del equipo, falla en la fibra óptica que establece el enlace entre los diferentes circuitos, fallas en otros equipos de la red, fallas en la interfase con los relés de protección, falla en la interfase con los equipo de comunicaciones, falla en el canal de comunicaciones, fallas en la unidad central del equipo de comunicaciones, falla por atenuación de la señal óptica o eléctrica, falla en el sistema modular del equipo, falla por hardware software, fallas en el sistema modular de los equipos, problemas en las interfases, daños en el sistema de cómputo, fallas en el circuito regulador del equipo

## **Registro de fallas**

Las fallas que puede presentar el sistema de registro de fallas son: Fallas en la red de alimentación, daños en el canal de comunicación. Pérdida de sincronismo, fallas en la comunicación por cambios en la configuración, daños en el sistema de interfases, fallas en el circuito regulador del equipo, fallas por software.

## **Servicios Auxiliares**

Cargador de baterías: El cargador de baterías presenta las siguientes alarmas y fallas: alarma cargadores de baterías, alarma falla de fase cargador de baterías, alarma tensión alta, alarma tensión baja, corriente de salida baja, alarma interruptor cargador de baterías

Planta diesel: Este equipo puede presentar las siguientes alarmas y fallas: alarma en planta diesel de emergencia, sistema de distribución, alarma interruptores de servicios auxiliares fuera de servicios, disparo de interruptores de DC, disparo de interruptores de CA, ausencia de tensión de 13.2kV

### **5.6.4. MODELO BÁSICO DEL ASISTENTE DE CONOCIMIENTO**

Adicionalmente el “sistema de consignas” proporciona la formalización de conocimiento que permite contribuir al entrenamiento en consignas de los asistentes de operación, y disminuir el número de consignas, que hará más fácil su actualización, comprensión y asimilación por parte de los operarios.

Para alcanzar las funciones adicionales y el soporte de la representación del conocimiento el “Sistema de Consignas” se diseñó a partir de un modelo funcional con los mecanismos y las funciones básicas que permitieran la administración de los procedimientos operativos. Este modelo funcional se muestra en la Figura 105 y presenta los mecanismos y las unidades funcionales necesarias para realizar el sistema que contiene la representación, el análisis y la interpretación del conocimiento inmerso en los procesos operativos y de falla de las subestaciones. Este sistema, tomó como base la representación del conocimiento presentado en el capítulo cuatro y soporta los

mecanismos que posibilitan el manejo la actualización de las consignas, y permite el trabajo conjunto con el Sistema de simulación y con el Sistema de entrenamiento.

### Base de Conocimiento (BC)

La base de conocimiento guarda la representación del conocimiento del dominio para la solución de problemas específicos, normalmente dicho conocimiento se estructura en forma modular o en forma declarativa. Representa un depósito de las primitivas del conocimiento (por ejemplo, hechos fundamentales, reglas de procedimientos y heurísticas) disponibles para el sistema. En este caso, los hechos son cada uno de los problemas encontrados en la subestación, relacionados con los aparatos involucrados y su estado de anormalidad. Las reglas de procedimientos serían los valores de funcionamiento normal de cada uno de los indicadores de la subestación y las reglas heurísticas constituirían el conjunto de causas y soluciones almacenadas en la base de datos, originadas de la experiencia del experto.

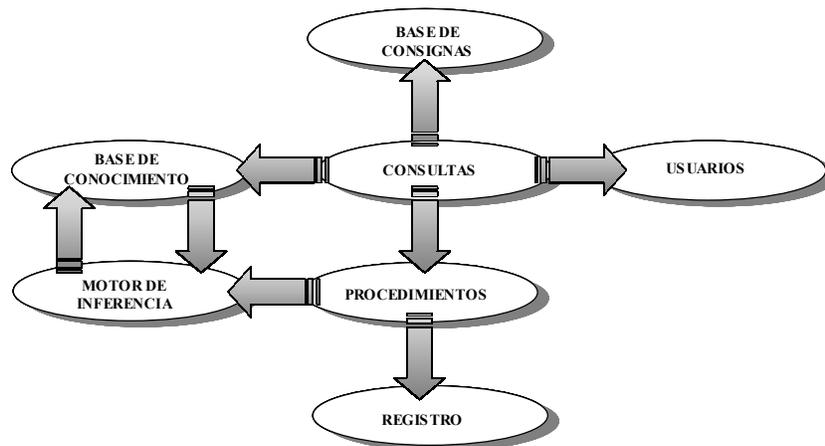


Figura 105: Elementos básicos del Asistente del Conocimiento o Sistema de Consignas

### Motor de Inferencia

El motor de inferencia realiza el proceso que efectúa el razonamiento a partir de los datos y utilizando el conocimiento de la BC. Es "genérico", es decir, que se puede aplicar a diferentes dominios sólo cambiando la BC. El motor de inferencia funciona ubicando los conocimientos e infiriendo nuevos mediante la base de conocimientos. El paradigma del motor de inferencia es la estrategia de búsqueda que se emplea para producir el conocimiento demandado. El proceso consiste en buscar conocimientos apropiados y a partir de éstos deducir nuevos conocimientos constituyendo un elemento clave del procesamiento de un sistema experto.

El proceso de buscar conocimientos apropiados y a partir de éstos deducir nuevos conocimientos constituye un elemento clave del procesamiento de un sistema experto.

## **Interfase de Usuario**

Las facilidades de interfase con el usuario deben aceptar información del usuario y traducirla a una forma aceptable para el resto del sistema o aceptar información proveniente del sistema y convertirla a una que el usuario pueda entender. Por esta se podrá consultar la base del conocimiento, la base de datos y las reglas de los procedimientos.

## **Base de Consignas**

La base de consignas contiene las consignas de las subestaciones organizadas y clasificadas. Permite la identificación de los pasos y acciones que tiene una consigna.

## **Procedimientos**

Representan las reglas que permiten al motor de inferencia obtener nuevo conocimiento para acrecentar la BC, además que será la guía en el proceso de registro.

Los prototipos de simulación que se presentan en el capítulo 6 y el Anexo C permiten las funciones que se plantean en el sistema de consignas para el manejo de la información de las consignas bajo falla.

## **5.7 SISTEMA DE ENTRENAMIENTO**

Los cambios mundiales, técnicos, económicos, sociales, etc., exigen de las empresas la transformación y elevación de la competitividad en los mercados locales y extranjeros, para lo cual es necesario contar con talento humano capaz de enfrentar nuevos retos, con actitudes y habilidades específicas.

Los procesos productivos actuales demandan trabajadores que posean competencias técnicas y académicas capaces de adaptarse fácilmente a los cambios de situación, pudiendo manejar una autonomía propia sin olvidar la responsabilidad del trabajo en equipo y garantizando la capacidad de manejar y resolver problemas intempestivos.

Las habilidades, destrezas, conocimientos y operaciones que el individuo esté en capacidad de desempeñar, representan las características de la Competencia Laboral. Esto exige que el sistema de entrenamiento se encuentre inmerso en una *“Formación Integral basada en Competencias Laborales”*. Esta formación basada en competencias se aborda para los operadores de subestaciones en [51] y [48] donde se presentan los lineamientos que definen la formación de los operadores de subestaciones y proporciona las bases del modelo que se presenta.

Los planteamientos de la formación basada en competencias laborales que se necesitan son los que se requieren para la aplicación de las prácticas en el simulador desarrollado para el Asistente de Subestaciones bajo el enfoque de simulación: dicho trabajador debe ser competente en:

- Monitorizar las variables indicadas por los instrumentos de medida, acorde con las normas establecidas.
- Supervisar las señalizaciones y alarmas, acorde con las normas establecidas.
- Inspeccionar el estado de operación y/o funcionamiento de los equipos, acorde con los procedimientos establecidos por la empresa.
- Registrar la información en los formatos establecidos por la empresa.

El logro de las habilidades propuestas por el módulo de formación en las anteriores funciones requiere el desarrollo de otras actividades de aprendizaje aparte de las asociadas directamente con el Simulador, para las cuales el proceso de aprendizaje debe ser continuo y estar acompañado, facilitando los espacios para la creación y reformulación del conocimiento tal como se expone en [51] y [48].

#### **5.7.1. MODELO FUNCIONAL DEL “SISTEMA DE ENTRENAMIENTO”**

Desde el punto de vista de entrenamiento, la simulación consiste en situar a un educando en un contexto que imite algún aspecto de la realidad y en establecer en ese ambiente situaciones similares a las que él deberá enfrentar de forma independiente, durante las diferentes etapas de su práctica preprofesional y profesional.

El uso de la simulación en los procesos educativos constituye un método de enseñanza aprendizaje efectivo para lograr el desarrollo de un conjunto de habilidades que permitan alcanzar modos de actuación superiores. Tiene el propósito de ofrecer al educando la oportunidad de realizar en un simulador, una práctica análoga a la que realizará en su interacción con la realidad en las diferentes áreas o escenarios. Es necesario que en todo momento se garantice la responsabilidad durante la realización de las simulaciones.

El empleo de la simulación permite acelerar el proceso de aprendizaje y contribuye a elevar su calidad. No puede constituir un elemento aislado del proceso docente, sino un factor integrador, sistémico y ordenado de dicho proceso. Su utilización debe tener una concatenación lógica dentro del diseño curricular que corresponda con las necesidades y requerimientos de los programas a establecer.

La función del “Sistema de Entrenamiento” es la de administrar y manejar las habilidades y destrezas que exigen las competencias laborales del asistente de subestaciones, y los parámetros de formación y evaluación enmarcados en la formación basada en competencias con el objetivo de seleccionar los escenarios de simulación que necesitan los usuarios y de presentar los indicadores de desempeño.

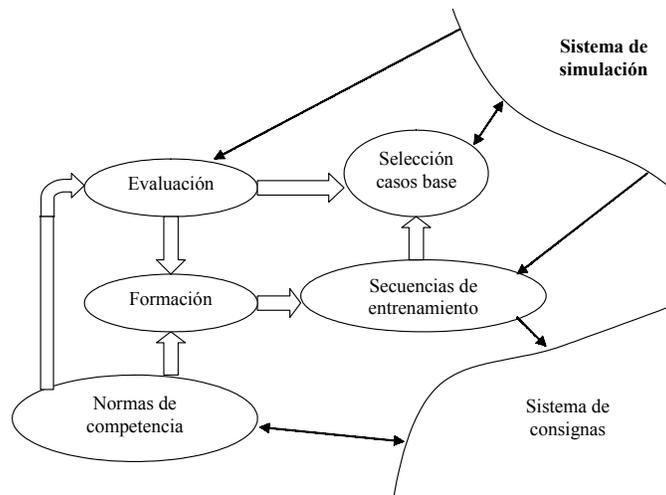


Figura 106: Unidades funcionales del sistema de capacitación

Con base en estos criterios, el “sistema de entrenamiento” planteado para los asistentes de subestaciones, está conformado por unidades funcionales con la estructura mostrada en la Figura 106. Allí se observan los elementos básicos del módulo: la evaluación, la formación, las normas de competencia, las secuencias de entrenamiento y la selección de casos base.

#### 5.7.1.1. Evaluación

La simulación es especialmente útil para evaluar la capacidad de búsqueda e interpretación de los datos, la identificación de los problemas, el juicio sobre la conducta a seguir ante diferentes situaciones, y los conocimientos prácticos y las habilidades. Ello permite, por lo tanto, determinar el grado de competencia adquirida por el aprendiz, así como evaluar la eficacia del diseño curricular y del mismo simulador.

La evaluación se encarga de tomar los datos de las sesiones de los usuarios almacenadas en el sistema de registro de eventos del “Sistema de Simulación” y a través de los parámetros planteados en la evaluación con base en las competencias laborales [48], establecer las necesidades de entrenamiento que el usuario necesite.

#### 5.7.1.2. Formación

El empleo del simulador tiene que estar en correspondencia con las exigencias y requerimientos de la formación, y su planificación, con los tiempos y el sistema de evaluación. Todo ello conlleva que la simulación, como método de enseñanza, se pueda emplear en las prácticas en general de las actividades de la educación. En [48] se puede apreciar el planteamiento, la descripción y aplicación de estos requerimientos.

El simulador se utiliza, no sólo para el mejoramiento de las técnicas de diagnóstico, tratamiento y de resolución de problemas, sino también para mejorar las facultades psicomotoras y de relaciones humanas.

El simulador posibilita que los usuarios se concentren en un determinado objetivo de enseñanza (seguimiento de secuencias de operación, operación de equipos, respuesta ante alarmas, etc.). Permite a su vez, la reproducción de un determinado procedimiento o técnica y posibilita que todos apliquen un criterio normalizado.

Diferentes técnicas de simulación se pueden desarrollar, y en cada una de ellas el aprendiz debe asumir varios roles de su ocupación. Existen 3 grupos principales de variantes o tipos de simulación, a saber:

Una primera opción es desarrollar las actividades asistido por el simulador. El usuario realiza las actividades presentadas por el sistema con su asistencia y verificación. Le corrige los errores y le brinda la información de los pasos a seguir.

En una segunda, las situaciones se presentan, se le propone al usuario que actúe ante escenarios, encaminados a desarrollar habilidades específicas, realizando la secuencia de pasos necesarios para solucionar o reaccionar ante éstos.

En la tercera, se plantean las situaciones y deben ser resueltas por el alumno, se lleva un registro de eventos con fines de evaluación.

Enseñar a resolver problemas requiere de una clara definición de la secuencia de las decisiones a adoptar en el problema seleccionado. Los principales tipos de problemas que se plantean en la simulación son los siguientes:

- Problemas de diagnóstico: requieren obtener amplia información mediante entrenamiento, capacitación y experiencia en la ocupación, y sobre esta base, resolver los problemas e interpretar sus resultados, a fin de poder llegar a un diagnóstico.
- Problemas de emergencia: corresponde al tratamiento a este tipo de situaciones, ya sean fallas operativas o situaciones de alarma. Es probablemente una de las variedades de problemas más empleadas.
- Alternativas de procedimiento: frente a un problema dado conlleva a seleccionar el procedimiento adecuado.

Con esto en mente, el Sistema de Entrenamiento se encarga de manejar e interactuar con los dos sistemas anteriores (“sistema de consignas” y “sistema de simulación”) para alcanzar el objetivo del sistema.

### **5.7.1.3. Normas de competencia**

Las normas de competencia laboral son el referente para el sistema de formación del “sistema de entrenamiento”, porque proporcionan los requerimientos teórico-prácticos de los perfiles ocupacionales; además se involucran directamente con el sistema de consignas dependiendo del puesto de trabajo y del tipo de operación a realizar.

Por otro lado de acuerdo con la planeación curricular detallada de las actividades de formación a desarrollar con la herramienta de simulación, se adecuan las técnicas e instrumentos de aprendizaje para obtener las evidencias del trabajo desarrollado por el asistente y así determinar la competencia y debilidades del mismo.

### **5.7.1.4. Secuencias de entrenamiento**

El propósito principal de esta parte del sistema es la selección de la secuencia de consignas a presentar al asistente de operación, necesarias para que adquiera ciertas destrezas o habilidades. Estas secuencias de entrenamiento se pueden ajustar dependiendo el grado de complejidad que se este manejando.

### **5.7.1.5. Caso base**

La selección del caso base permite la particularización de la secuencia de consignas a casos específicos mediante la selecciona los escenarios que se puedan presentar y que ayuden al incremento de destrezas y habilidades.

## **5.7.2. UTILIZACIÓN DEL SIMULADOR**

Haciendo énfasis en el proceso de aprendizaje que dentro de la empresa se desarrolla para aumentar la calidad del recurso humano, el simulador se propone como una herramienta para realizar la práctica de algunos procedimientos de operación de subestaciones y que facilitan el proceso de aprendizaje de los operadores. Los principales aspectos a tener en cuenta al utilizar el simulador son:

- El empleo del simulador tiene que estar en estrecha correspondencia con las exigencias y requerimientos de la formación y su planificación con los tiempos y el sistema de evaluación.
- El usuario tiene que sentir la necesidad y la utilidad de su uso de manera independiente. Todo ello conlleva la utilización de la simulación, como método de enseñanza.
- El simulador posibilita que los usuarios se concentren en un determinado objetivo de enseñanza; permite la reproducción de un determinado procedimiento o técnica y posibilita que todos apliquen un criterio normalizado. Por tanto se deben crear los programas de formación que incluyan periódicamente su utilización.

Para su empleo se requieren determinados requisitos, entre los cuales se tiene:

- Elaboración de guías orientadoras del simulador para los usuarios y guías metodológicas para los profesores, que contenga una definición clara de los objetivos a lograr.
- Demostración práctica inicial a los usuarios por parte del sistema, que contenga su introducción teórica, donde se puedan emplear otros medios de enseñanza de forma combinada.
- Ejercitación del educando de forma independiente.

En cuanto a la evaluación, la simulación es especialmente útil para evaluar: la capacidad de búsqueda e interpretación de los datos, la identificación de los problemas, el juicio sobre la conducta a seguir ante diferentes situaciones, y los conocimientos prácticos y las habilidades. Ello permite, por lo tanto, determinar el grado de competencia adquirida por el usuario, así como evaluar la eficacia del diseño curricular y del mismo simulador.

En la aplicación del módulo de formación desarrollado para el operador de subestaciones bajo el enfoque de simulación, necesariamente tiene que ser acompañado del desarrollo de formación planteado en [51] que propone que el operador debe ser competente en:

- Monitorizar las variables indicadas por los instrumentos de medida, acorde con las normas establecidas.
- Supervisar las señalizaciones y alarmas, acorde con las normas establecidas.
- Inspeccionar el estado de operación y/o funcionamiento de los equipos, acorde con los procedimientos establecidos por la empresa.
- Registrar la información en los formatos establecidos por la empresa.

El logro de las habilidades propuestas en el sistema de formación requiere el desarrollo de actividades de aprendizaje asociadas directamente con el simulador para las cuales el proceso de aprendizaje debe ser continuo y estar acompañado, facilitando los espacios para la creación y reformulación del conocimiento.

Los prototipos que se presentan en el capítulo seis y en el anexo C permiten la elaboración de los escenarios que el instructor cree convenientes para la adquisición de destrezas y habilidades particulares en donde el usuario puede seleccionar la secuencia de entrenamiento y los escenarios que crea convenientes o los que su instructor le señale.

## **6. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA EN LOS PROTOTIPOS**

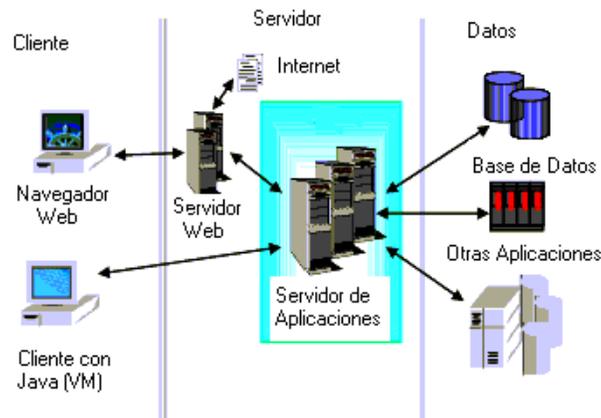
Dentro de las funciones diarias del personal operativo de subestaciones, frecuentemente se repiten acciones que conllevan a la culminación de una consigna operativa que permite la operación de una subestación (la manipulación de los estados de los equipos de patio, como interruptores y seccionadores). Sin embargo, estas acciones no son frecuentes y son olvidadas con facilidad por el operador, sobretodo considerando que en pocos casos se tiene la oportunidad de operar subestaciones de distinta configuración. Cabe anotar que aquellas consignas operativas que tienen mayor frecuencia de realización son recordadas o grabadas con mayor facilidad por parte del personal operativo de una subestación determinada [11].

En busca de una solución a estos inconvenientes, se planteó la creación de un ambiente virtual en el cual se simule el comportamiento de los equipos de patio de una subestación, su configuración y su operación desde los tres niveles de operación, (0, 1 y 2 o patio de la subestación, mímico de operaciones y estaciones de trabajo, respectivamente) [21]. La base del conocimiento de este ambiente virtual está soportada en una base de datos en la cual están almacenadas las consignas operativas. Dicha base de datos se conecta a la herramienta de simulación de la subestación y le permite al usuario recorrer las consignas operativas de una subestación determinada.

En este capítulo se presenta un prototipo de un simulador para una subestación de doble barra con transferencia.

### **6.1 ARQUITECTURA DEL SISTEMA**

Para la implantación del proyecto la arquitectura candidata que se ha seleccionado es la de tres capas, que consiste en una capa de cliente, una capa de dominio de la aplicación y una capa de datos, como se muestra en la Figura 107.



*Figura 107: Arquitectura de Aplicaciones de Tres Capas*

### **6.1.1. CAPA DE CLIENTE O PRESENTACIÓN**

Reúne todos los aspectos del “software” que tienen que ver con las interfases y la interacción con los diferentes tipos de usuarios. Se solicitan los datos inicialmente desde aquí, representada por navegadores Web o clientes como aplicaciones Java. Estos aspectos típicamente incluyen el manejo y aspecto de las ventanas, el formato de los reportes, menús, gráficos y demás elementos en general.

### **6.1.2. CAPA DEL DOMINIO DE LA APLICACIÓN**

Reúne todos los aspectos del “software” que automatiza o apoya los procesos de negocio realizados por el usuario. Estos aspectos incluyen las tareas que forman parte de los procesos, las reglas y restricciones que aplican. Esta capa también recibe el nombre de la capa de la Lógica de la Aplicación o de Negocio.

### **6.1.3. CAPA DE DATOS**

Reúne todos los aspectos del “software” que tienen que ver con el manejo de los datos. Utiliza bases de datos relacionales u otras fuentes de datos finales, por lo cual se le denomina la capa de las Bases de Datos.

De acuerdo con la arquitectura planteada y con la disponibilidad de recursos “software” para el desarrollo de la aplicación se ha seleccionado la siguiente plataforma de trabajo:

#### **6.1.4. SISTEMAS OPERATIVOS**

La aplicación se ha desarrollado para estar residente en servidores que usan Microsoft Windows 2000 server, y ejecutarse desde estaciones de trabajo con Microsoft Windows NT Workstation o Windows XP. La elección se hizo por la posibilidad de desarrollar aplicaciones de tres capas y para facilitar la instalación en los servidores de ISA.

#### **6.1.5. MANEJADORES DE BASES DE DATOS**

Las bases de datos de los procedimientos operativos, de las normas de competencia y del motor de simulación se construyeron y se administran mediante Microsoft SQL Server 2000, y en la escala de trabajo local se utilizó el Microsoft Access 2000 [21].

##### **6.1.5.1. Microsoft SQL Server 2000**

SQL Server 2000 es un motor de base de datos diseñado para recibir un gran número de datos, transacciones y usuarios con facilidad. Permite escalar las aplicaciones de bases de datos, conservando su estabilidad.

##### **6.1.5.2. Microsoft Access 2000**

Es un sistema de gestión de bases de datos relacionales (SGBDR), lo cual le proporciona una serie de ventajas, todas dentro del ambiente Windows y de fácil manejo para el usuario, entre las que se destacan:

- Creación de tablas para el almacenamiento y la manipulación de la información.
- Definición de relaciones entre tablas.
- Consultas a múltiples tablas.
- Verificación de la integridad de la información.

#### **6.2 LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN: JAVA**

Se encontró en las herramientas de Java una solución para el desarrollo de la capa del cliente y para la capa intermedia. Java es un lenguaje de alto nivel con una notable librería de clases dentro de su versión estándar y, por tanto, se hace fácil y potente para el desarrollo. Se destaca por sus características de portabilidad, ya que asegura una ejecución igual en cualquier plataforma que cuente con una máquina virtual Java, algo fundamental en entornos heterogéneos como Internet.

Además, proporciona la poderosa interfase de comunicación con bases de datos JDBC (Java Data Base Connectivity) que es muy sencilla de utilizar, pues cuenta con una interfase de alto nivel y a diferencia de C++ no necesita que se especifique totalmente la

fuente de datos. Desarrollando en Java, (multiplataforma, orientada a objetos, distribuida, robusta, segura dinámica, interpretada y de múltiples hilos), y con una arquitectura de tres capas (presentación - lógica - base de datos), se consigue un sistema robusto y escalable, con la posibilidad de ir incorporando mejoras de forma gradual de cara al futuro.

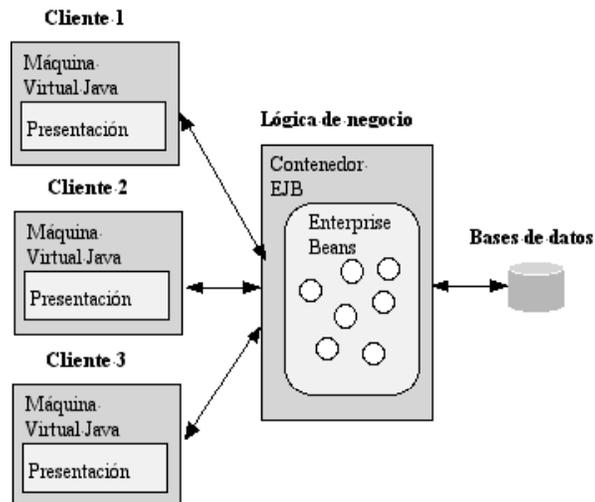


Figura 108: Arquitectura de Aplicaciones de Tres Capas usando Java

Comprender Java es comprender las razones que condujeron a su creación, las fuerzas que lo modelaron, y el legado que hereda. Como otros lenguajes de programación que le precedieron, Java es una mezcla de los mejores elementos de su rica herencia combinados con los conceptos innovadores que requiere su entorno único. Aunque Java se ha convertido en algo inseparable del entorno Internet, es importante recordar que Java es ante todo un lenguaje de programación.

Se seleccionó Java como lenguaje de programación para el simulador debido a sus características de las cuales se resaltan las siguientes:

- Simple.
- Seguro.
- Portable.
- Orientado a objetos.
- Robusto.
- Multihilo.
- Arquitectura neutra.
- Interpretado y de alto de rendimiento.
- Distribuido.

## 6.3 DESARROLLO ORIENTADO A OBJETOS

Una manera de definir la estructura o esqueleto del sistema a representar mediante programación orientada a objetos, es mediante diagramas de clases y diagramas de casos de uso, donde los primeros permiten abstraer o representar los objetos reales que se van a utilizar en el sistema, y los segundos, el comportamiento del sistema con respecto a los actores o usuarios del mismo. A continuación se realizará una breve descripción de las clases y de los casos de uso aplicados a los modelos de la subestación [11].

### 6.3.1. DIAGRAMA DE CLASES

En el diagrama de clases es donde se definen las características de cada una de las clases, interfaces y relaciones de dependencia. Es decir, es donde se da rienda suelta a los conocimientos de diseño orientado a objetos, definiendo las clases e implementando las relaciones de herencia y agregación. En el diagrama de clases se debe definir cada una de las clases y su relación con las demás.

Una clase está representada por un rectángulo con tres apartados, el primero para indicar el nombre, el segundo para los atributos y el tercero para los métodos.

Cada clase debe tener un nombre único, que las diferencie de las otras.

Un atributo representa alguna propiedad de la clase que se encuentra en todas las instancias de la clase. Los atributos pueden representarse sólo mostrando su nombre, mostrando su nombre y su tipo, e incluso su valor por defecto.

Un método es la implementación de un servicio de la clase, que muestra un comportamiento común a todos los objetos. En resumen, es una función que le indica a las instancias de la clase que realicen una función u operación determinada.

Para separar las grandes listas de atributos y de métodos se pueden utilizar estereotipos.



Figura 109: Representación de una clase

En la Figura 109 se puede observar un ejemplo. La clase usuario contiene tres atributos. NOMBRE que es tipo *public*, DIRECCIÓN que es tipo *protected* y SITUACIÓN que es tipo *private*. SITUACIÓN empieza con el valor 3. También dispone de tres métodos *Entrar*, *Salir* y *Trabajar*.

### 6.3.2. DIAGRAMAS DE CLASE PARA EL DESARROLLO DEL SIMULADOR

En general para el desarrollo del simulador se crearon tres diagramas de clases en los cuales se interrelacionan los componentes de una subestación de transmisión de energía eléctrica[11]. En los tres diagramas se representan las relaciones de dependencia existentes entre estos equipos para los niveles de operación 0, 1 y 2. En el primer diagrama (Figura 110) se encuentran las clases que representan los equipos pertenecientes a los circuitos de cierre y apertura de los equipos de patio, como: selectores, contactores, fuentes, pulsadores y bobinas. El segundo diagrama, ver Figura 111, relaciona las clases del primer diagrama con los cables y con la clase que representa el circuito de control de los equipos de patio, esto como consecuencia de que los circuitos de control contienen elementos como pulsadores, contactores, bobinas, etc. Y por último, el tercer diagrama (Figura 112) que relaciona a los equipos de potencia y las interfases para controlar su operación. Entre los equipos encontrados en este diagrama se tienen: interruptores monofásicos, interruptores trifásicos, seccionadores, barrajes, áreas, subestación y algunos equipos de control encontrados en nivel uno como los controladores lógicos programables – PLC.

#### 6.3.2.1. Diagrama de clases del circuitos de control de interruptores y seccionadores

Los circuitos de cierre y apertura son los circuitos que permiten el control del cierre y la apertura de los equipos de patio de la subestación tales como interruptores y seccionadores. Estos circuitos de control se encuentran conformados por distintos elementos o componentes eléctricos de baja tensión, descritos en la Figura 110. En el mismo diagrama se puede observar que todos los componentes de control tienen características y funciones en común, las cuales están denotadas en la clase padre o superclase 'ComponenteControl', es decir, todos los componentes de los circuitos de control tienen las siguientes características o atributos heredados de esta clase padre:

- Posibilidad de entrar en falla o no.
- Tensiones distintas o iguales en cada uno de sus bornes.
- Botones en cada uno de sus bordes que permiten visualizar la tensión en un borne determinado.
- Una posición específica dentro del circuito de control.

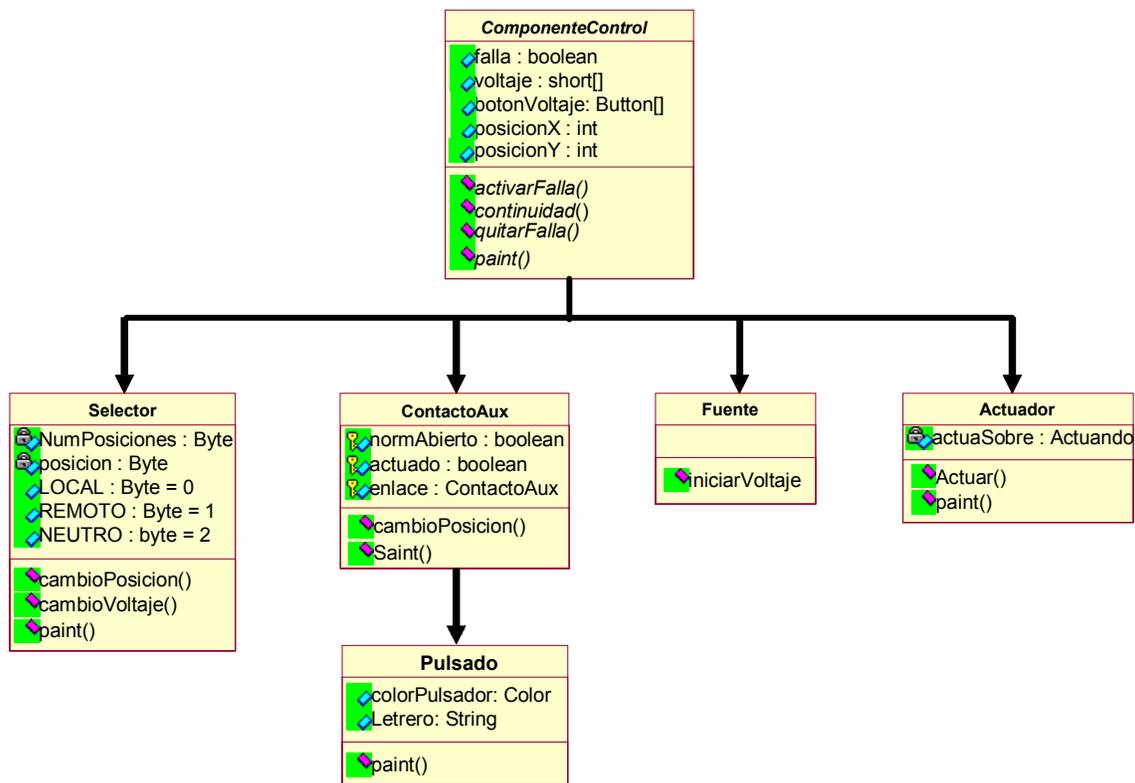


Figura 110: Diagrama de clases de los circuitos de control de interruptores y seccionadores.

Por otro lado los componentes de un circuito de control también realizan ciertas funciones en común como las siguientes:

- Activar una falla en cualquier momento.
- Revisar continuidad. Determinar si están en falla o no.
- Desactivar una falla. Salir del estado de falla en que se encuentra.
- Determinar como es su apariencia física dentro del circuito de control. Dibujo dentro del plano del circuito de control.

Iguales observaciones es posible realizarlas para los demás equipos dentro del circuito de control que heredan las características de la clase padre 'ComponenteControl' como selector, ContactoAux, Pulsador y demás.

Cabe anotar que la clase 'Actuador' representa a las bobinas o cualquier elemento en el cual se carga la última acción en la orden de cierre o apertura del equipo de patio a operar.

### 6.3.2.2. Diagrama de clases y agregación de interruptores y seccionadores

Consecuentemente con el diagrama anterior, en la Figura 111 se muestra la clase que representa a un circuito de control (CirControl), los elementos que contiene y los elementos que contienen circuitos de control como es el caso de los cables. Allí se esboza la relación de cantidad entre cada una de las clases que se muestran. Por ejemplo, se observa que un circuito de control puede contener varios componentes de control (selectores, contactores, pulsadores, etc), a su vez cada componente de control puede contener varios cables, y finalmente cada cable puede pertenecer a varios circuitos de control. Lo anterior es coherente con lo que se puede ver en una subestación real.

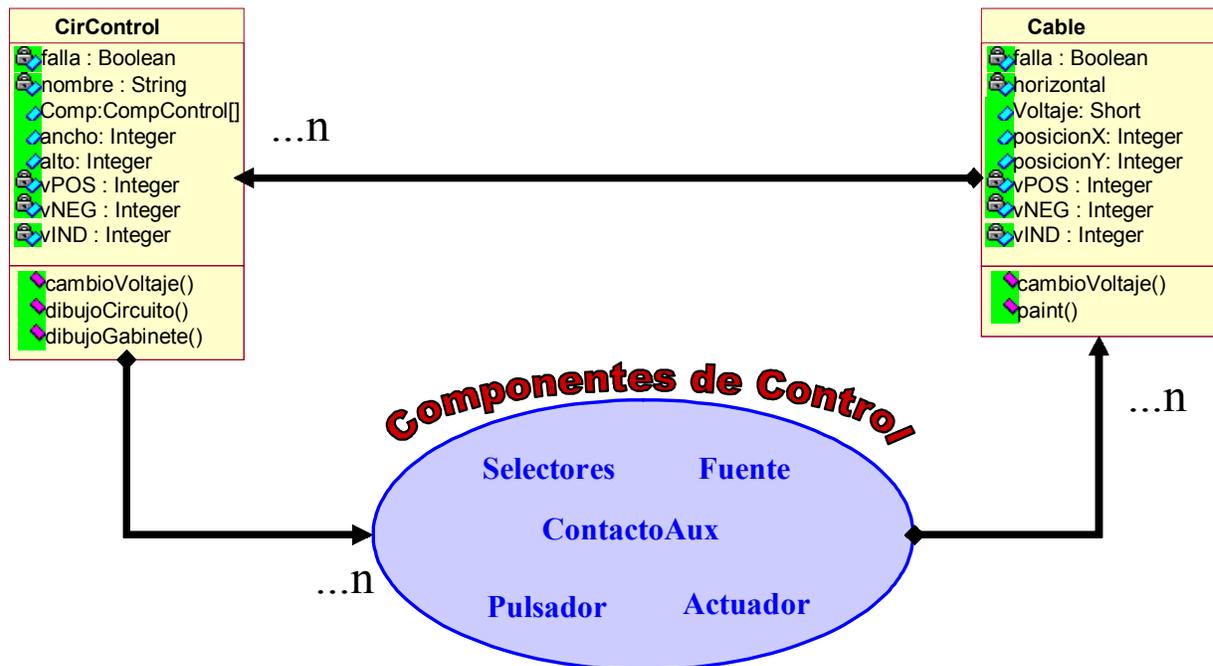


Figura 111: Diagrama de clases y agregación del circuito de control

Las siguientes son las características o atributos relevantes de la clase que representa los circuitos de control ('CirControl'):

- Puede contener varios de equipos o componentes de control.
- Puede tener tres niveles de tensión: positiva, negativa e indefinida.
- Posee una dimensión.

Por el contrario, dentro de los métodos o funciones de la clase 'CirControl', se resaltan las siguientes:

- Determinar la tensión en todos los bornes de las componentes del circuito de control cuando alguno de los mismos cambia de estado.

- Determinar cómo es la apariencia física y posición de cada uno de los componentes que posee dentro del plano del circuito de control. Dibujo del plano del circuito de control y el gabinete de patio (pulsadores de cierre-apertura y selector Local-Remoto-Apagado).

### 6.3.2.3. Árbol de herencia y agregación de los equipos de patio

En el diagrama de la Figura 112 se plantea el árbol de herencia y la agregación de los equipos de potencia y algunas clases necesarias para su operación; además, también se encuentra la clase PLC para el control de los equipos de patio de la subestación desde el nivel 1.

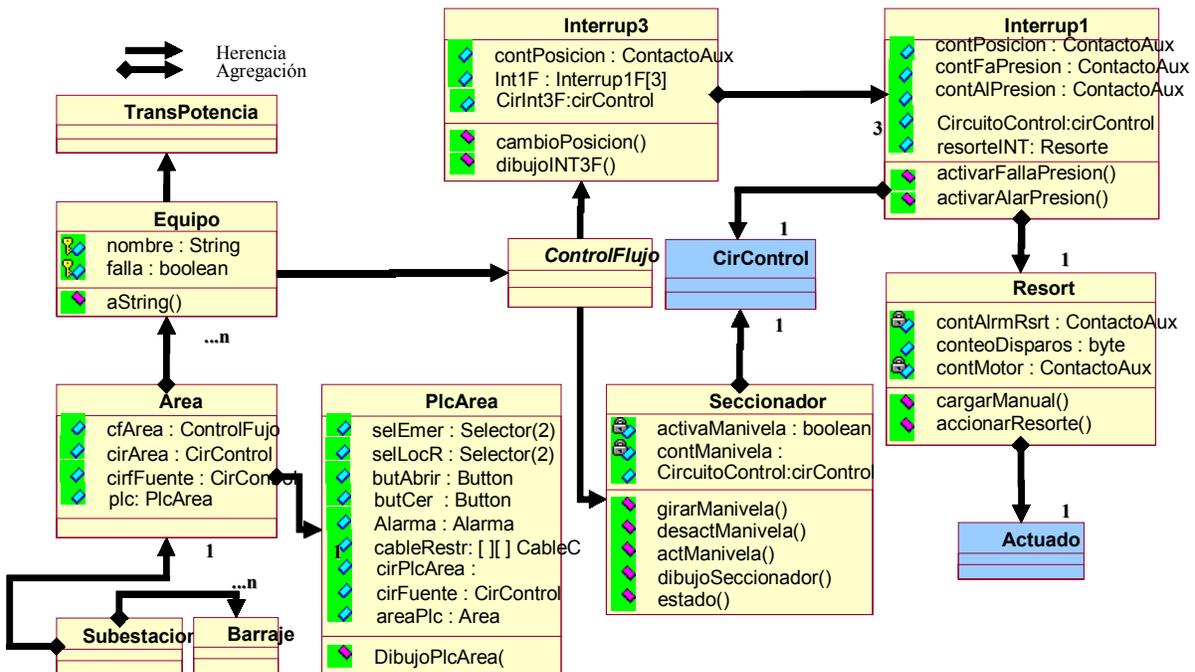


Figura 112: Árbol de herencia y agregación de los equipos de patio.

Del diagrama de herencia y agregación de la parte superior se puede destacar lo siguiente:

- Cada seccionador e interruptor monofásico contiene un resorte y circuito de control para el cierre y apertura.
- Los interruptores trifásicos contienen tres interruptores monofásicos.
- Un área de la subestación contiene un PLC y varios equipos de patio.
- Todos los equipos de patio tienen características en común las cuales están contenidas en la clase padre 'Equipo'.

### **6.3.3. DIAGRAMA DE CASOS DE USO**

Se emplea para visualizar el comportamiento del sistema, una parte de él o una sola clase, de forma que se pueda conocer cómo responde esa pieza del sistema. El diagrama de uso es muy útil para definir cómo debería ser el comportamiento de una parte del sistema, ya que especifica cómo deben comportarse más no como están implementadas las partes que define. El diagrama de casos de uso también puede utilizarse para que los expertos se comuniquen con los informáticos sin llegar a niveles de complejidad. Un caso de uso especifica un requerimiento funcional, es decir, indica que una parte del sistema debe hacer esto cuando ocurra aquello. Ver diagrama de casos de uso presentado en la Figura 113 de la página siguiente.

*Figura 113: Casos de uso*

## 6.4 FUNCIONAMIENTO DEL “SOFTWARE”

Una vez arrancado el programa se presenta la pantalla “Sub Guatiguará” la cual está conformada por:

- En la parte izquierda superior de la pantalla el botón “Consignas” el cual permite la ficha “Seleccionar Consigna”.
- En la parte izquierda se encuentra el árbol de navegación el cual permite ir rápidamente a cualquiera de las pantallas de nivel 2, 1 y 0.
- En la parte central se tiene el panel “Nivel 2 Guatiguará”, con la distribución de la subestación Guatiguará, desde el nivel dos de operación.

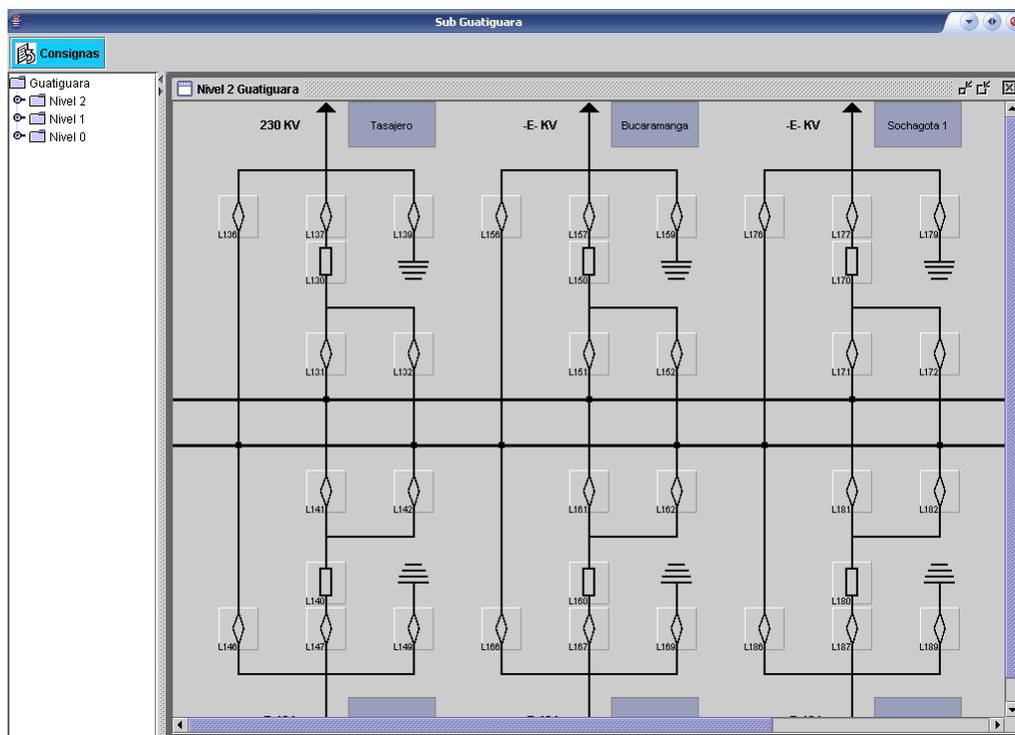


Figura 114: Pantalla principal del programa (nivel 2)

### 6.4.1. ACCIONES CON EL RATÓN SOBRE EL PANEL “NIVEL 2 GUATIGUARÁ”

Pulsando “clic” izquierdo sobre cada uno de los botones identificados con los nombres de cada área de la subestación como son: Tasajero, Bucaramanga, Primavera, Comuneros, etc. Abrirá la pantalla correspondiente al área seleccionada.

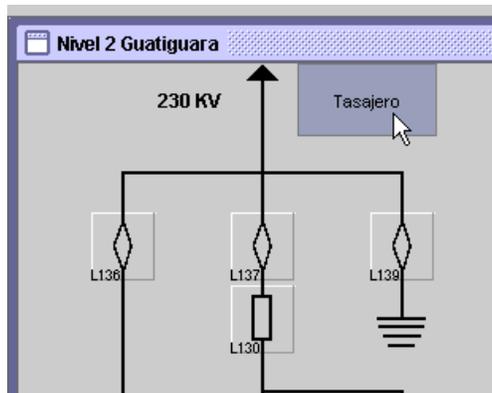


Figura 115: Ingreso al campo de una subestación en el nivel 2

Pulsando “clic” derecho sobre un seccionador (L136, L137, L139, etc.) o interruptor (L130) se abrirá el menú desplegable el cual puede permitir ir al nivel 0 del equipo seleccionado.

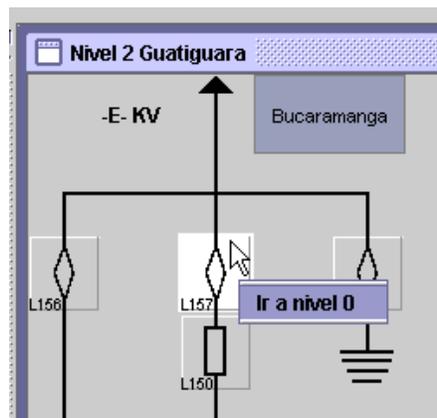


Figura 116: Acceso al patio de la subestación

Pulsando “clic” derecho sobre los espacios entre los interruptores y seccionadores se despliega el menú que permite ir al nivel 1 del área seleccionada.

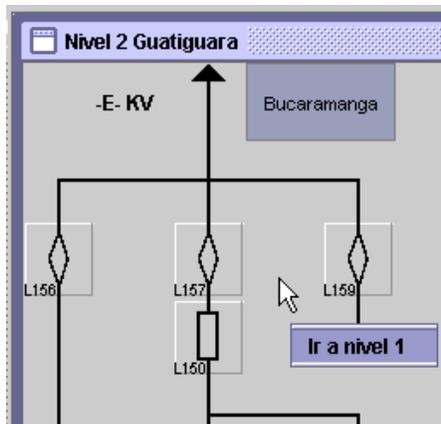


Figura 117: Acceso al nivel uno de los campos de la subestación (casetas de control o mímicos)

#### 6.4.2. ACCIONES CON EL RATÓN SOBRE EL ÁRBOL DE NAVEGACIÓN

Pulsando doble “clic” izquierdo sobre cada una de las carpetas principales como son Guatiguará, Nivel 2, Nivel 1, Nivel 0 y Áreas, se expande o comprime la información de las diferentes pantallas.



Figura 118: Desplazamiento por los niveles de la S/E desde el árbol de navegación

#### 6.4.3. ACCIONES CON EL RATÓN SOBRE EL PANEL “NIVEL 2 AREA”

Pulsando “clic” izquierdo sobre un interruptor o seccionador se abrirá un panel donde se puede realizar la operación de apertura o cierre del equipo seleccionado, dicha operación es posible sólo cuando los botones “Abrir” y “Cerrar” se encuentran habilitados; cuando la operación a realizar es válida, los botones se habilitan automáticamente. Se debe tener en cuenta que los seccionadores se demoran 2 segundos en realizar la operación de cerrado o apertura.

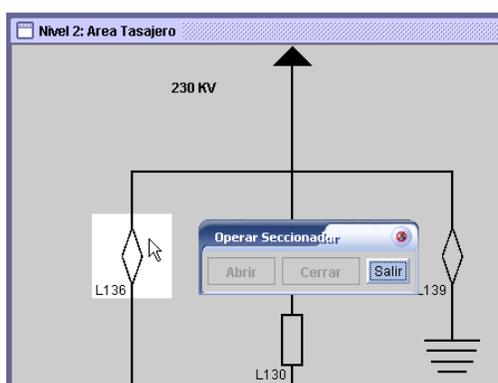


Figura 119: Operación de equipos de patio desde nivel 2

Pulsando “clic” derecho sobre los espacios entre los interruptores y seccionadores se despliega el menú que permite ir al nivel 1 del área seleccionada.

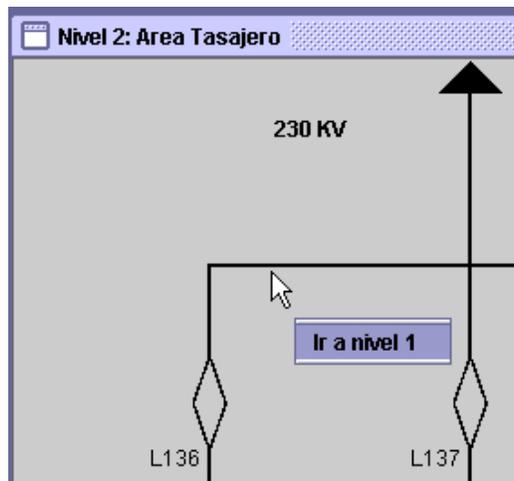


Figura 120: Acceso al nivel 1 desde el nivel 2 (mímicos o casetas de control)

#### 6.4.4. ACCIONES CON EL RATÓN SOBRE EL PANEL “NIVEL 1

Pulsando “clic” derecho sobre un seccionador o interruptor se abrirá el menú despegable el cual al ser pulsado permitirá ir al nivel 0 del equipo seleccionado.

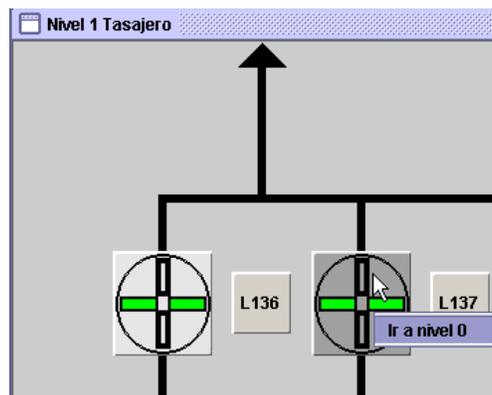


Figura 121: Acceso al nivel 0 a desde el nivel 1 (patio de la S/E)

Pulsando sobre los botones con las etiquetas correspondiente al nombre de los equipos (L136, L137, L130, L131, etc.), se selecciona el interruptor o seccionador que se desea operar. Una vez seleccionado el botón cambia su color a amarillo y se procede a realizar la operación de apertura o cierre, pulsando el botón correspondiente. Dicha operación sólo se realiza si está habilitada.

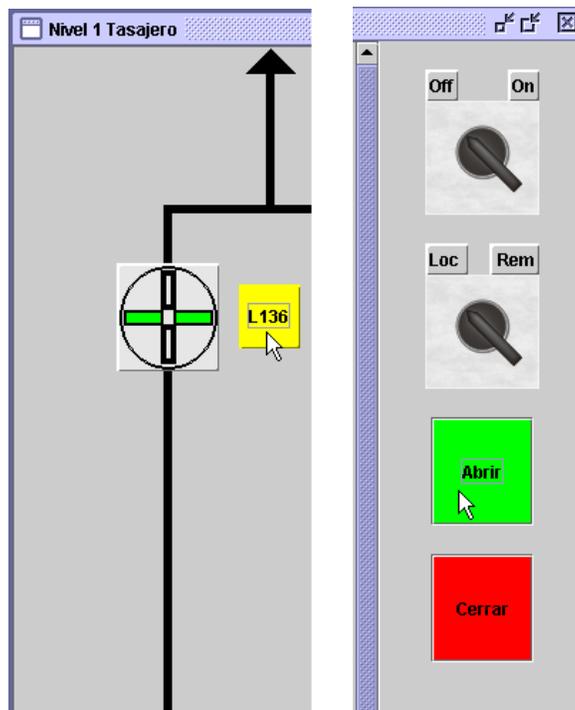


Figura 122: Operación de los equipos de patio desde nivel 1

Para cambiar la posición de los selectores se pulsa sobre las etiquetas en la parte superior (Off, On, Loc, Rem).

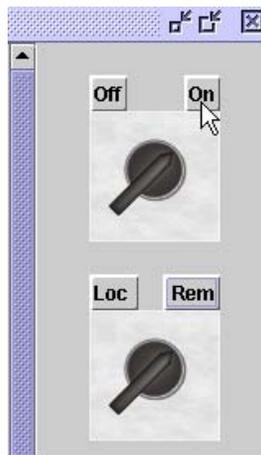


Figura 123: Selectores de control de nivel 1

#### 6.4.5. ACCIONES CON EL RATÓN SOBRE LAS VENTANAS “SECCIONADOR

Pulsando sobre el botón “Ver circuito gabinete”, se despliega la ventana “Circuito del gabinete del seccionador”.

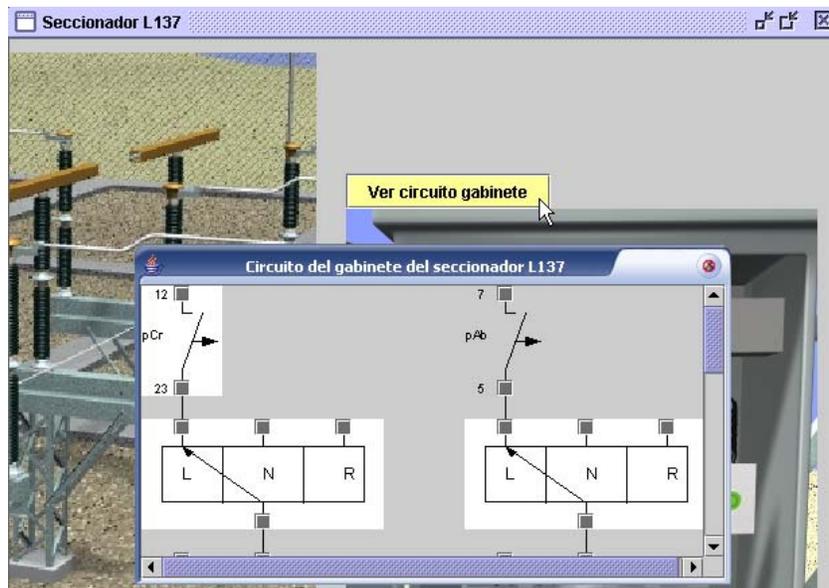


Figura 124: Circuito de control del seccionador L137

Si el puntero del ratón está sobre la gráfica del gabinete se presentan automáticamente los botones de abrir y cerrar con el selector (local – neutro – remoto), sobre los cuales se puede realizar la operación de cierre o de apertura del seccionador si dicha operación se encuentra habilitada.

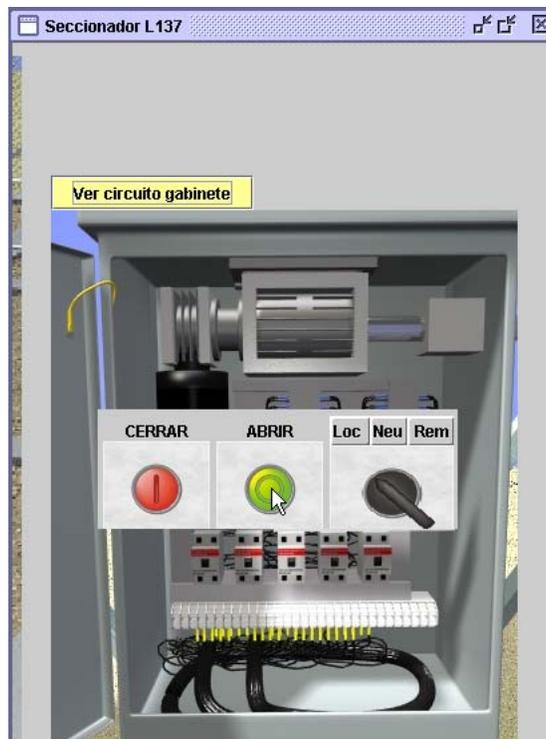


Figura 125: Gabinete de control del seccionador (nivel 0)

#### 6.4.6. ACCIONES CON EL RATÓN SOBRE LA VENTANA “INTERRUPTOR”

De igual forma que en la ventana del seccionador se pueden ver los diferentes circuitos de los gabinetes, para el interruptor se tiene disponible el circuito para cada interruptor monofásico y un gabinete adicional con el control sobre los tres polos.

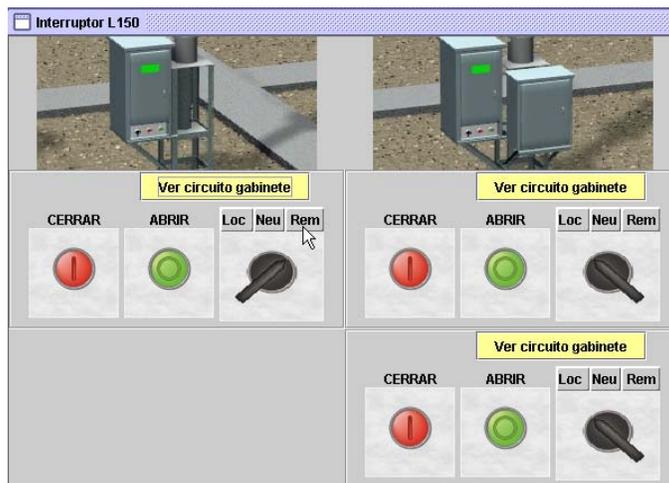


Figura 126: Gabinete de control del interruptor (nivel 0)

#### 6.4.7. ACCIONES CON EL RATÓN SOBRE LA VENTANA “CIRCUITO DEL GABINETE”

Pulsando “clic” izquierdo sobre los pulsadores y selectores se puede modificar su estado.

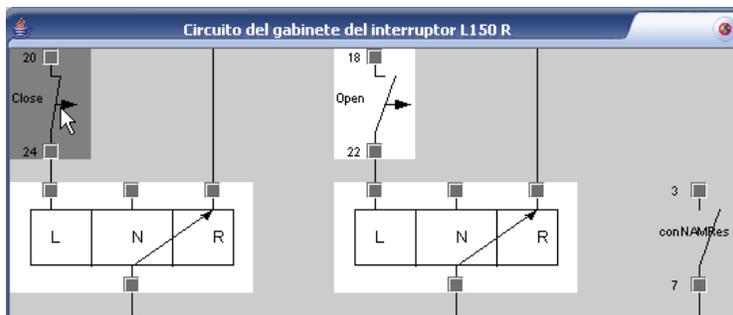


Figura 127: Circuito de disparo del polo R del interruptor L150

Pulsando sobre los diferentes bornes se despliega la tensión.

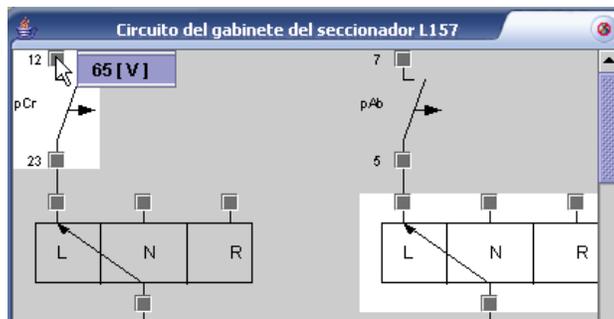


Figura 128: Circuito de control del seccionador L157

Pulsando “clic” derecho sobre cualquier componente del circuito se puede activar el estado de falla sobre el mismo. Para desactivarlo se realiza la misma operación.

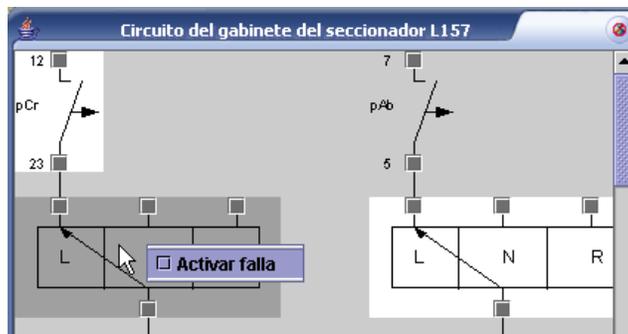


Figura 129: Activación de fallas en los elementos del circuito de control

#### 6.4.8. CORRER CONSIGNAS

Para correr una consigna se pulsa sobre el botón “Consigna” el cual se encuentra en la parte superior izquierda de la pantalla. Al correr una consigna se desactivan las acciones (abrir, cerrar, activar falla, cambiar de posición un selector) que puede realizar el usuario sobre el área bajo la cual se corre la consigna.

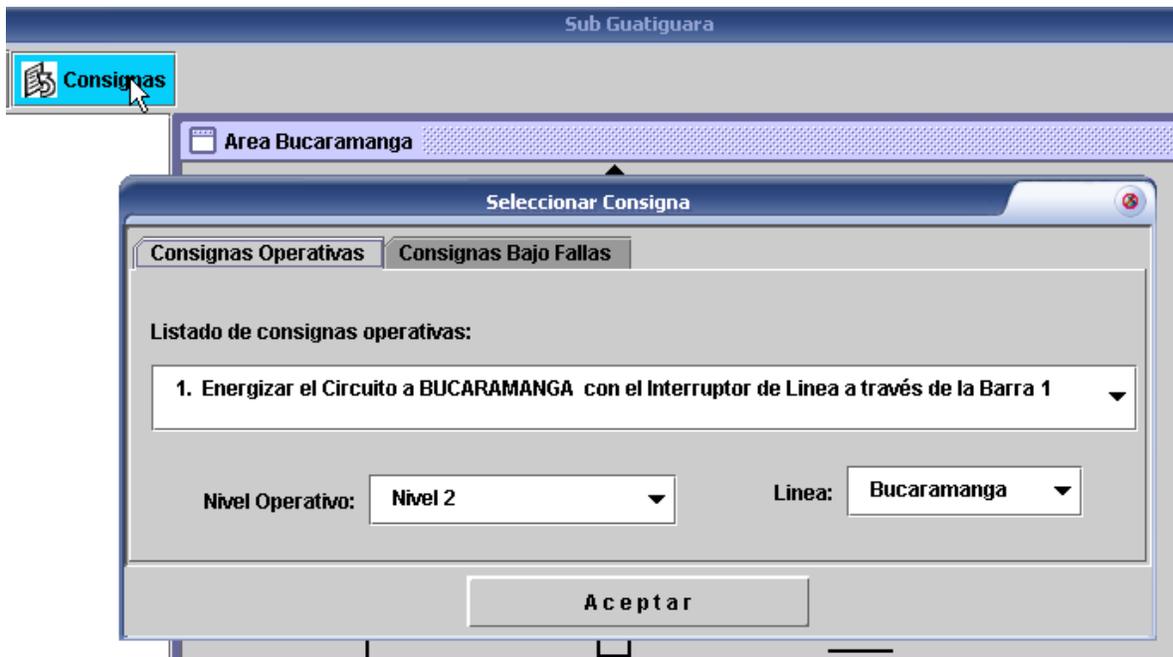


Figura 130: Ventana para la selección de consignas operativas

Una vez abierta la ventana “Seleccionar Consigna”, en la ficha “Consignas Operativas” se realiza la selección de las diferentes opciones disponibles. Si se desea asociar una consigna con una falla, se selecciona la ficha “Consignas Bajo Fallas” y se activa la opción “Asociar esta falla a la consigna seleccionada”.

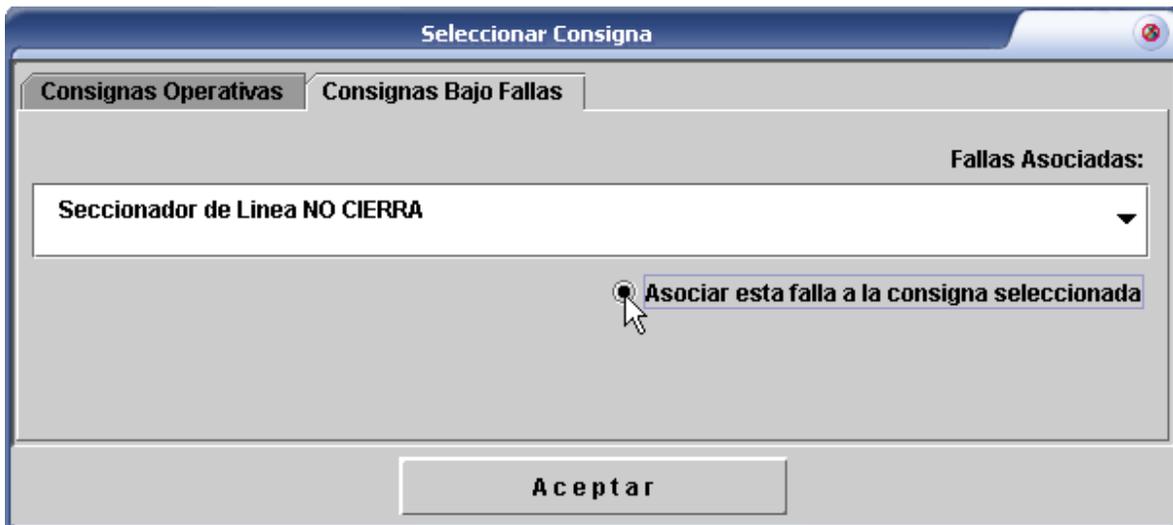


Figura 131: Asociar fallas a la respectiva consigna operativa

Al pulsar el botón aceptar, se despliega en la parte inferior una ventana, la cual permite visualizar las diferentes acciones asociadas a la consigna seleccionada. Para visualizar cada una de estas acciones el usuario debe pulsar el botón “>>”.

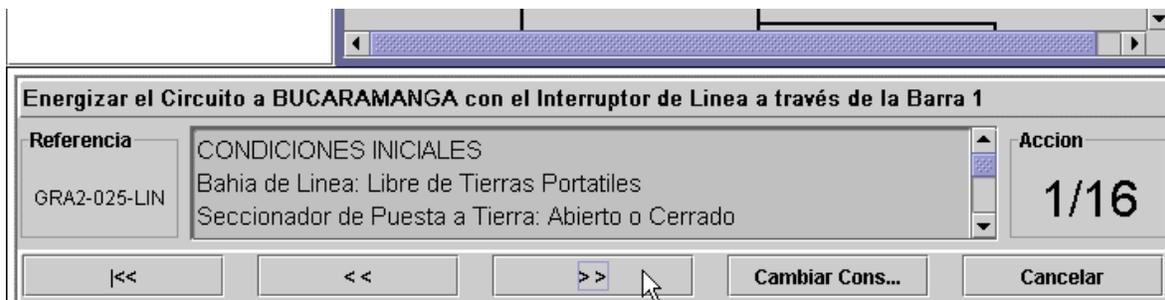


Figura 132: Despliegue de acciones de la consigna

Si se asoció una falla a la consigna, una vez se llegue al punto en el cual la falla debe activarse, se desplegará una ventana indicando las causas y soluciones asociadas a la falla. Para continuar el proceso es necesario cerrar dicha ventana.

## **7. RESULTADOS CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

Este capítulo presenta las actividades o resultados asociados con los objetivos planteados en su principio. Ellos se orientaban a la complementación y revisión del plan de contingencias de las subestaciones del CTE Oriente; el desarrollo de una metodología estructurada para representar el conocimiento inmerso en las consignas operativas con el fin de facilitar el manejo y la implantación de reglas y estrategias para la atención de fallas en las subestaciones; y la elaboración de una estructura de un sistema de simulación sobre la cual se pudiese trabajar una subestación tal como se hace en la realidad, y que permitiera el entrenamiento del personal en la realización de actividades de operación de las subestaciones.

Para satisfacer estos requisitos se organizaron las siguientes actividades: la recopilación bibliográfica e introducción al tema del trabajo, planteamiento metodológico para la validación de las consignas bajo falla, selección de los sistemas que requerían el complemento de los planes de contingencia, aplicación de la metodología de validación, modelo y estructura del conocimiento, realización del modelo general del sistema de simulación, realización de los modelos de los elementos de las subestaciones, y la elaboración del informe final. Estas actividades estaban enfocadas al conocimiento del tema, planteamiento del problema y planteamiento de la solución.

Los resultados, conclusiones y recomendaciones dan cuenta de los aspectos generales del desarrollo del proyecto y de los impactos que se obtuvieron con su ejecución. El establecimiento del grado de cumplimiento del proyecto se basa en las actividades realizadas y los resultados de esas actividades expuestas en los capítulos anteriores.

### **7.1 RESULTADOS**

Normalmente los operadores no pueden intervenir en los equipos de las subestaciones de transmisión por el impacto que pueden ocasionar al Sistema Interconectado Nacional. Las consignas operativas y bajo falla se desarrollaron para que el operador pudiera adelantar acciones de detección del problema sólo si siguen estos procedimientos. Por tanto la revisión y complementación de estos procedimientos y la estructura del sistema de simulación para entrenamiento permitirán al operario de subestaciones eléctricas actuar rápidamente y en forma correcta ante la presencia de una falla no destructiva. Esto constituye la contribución más valiosa del desarrollo del presente trabajo.

Indirectamente, con la implementación del proyecto se aumenta la calidad del sistema eléctrico puesto que se manejan los indicadores de calidad definidos por la CREG, los cuales pueden ser afectados por factores como son: los programas de mantenimiento, la forma de operar los equipos (local/remoto), los procedimientos de respuesta ante fallas y

la capacidad de respuesta del personal. Este proyecto se enfocó en el mejoramiento de la capacitación del personal y el mejoramiento de los procedimientos de respuesta ante fallas. Con esto se contribuye al mejoramiento de los índices de calidad del sector eléctrico.

Se desarrolló la representación de los procedimientos operativos de las subestaciones bajo diferentes técnicas y herramientas de representación. Esto permitió seleccionar las formas más adecuadas de representar el conocimiento desde el punto de vista de la inteligencia artificial, incluyendo los procedimientos depurados en la base de conocimientos.

Se estructuró un modelo de entrenamiento que incluye los factores que deben tenerse en cuenta en las actividades de entrenamiento: los procesos productivos (consignas operativas), los elementos formativos (formación basada en competencias) y las herramientas de formación (simulación). Se logró plantear la estructura del modelo general con estos tres elementos o factores que registran las bases para el desarrollo de las herramientas de simulación.

La metodología de estrategias de atención de fallas se aplicó a la elaboración de las consignas bajo falla para los sistemas de medida, comunicaciones y registro de fallas, y los planes de contingencia para fallas destructivas en salas de control y protección de diez subestaciones en la zona atendida por el CTE Oriente de Interconexión Eléctrica S.A. complementando la base de datos de aproximadamente 30000 consignas.

Se planteó y aplicó una metodología para el proceso de validación de las consignas bajo falla que permitió identificar y corregir los procedimientos operativos. Con el desarrollo de este proceso se lograron proporcionar al operador, herramientas importantes que hacen que su papel en la operación de la subestación sea más activo, contribuyendo con la atención de problemas que pueden causar indisponibilidad de activos.

## **7.2 CONCLUSIONES**

El planteamiento de un sistema de simulación para entrenamiento permitió identificar los factores que permiten al personal que atiende las subestaciones, cumplir con una actividad permanente de capacitación en la atención de fallas de equipos y en la operación de subestaciones de transmisión.

El modelo del sistema de simulación para el entrenamiento y la metodología de representación del conocimiento, permiten el desarrollo de prototipos de entrenamiento para subestaciones de transmisión que incluyan los procedimientos operativos en la base de conocimiento, las configuraciones en el motor de simulación y las necesidades de formación en el sistema de entrenamiento. Estos prototipos permiten el entrenamiento y la capacitación de los operadores de subestaciones, dependiendo de las necesidades de la configuración de la subestación en la que se trabaje.

El modelo de simulación para entrenamiento pretende dar cada vez más autonomía y versatilidad a los asistentes de subestaciones debido a que se ven sometidos a situaciones y circunstancias donde deben aplicar sus conocimientos y habilidades para resolver situaciones inesperadas o problemas imprevistos.

El estudio de subestaciones y su estructura permitió desagregarlas conceptualmente, abstraer sus características y proponer modelos funcionales y de comportamiento. Con esto se facilita el desarrollo de simuladores que tengan en cuenta el comportamiento real, los niveles de control, las características funcionales y los enclavamientos necesarios.

A partir del estudio en profundidad de las subestaciones, se desarrollaron modelos funcionales y lógicos para representar su funcionamiento. Los modelos contemplan los sistemas esenciales para la operación dentro del Sistema Interconectado y se caracterizan por representar la lógica de funcionamiento de las partes relevantes para emular la subestación, sin importar el grado de complejidad que tenga. A su vez, incorporan dos cosas fundamentales para el trabajo: las condiciones de operación normales y las condiciones de los equipos bajo falla. Este modelo permite no sólo las particularizaciones a subestaciones del CTE Oriente, sino a cualquier subestación mediante su construcción en el motor de simulación y la introducción de los procedimientos operativos particulares en la base de conocimientos. Esto permite tener, mediante la construcción, prototipos de subestaciones con diversas características.

El modelo de la Subestación está compuesto por tres partes: la configuración, los sistemas funcionales y los servicios auxiliares. La configuración se refiere al arreglo de los equipos de patio, los sistemas funcionales permiten la operación y control de las subestaciones (protecciones, registro de eventos,...) y los servicios auxiliares entregan la energía que requieren los equipos de accionamiento y control.

La estructura y representación del conocimiento de los procedimientos operativos permite su revisión y actualización, así como la elaboración de herramientas que permiten su manipulación sistemática y administración.

La identificación de las formas de representación del conocimiento adecuadas fue una tarea ardua que requirió de la adecuada asesoría de expertos en cuanto al manejo del conocimiento y del tema que se representó, por lo tanto, para futuros desarrollos, debe ser tomada de una manera responsable para que los datos representados sean los reales. Esta identificación produce una sinergia en que los expertos en la parte técnica (teórica y práctica) se asocian con los expertos en modelado y simulación para representar los procesos operativos y de búsqueda de fallas posibilitando la inclusión de nuevos conocimientos de subestaciones, operación y mantenimiento.

El complemento de las consignas bajo falla y la elaboración del plan de contingencias para fallas destructivas en las salas de control y protección reducen el grado de incertidumbre sobre las acciones a realizar por parte del personal que atiende la subestación, en caso de presentarse una falla o mal funcionamiento.

La validación de las consignas bajo falla no destructiva tiene como principal recurso al operador, asegura la corrección y adecuación de la consigna a los equipos y sistemas específicos de la subestación, y permite el mejoramiento continuo mediante la selección de los parámetros que conllevan a las correcciones.

La eficacia de los procedimientos de atención de fallas, resultado del proyecto está asegurada, debido fundamentalmente al alto nivel de interacción entre el personal con que cuenta Interconexión Eléctrica S.A. ISA y el grupo de investigación encargado del desarrollo del proceso de validación.

A partir de la aplicación de las consignas bajo falla corregidas y validadas, se reduce el tiempo de indisponibilidad de los activos, permitiendo así que Interconexión Eléctrica S.A. cumpla con las metas de disponibilidad planteadas en las resoluciones de calidad del servicio, específicamente la CREG 011 de 2002.

El impacto de las estrategias de falla en los indicadores de disponibilidad se deriva de la disminución del tiempo de reparación de los componentes en falla ya que se aprovecha el personal que atiende la subestación para realizar estos correctivos y así evitar que el personal de mantenimiento se desplace al sitio.

La filosofía seguida en las consignas bajo falla no destructiva le indica al operador la forma de reaccionar ante una contingencia. Sin embargo, la ejecución exitosa de la consigna depende de la pericia y habilidades de los operadores. El operador debe tener la capacidad para interpretar planos, utilizar los equipos de medición y debe tener conocimientos de los aspectos relacionados con los equipos de patio, servicios auxiliares, control y protección.

El estudio de los procedimientos operativos permitió identificar las acciones que debe realizar el asistente de subestación para operar las subestaciones. En el desarrollo se tuvo particular cuidado en la perspectiva de sistema, puesto que las acciones sobre equipos de transmisión pueden afectar todo el sistema nacional. El estudio permitió corregir algunas falencias que persistían en los procesos operativos, así como asegurar en la simulación, la experiencia alcanzada en las actividades cotidianas.

El conocimiento obtenido del estudio de las subestaciones, en lo concerniente a su funcionamiento, su estructura operativa y la importancia que tienen en el Sistema Interconectado Nacional, resaltó el impacto que tiene el desarrollo de este proyecto y confirma la importancia para su pronta implementación.

El proyecto permite fortalecer la relación universidad empresa, estableciendo vínculos cada vez más fuertes que permiten al estudiante interactuar en un entorno laboral, y al profesional, acceder a las nuevas discusiones conceptuales propias de la evolución del conocimiento. De esta manera se deja la posibilidad de seguir esta tendencia mediante el desarrollo de nuevos proyectos que benefician a las partes.

### 7.3 RECOMENDACIONES

El prototipo “software” facilita el entrenamiento y la capacitación de los operadores de subestaciones eléctricas bajo la concepción del Sistema de Competencias Laborales, pues tiene inmersos los contenidos procedimentales, actitudinales y conceptuales necesarios y requeridos para el fortalecimiento de las falencias en la operación de subestaciones eléctricas, por tanto el desarrollo y mejoramiento de estos prototipos se debe continuar con el ánimo de incorporar estas características en los “software”.

Establecer políticas proactivas en la empresa, que permitan la implantación de los planes de contingencia y de las herramientas de simulación; y que sirvan de respaldo y apoyo en los procesos productivos, para que garantice no sólo la disminución del impacto negativo frente a situaciones de contingencia, en términos de remuneración económica y pérdidas de producción, sino también en la mejora del desempeño de los trabajadores en su ámbito de producción.

El proyecto marcó las pautas para el desarrollo de sistemas enfocados al entrenamiento individual. Se recomienda plantear y desarrollar sistemas que contemplen, no sólo el desarrollo individual sino la formación de grupos mediante la simulación del sistema interconectado a través de la experimentación.

Desarrollar modelos de las subestaciones que contemplen otras características del sistema de la subestación y del sistema interconectado que permitan el desarrollo de sistemas de formación en grupo y la simulación de fallas que no sólo incluyan la actuación de una subestación y sus elementos sino las características de fallas de las variables de tensión y corriente del sistema interconectado.

Extender el modelado y la representación del conocimiento a los procesos de formación y normas de competencia y desarrollar un sistema para la administración de las normas de competencia y de la formación, que permita su administración y representación e interacción con los sistemas desarrollados.

Plantear una revisión periódica de los procedimientos operativos que utilicen los parámetros establecidos en la validación para su actualización.

Seguir desarrollando este tipo de herramientas para el entrenamiento de asistentes de subestación y ampliarla a otro tipo de roles como el mantenimiento.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1]. ABB Network Partner AB. Sistema de control coordinado (Sochagota-Guatiguará). Especificaciones Funcionales. XR 321-160-MAA. 1994.
- [2]. ABB, Asea Brown Boveri Ltda (Pereira). Diagrama de sistema de control coordinado S/E Guatiguará. Folder biblioteca protecciones CTE Oriente.
- [3]. ABB, Asea Brown Boveri Ltda. Network Partner AB. Manual de operación y mantenimiento del terminal de control REL 511. 1994.
- [4]. ABB, Asea Brown Boveri Ltda. Network Partner AB. Manual de operación y mantenimiento del sistema de control coordinado (Documentos de referencia), Folder A194-III. .
- [5]. ABB. Manual de Operación y Mantenimiento, Equipo de patio. Subestación Comuneros 230 kV. Folder A-100.
- [6]. Álvarez C. E. “Desarrollo del plan de contingencia para equipo de la subestación San Mateo propiedad de Interconexión Eléctrica S.A. E.S.P. ISA CTE Oriente”. Proyecto de pregrado de Ingeniería Eléctrica, dirigido por G. Carrillo y J. J. Morra. UIS 2001
- [7]. Álvarez E., Quintero J. “Desarrollo del plan de contingencia para fallas destructivas de transformadores e interruptores de potencia de propiedad de Interconexión Eléctrica S.A. E.S.P. ISA CTE Oriente”. Proyecto de pregrado de Ingeniería Eléctrica, dirigido por: G. Carrillo, J. Jaimes y J. J. Mora. UIS. Bucaramanga. 2001..
- [8]. Antelíz Ramón. “Desarrollo del plan de contingencia para equipo de la subestación Ocaña propiedad de Interconexión Eléctrica S.A. E.S.P. ISA CTE Oriente”. Proyecto de pregrado de Ingeniería Eléctrica, dirigido por G. Carrillo y J. J. Mora. UIS 2001.
- [9]. Ariza J. O.; Santamaría L. A. “Desarrollo del plan de contingencia para equipo de la subestación Guatiguará propiedad de Interconexión Eléctrica S.A. E.S.P. ISA CTE Oriente”. Proyecto de pregrado de Ingeniería Eléctrica, dirigido por G. Carrillo y J. J. Mora. UIS 2001.
- [10]. Blackburn, J. Lewis. Protective Relaying, Editorial Marcel Dekker, Impreso en Estados Unidos de Norte América, New York 1992.

- [11]. Carrillo Caicedo G, GISEL. Informe técnico de avance proyecto” sistema de simulación para la operación y la atención de fallas de subestaciones de transmisión” Bucaramanga 2003
- [12]. Carrillo, Gilberto; Mora, Juan. Desarrollo del plan de contingencia para equipos críticos principales y equipos de subestaciones, ISA-CTE Oriente, universidad industrial de Santander, Informe 2000.
- [13]. Colomer Juan, Meléndez Joaquín, Ayza Jodi. Sistema de supervisión: introducción a la monitorización y supervisión experta de posesos. Métodos y herramientas. Editorial CEA-IFAC primera edición. Barcelona, noviembre de 2000.
- [14]. Corredor Martha. Principios de inteligencia artificial y sistemas expertos, universidad industrial de Santander. Bucaramanga. 2000.
- [15]. Coss Bu, Raúl. Simulación: Un Enfoque Práctico. 1era edición. Editorial Limusa. México, 1998.
- [16]. Coss Bu, Raúl. Simulación: Un Enfoque Práctico. 1era edición. Editorial Limusa. México, 1998.
- [17]. Díaz Fernández Adenso. Optimización heurística y redes neuronales. Editorial paraninfo. Madrid, España. 1996.
- [18]. Duarte Salcedo Ayleen. Sandoval Soto Marcela. Consignas de falla para los equipos de medida y equipos de comunicaciones PLP de las subestaciones del ISA CTE Oriente. Proyecto de pregrado de Ingeniería electrónica, dirigido por G. Carrillo y J. Ariza. Bucaramanga. UIS 2002.
- [19]. Ferreira Nancy, C. “Desarrollo del plan de contingencia para equipo de las subestaciones Toledo y Samoré propiedad de Interconexión Eléctrica S.A. E.S.P. ISA CTE Oriente”. Proyecto de pregrado de Ingeniería Eléctrica, dirigido por G. Carrillo y J. J. Mora. UIS 2001.
- [20]. Fishman G.S. Conceptos y Métodos en la Simulación Digital de Eventos Discretos, Editorial Limusa. México, 1978.
- [21]. Gelvis Vega J. y Gáfaró Eugenio F. Propuesta de un sistema de simulación para el entrenamiento del personal que atiende la operación de subestaciones eléctricas de transmisión. Proyecto de pregrado de Ingeniería de sistemas, dirigido por G. Carrillo y J. J. Mora. Bucaramanga. UIS. 2004.

- [22]. Gilberto Carrillo-Caicedo, Jorge Ariza Castillo. "Validación y complementación de los planes de contingencia", Informe de avance del proyecto de investigación, correspondiente al 50 %. ISA-CTE Oriente, 2001
- [23]. Gilberto Carrillo-Caicedo, Juan José Mora-Flórez Jorge Antonio Jaimes-Báez. Estrategias para el restablecimiento del servicio en subestaciones de transmisión. Mundo eléctrico colombiano, vol 16 #46 Enero- Marzo. 2002.
- [24]. Gualdrón Vásquez B. Díaz González L. Software para apoyar el entrenamiento de los operadores de las subestaciones de transmisión de energía eléctrica. Proyecto de pregrado de ingeniería de sistemas dirigido por: G. Carrillo y L. C. Gómez. UIS. Bucaramanga. 2004.
- [25]. Gutiérrez L.; Niño J. "Desarrollo del plan de contingencia para equipo de las subestaciones Los Palos, Banadía y Caño Limón, propiedad de Interconexión Eléctrica S.A. E.S.P. ISA CTE Oriente". Proyecto de pregrado de Ingeniería Eléctrica, dirigido por G. Carrillo y J. J. Mora. UIS 2001.
- [26]. Hilera José R, Martínez Víctor. Redes Neuronales Artificiales, fundamentos, modelos y aplicaciones. Alfaomega, RA-MA. Madrid, España.
- [27]. Interconexión Eléctrica S.A –ISA-, Gerencia de producción. Manual de operación. Guía de elaboración. Documento GP-015-99. Medellín octubre de 1999.
- [28]. James R. Latimer, Bruce FWollemborg, W. A. Elmore, Jalal Gohari. Manual del ingeniero electricista, operación de sistema eléctricos, sección 16
- [29]. K. Althoff; "Case-Based Reasoning. Handbook of Software Engineering and Knowledge Engineering.", kaiserslautern, Alemania. Fraunhofer Institute for Experimental Software Engineering (IESE), 2001.
- [30]. Lara L. "Desarrollo del plan de contingencia para equipo de la subestación Comuneros propiedad de Interconexión Eléctrica S.A. E.S.P. ISA CTE Oriente". Proyecto de pregrado de Ingeniería Eléctrica, dirigido por G. Carrillo y J. J. Mora. UIS 2001.
- [31]. Law A.M., Kelton W.D. Simulation Modeling & Analysis, Second Edition, McGraw-Hill. New York, 1991.
- [32]. Leiva Y. A.; Jaimes J. P. "Desarrollo del plan de contingencia para equipo de la subestación Primavera propiedad de Interconexión Eléctrica S.A. E.S.P. ISA CTE Oriente". Proyecto de pregrado de Ingeniería Eléctrica, dirigido por G. Carrillo y J. J. Mora. UIS 2001.

- [33]. Manual de ingeniería eléctrica, sección 16, operación de sistemas de energía eléctrica. México : McGraw-Hill, c1996
- [34]. Martin, R. Diseño de Subestaciones Eléctricas, McGraw Hill, México D. F., 1.987.
- [35]. Mora Florez, J. 2001. Desarrollo del plan de contingencia para fallas de equipos críticos principales y sistemas de control y protección de subestaciones de interconexión Eléctrica S.A. E.S.P. correspondientes al CTE Oriente. Tesis de grado de Ingeniería Eléctrica dirigida por G. Carillo, Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga.
- [36]. Murillo M. William. Implementación del mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM). Mundo Eléctrico Colombiano. Vol 17 N°53. Octubre- Diciembre del año 2003. Bogota Colombia.
- [37]. Niño Quiñónez, Héctor. Simulación Digital. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 1994
- [38]. Normas de Competencia Laboral: Desarrollo metodológico de las titulaciones elaboradas para el personal técnico de Interconexión Eléctrica S.A. E.S.P. y Adaptación del modelo de evaluación por competencia laboral, propuesto por el Sistema Nacional de Formación Para el Trabajo -SNCF-". GISEL, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2002
- [39]. Ramírez G, Carlos Felipe. Subestaciones de Alta y Extra Alta tensión, Editor Mejía Villegas S.A, primera edición, 1989.
- [40]. Roy. Billinton, Ronald. N Allan. "Reliability Evaluation of Engineering Systems: Concepts and Techniques ", Editorial Pitman Avanced Publishing Program, Boston, 1982.
- [41]. Roy. Billinton, Ronald. N Allan. Reliability Evaluation of Power Systems, 1989.
- [42]. Ruiz Díaz, Fernando. Simulación Digital: un enfoque pragmático y clásico. Departamento de Sistemas, Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 1992.
- [43]. Russell Stuart, Norvig Peter. Inteligencia artificial, un enfoque moderno. Prentice-Hall. México 1996.
- [44]. Santos Sánchez Gustavo, Beltrán Roa Elizabeth, Sequeda Adriana. "Planes de contingencia para fallas destructivas en salas de control y protección de subestaciones de transmisión". Proyecto de pregrado de Ingeniería Eléctrica, dirigido por G. Carrillo. UIS 2002.

- [45]. Sasa Jakovljvic, Mladen Kezunovic. Software For Enhanced Monitoring in Integrated Substations. Department of electrical engineering, Texas, A&M University. 2003
- [46]. Schank Roger C. Dynamic Memory, Revisited. Cambridge, university press.1999.
- [47]. Shannon, R.E. Simulación de sistemas: Diseño, desarrollo e implementación. Editorial Trillas. Méjico 1988.
- [48]. Vera Caicedo E. lineamientos para la elaboración de programas de formación por competencia laboral para el personal técnico de ISA S.A. E.S.P. Proyecto de maestría en potencia eléctrica, en desarrollo, dirigido por G. Carrillo y J. Jaimes. Bucaramanga. 2005.
- [49]. Villabona, Fernando. Nociones básicas de operación de subestaciones. Apuntes de clase del curso de subestaciones eléctricas, Universidad Industrial de Santander Bucaramanga, 2000.
- [50]. Zamora Enciso, Ricardo. Los Juegos de Simulación, una herramienta para la Formación. <http://www.traininggames.com/pdf/paper.pdf>
- [51]. Zúñiga Pardo L. Diseño de un programa prototipo de formación basado en competencias laborales para el operador de subestaciones de Interconexión Eléctrica S.A. ESP. ". Proyecto de pregrado de Ingeniería Eléctrica, dirigido por G. Carrillo, J. Jaimes y E. Vera. Bucaramanga. 2004.

## CONFIGURACIÓN DE LAS SUBESTACIONES

La configuración de una subestación de transmisión la define la organización que se les da a los equipos electromecánicos que constituyen el patio de conexiones, permitiéndole a la subestación diferentes niveles de confiabilidad, seguridad o flexibilidad de manejo, transformación y distribución de energía.

Dentro de la organización de los equipos de patio existen dos tendencias para los tipos de configuraciones: la Europea o conexión de barras y la Americana o conexión de interruptores. A continuación se explican algunas de las principales configuraciones que presentan las subestaciones de transmisión.

### A.1 CONFIGURACIONES DE CONEXIÓN DE BARRAS

Según la tendencia europea en cada circuito hay un interruptor con la posibilidad de conectarse a una o más barras por medio de seccionadores.

**A.1.1 Barra sencilla.** Es una distribución que cuenta con un sólo barraje colector al cual se conectan todos los circuitos de la subestación por medio de un interruptor.

Este tipo de configuración tiene la característica que es económica, simple, fácil de proteger, pero no ofrece confiabilidad, seguridad y flexibilidad a la hora de hacer mantenimiento, puesto que hay que desconectar todos los circuitos conectados al barraje.

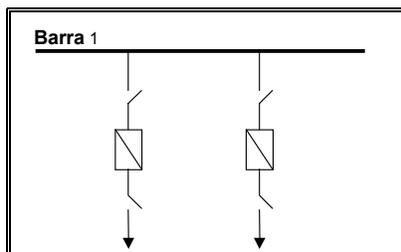
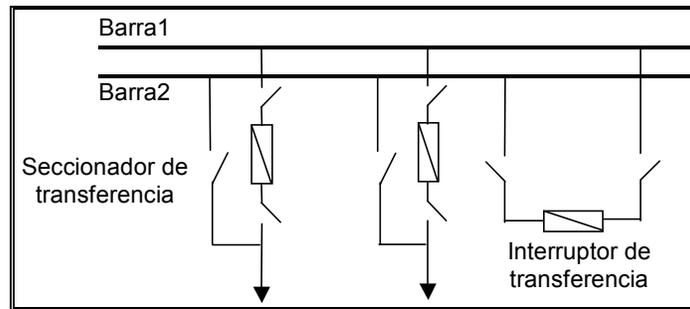


Figura A1. Barra sencilla

**A.1.2 Barra principal más barra de transferencia.** Es la configuración de barra sencilla agregándole una barra auxiliar o de transferencia y un interruptor de transferencia que une las dos barras. Cada circuito, se conecta a la barra de transferencia a través del seccionador de transferencia.

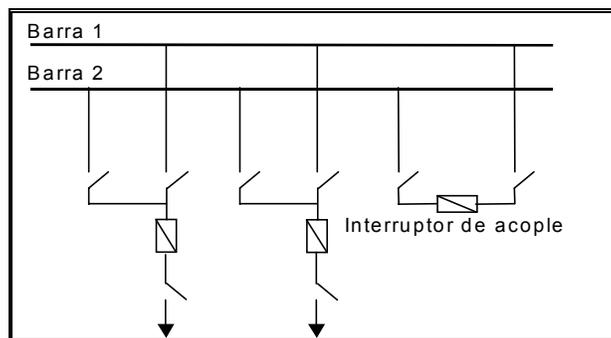


**Figura A2. Barra principal más barra de transferencia.**

Esta configuración permite un mantenimiento del interruptor en caliente, gracias a que se puede transferir los campos a través del interruptor de transferencia. La barra auxiliar solo esta en capacidad de soportar un circuito y se utiliza para transferencia de cualquiera de ellos.

**A.1.3 Barra doble.** Consiste en añadir una segunda barra (barra de reserva) y un interruptor a la configuración de barra sencilla aumentando la flexibilidad del sistema. Estas dos barras se unen a través del “interruptor de acople”.

Esta configuración permite separar circuitos en cada barra y el manejo independiente de cada circuito desde el barraje principal o del de reserva, debido a que cada una de las barras está en la capacidad de soportar la carga total.



**Figura A3. Barra doble**

**A.1.4 Doble barra más barra de transferencia.** En la subestación que tiene dos barras principales y una tercera barra de transferencia. Las dos barras principales están unidas por un interruptor de acople, mientras que la barra de transferencia está unida al sistema por medio de un interruptor de transferencia. Las funciones

de acople y transferencia son independientes.

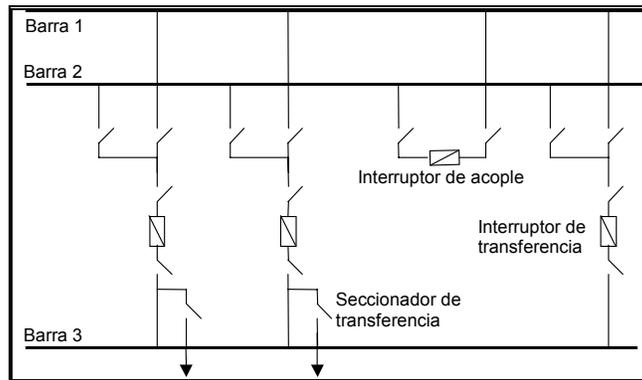


Figura A4. Doble barra mas barra de transferencia

## A.2 CONFIGURACIONES DE CONEXIÓN DE INTERRUPTORES

Son aquellas en las cuales los circuitos se conectan a las barras o entre ellas por medio de interruptores.

**A.2.1 Configuración tipo anillo.** En esta configuración no existe una barra colectiva propiamente dicha, los circuitos se conectan alternadamente en un anillo formado por interruptores, y se opera normalmente con todos los interruptores cerrados.

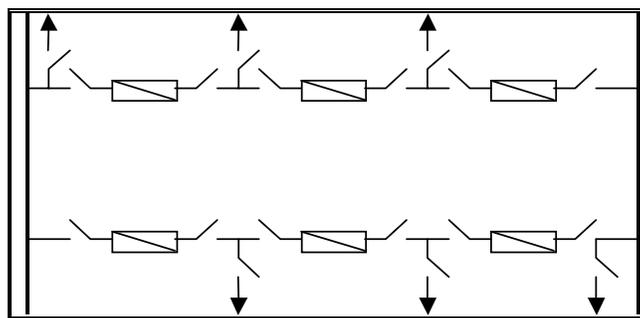
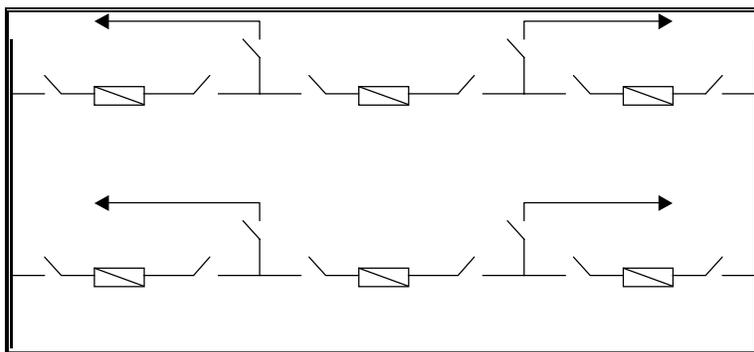


Figura A5. Tipo anillo

Para aislar un circuito es necesario abrir los dos interruptores correspondientes; el número de interruptores es igual al número de salidas.

**A.2.2 Configuración interruptor y medio.** Esta configuración es semejante a la tipo anillo, con la diferencia que exige tres interruptores por cada dos salidas. El grupo de los tres interruptores se conecta entre dos barrajes principales, permitiendo el mantenimiento de cualquier interruptor o barraje, sin suspender el servicio y sin alterar el sistema de protección. Normalmente se opera con todos los interruptores cerrados.



**Figura A6. Interruptor y medio**

## EJEMPLO DE APLICACIÓN DE LOS MODELOS DE SIMULACIÓN

Se presenta el ejemplo de la representación del sistema de control de un Interruptor que se observa en la Figura B 1. Para simular el comportamiento de los elementos mediante las reglas descritas anteriormente se aplican los modelos que permiten evaluar el valor de la tensión en los diferentes puntos del circuito de control dados unos estados iniciales.

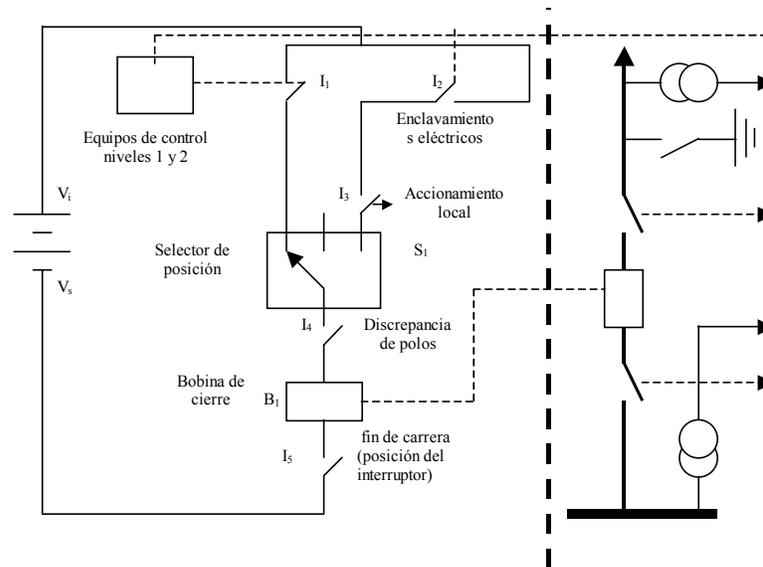


Figura B 1: Circuito de Control cierre de un Interruptor

El circuito anterior, corresponde al esquema simplificado del control del cierre de un interruptor que hace parte de la bahía de línea de una subestación con configuración de barra sencilla. Al energizar la bobina de cierre se activan los mecanismos que hacen que los contactos de las fases de los polos del interruptor se cierren. A su vez, el estado del elemento en la configuración de la subestación se actualiza, produciendo el flujo de tensión a los elementos conectados a él, desde la línea hasta la barra. Los interruptores indicados como  $I_1$  e  $I_3$  corresponden a los pulsadores que se activan por la acción de los niveles de control (uno y dos) y por el operador de la subestación (nivel cero), respectivamente. Los interruptores  $I_2$ ,  $I_4$ ,  $I_5$  e  $I_6$ , corresponden a contactos auxiliares controlados por el interruptor  $I_2$  (por la posición de los seccionadores del interruptor, los cuales deben estar cerrados para que se encuentre cerrado). Además, se tiene que el interruptor  $I_4$  por la activación de la alarma discrepancia de polos se activa al no cerrarse un polo del interruptor (ya que un interruptor está compuesto de tres polos) y el interruptor  $I_5$ , corresponde al fin de carrera del propio interruptor, así si el interruptor se encuentra cerrado este estará abierto.

Representado los elementos de este circuito mediante diagramas de bloque, e indicando las variables en cada uno de los puntos, se tiene el siguiente gráfico.

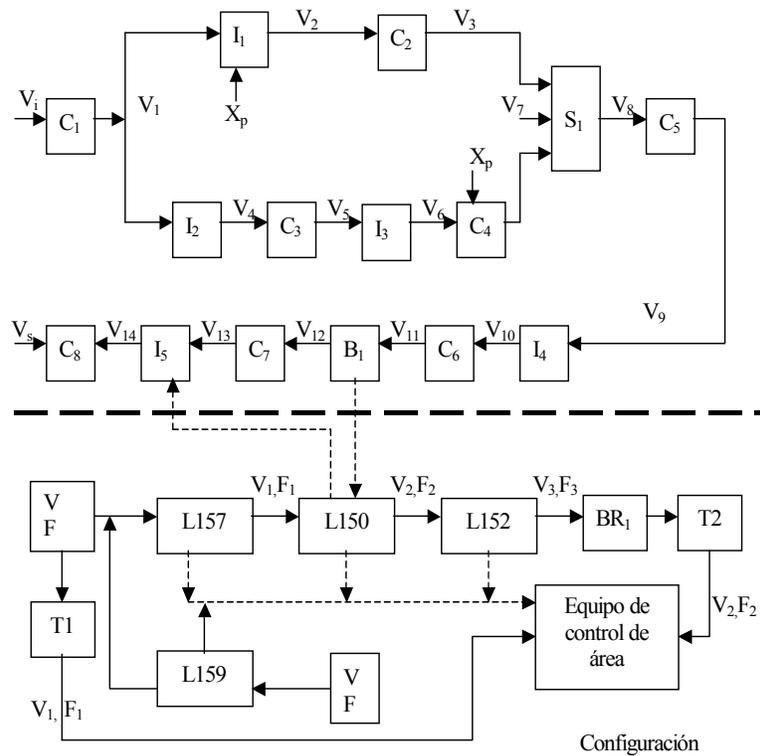


Figura B: 1: Representación del Circuito de Control de cierre del Interruptor

La señal de tensión de control se representa como una batería que constituye el modelo simplificado para los Servicios Auxiliares.

A continuación se describen los valores iniciales de las variables de estado.

Interruptores:

I1 (pulsador)	I2 (contacto aux)	I3 (pulsador)	I4 (contacto aux)	I5 (contacto aux)
$X_i = 1$	$X_i = 1$	$X_i = 1$	$X_i = 1$	$X_i = 1$
$X_p = 0$	$X_p = 1$	$X_p = 0$	$X_p = 1$	$X_p = 1$

La variable  $X_p$  es una entrada del elemento y depende de la condición de los equipos de patio, de las acciones del operador o de los sistemas de monitorización y control.

▪ Cables:

C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
$X_C = 1$							

▪ Bobina y Selector:

B1	S1

<b>Xb=1</b>	<b>Xp=1</b>
	<b>Xip=-1</b>

El trabajo consiste en darle valores a las variables de tensión presentes en el camino de control, aplicando las reglas que definen el funcionamiento de cada elemento. Definiendo las tensiones de entrada provenientes del sistema de servicios auxiliares, se tiene:

$$V_i = 65V$$

$$V_i = -65V$$

Se comienza la actualización de los valores de las variables de tensión desde la señal positiva a la negativa. Los valores están definidos por las reglas de los modelos de cada uno de los elementos (salidas de los equipos). Así, las tensiones son:

	<b>V1</b>	<b>V2</b>	<b>V3</b>	<b>V4</b>	<b>V5</b>	<b>V6</b>	<b>V7</b>	<b>V8</b>
<b>Regla define</b>	<b>C1</b>	<b>I1</b>	<b>C4</b>	<b>I2</b>	<b>C3</b>	<b>I3</b>		<b>S1</b>
<b>Valor</b>	<b>65</b>	<b>Inde.</b>	<b>Inde.</b>	<b>65</b>	<b>65</b>	<b>Inde.</b>	<b>Indef..</b>	<b>Inde.</b>

	<b>V9</b>	<b>V10</b>	<b>V11</b>	<b>V12</b>	<b>V13</b>	<b>V14</b>	<b>VS</b>
<b>Regla define</b>	<b>C5</b>	<b>I4</b>	<b>C6</b>	<b>I2</b>	<b>C3</b>	<b>I3</b>	
<b>Valor</b>	<b>Inde.</b>	<b>Inde.</b>	<b>Inde.</b>	<b>Inde.</b>	<b>Inde.</b>	<b>Inde.</b>	<b>-65</b>

De igual manera, actualizando las variables de tensión desde la señal negativa a la positiva, se tiene:

	<b>V14</b>	<b>V13</b>	<b>V12</b>	<b>V11</b>
<b>Regla define</b>	<b>C8</b>	<b>I5</b>	<b>C7</b>	
<b>Valor</b>	<b>-65</b>	<b>-65</b>	<b>-65</b>	<b>Inde.</b>

De aquí en adelante se conservan los valores de las variables ya calculados. Sin embargo, se puede modificar el estado de los elementos y realizar de nuevo la actualización de las variables. Efectuando el mismo procedimiento pero modificando los estados de los elementos,  $S_1$  (local),  $I_3$  (pulsado orden de apertura), y conservando los demás elementos en su estado anterior, se obtienen:

Comenzando por la señal positiva, los valores de las variables son:

	<b>V1</b>	<b>V2</b>	<b>V3</b>	<b>V4</b>	<b>V5</b>	<b>V6</b>	<b>V7</b>	<b>V8</b>
<b>Regla</b>	<b>C1</b>	<b>I1</b>	<b>C4</b>	<b>I2</b>	<b>C3</b>	<b>I3</b>		<b>S1</b>

<b>define</b>								
<b>Valor</b>	<b>65</b>	<b>Inde.</b>	<b>Inde.</b>	<b>65</b>	<b>65</b>	<b>65</b>	<b>Inde.</b>	<b>65</b>

	<b>V9</b>	<b>V10</b>	<b>V11</b>	<b>V12</b>	<b>V13</b>	<b>V14</b>	<b>VS</b>
<b>Regla define</b>	<b>C5</b>	<b>I4</b>	<b>C6</b>	<b>I2</b>	<b>C3</b>	<b>I3</b>	
<b>Valor</b>	<b>65</b>	<b>65</b>	<b>65</b>	<b>Inde.</b>	<b>Inde.</b>	<b>Inde.</b>	<b>-65</b>

De igual manera, actualizando las variables de tensión desde la señal negativa a la positiva, se tiene:

	<b>V14</b>	<b>V13</b>	<b>V12</b>	<b>V11</b>
<b>Regla define</b>	<b>C8</b>	<b>I5</b>	<b>C7</b>	
<b>Valor</b>	<b>-65</b>	<b>-65</b>	<b>-65</b>	<b>65</b>

A continuación se conservan los valores de todas las variables y se observa que las condiciones para aplicar las reglas que definen la bobina se cumplen. Lo que implica que el estado del interruptor L150 es cerrado ( $X_{L150}=1$ ).

Con este ejemplo se puede realizar la implementación del modelo de la consigna bajo falla. Para realizar la consigna es necesario que el modelo de la subestación permita representar las condiciones de falla.

Para este caso, se remite a la consigna bajo falla en el cierre del interruptor I150 de la Subestación Guatiguará. La consigna inicia con la verificación de las condiciones iniciales en la sala de control, en donde el operador debe realizar las siguientes acciones:

Alarma presente, Pérdida de Sincronismo, Seccionador I157 “abierto”, Seccionador I151 “abierto”, Seccionador I152 “cerrado”, Relé de disparo con bloqueo “activado”, Seccionador I156 “cerrado” y Selector de estación en opción “CND”.

Es necesario que el modelo de la Subestación represente cada una de las acciones que deben cumplirse para cerrar el interruptor.

**SEOS 1.0 SISTEMA DE SIMULACIÓN PARA EL ENTRENAMIENTO DE OPERADORES  
DE SUBESTACIONES ELÉCTRICAS<sup>12</sup>  
MANUAL DE USUARIO**

**A.3 REQUERIMIENTOS PARA SEOS 1.0**

Requisitos básicos de Hardware y Software para ejecutar SEOS 1.0. Los requerimientos recomendados son los siguientes:

Procesador de 500 MHz o superior  
Memoria RAM 128 MB o superior  
Espacio libre en Disco Duro de 30 MB  
Monitor SVGA 1024x768  
Windows 98, Windows XP, Windows NT  
JRE versión 1.4 o superior

**INSTALACIÓN DE SEOS 1.0**

Por Web

Ingresa a la siguiente dirección electrónica: <http://192.168.45.70/Simulador.html>

Descargar e instalar el JRE (Java Runtime Environment)

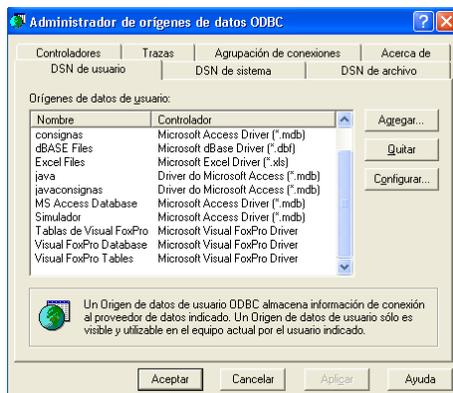
Descargar la base de datos BDSimulador.mdb, ubicarla en una carpeta del disco duro y establecer el origen de datos a esta base de datos.

**¿COMO CREAR UN ORIGEN DE DATOS?**

---

<sup>12</sup> Desarrollado por Javier Eduardo Gelvis Vega y Fredy Alexander Gáfaru Eugenio. Presentado en "Propuesta de un sistema de simulación para el entrenamiento del personal que atiende la operación de subestaciones eléctricas de transmisión",

Abrir un explorador en Panel de Control y seleccionar el icono “Herramientas Administrativas”. Seleccione el icono “Orígenes de Datos (ODBC)”.



**Figura D 1: Administrador de Orígenes de datos ODBC**

En la lengüeta “DNS de Usuario”, presionar el botón “Agregar ...” para agregar un nuevo origen de datos.



**Figura D 2: Crear Nuevo Origen de Datos**

De la lista de controladores de bases de datos, seleccionar la opción “Microsoft Access Driver (\*.mdb)” y presione el botón “Finalizar”.



**Figura D 3: Configuración de ODBC Microsoft Access**

En el campo etiquetado “Nombre del origen de datos”, escribir la palabra “BDSimulador”. En “Bases de datos”, presione el botón “Seleccionar” y especificar el camino de la base de datos descargada anteriormente. Hacer clic en “Aceptar”

En la página Web, hacer clic sobre el hipervínculo “Ejecutar Simulador”. Al hacer esto, se iniciará la descarga del simulador al disco duro. La primera vez que se ejecute le preguntará si desea crear un acceso directo. Cada vez que se ejecute el simulador, este revisará en la página Web si existe una versión actualizada del programa.

### Manual

Instalar el JRE (Java Runtime Environment)

Copiar la base de datos BDSimulador.mdb y el archivo Simulador.jar, ubicarlos en una carpeta del disco duro y establecer el origen de datos a la base de datos.

Ejecutar Simulador.jar.

### COMO EJECUTAR SEOS 1.0

Si la instalación se hizo vía Web, ejecutar el acceso directo creado al instalar el programa.

Si la instalación fue manual, ejecutar el archivo Simulador.jar

### Como Ingresar a SEOS 1.0

Para poder ingresar a SEOS 1.0 es necesario disponer de una cuenta. A continuación se especifica un listado de cuentas válidas para el ingreso al sistema.

Cuenta	Password	Tipo de Usuario
admin	admin	administrador

operario	operario	operario
----------	----------	----------

Tabla 1. Listado de cuentas validas para el ingreso a SEOS 1.0

## A.4 AMBIENTE DE TRABAJO DE SEOS 1.0



Figura D 4: Ambiente de trabajo de SEOS 1.0

El Menú se encuentra compuesto por las opciones principales **Opciones**, **Usuarios** y **Ayuda**; cada una compuesta a su vez de otras opciones como se presenta a continuación:

### Opciones

- Crear Subestación
- Simular Subestación
- Recrear Consigna
- Recrear Sesión de Simulación

### Usuarios

- Cambiar de Usuario de Sesión
- Crear Usuario
- Modificar Usuario
- Eliminar Usuario
- Historial del Usuario

### Ayuda

- Acerca de...

## ¿Como salir de SEOS 1.0?

En el menú Opciones, seleccionar “Salir”.

Presionar el botón “Salir”, ubicado en la parte inferior izquierda de la pantalla.

Presionar el botón  ubicado en la parte superior derecha de la pantalla

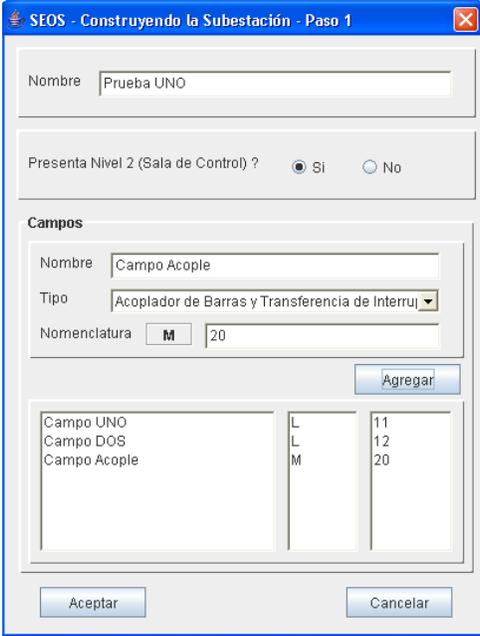
## A.5 ¿CÓMO CREAR UNA SUBESTACIÓN EN SEOS 1.0?

Es importante tener en cuenta que cuando se va a construir una subestación, es necesario tener a disposición lo siguiente:

Diagrama Unifilar de la subestación a construir, teniendo especificado el nombre de cada uno de sus campos y de sus elementos (Barras, Interruptores y Seccionadores).

Diagrama Lógico de Operación para cada interruptor y seccionador.

Para empezar a crear una subestación, en Opciones, hacer clic en “Crear Subestación” o sobre el Ambiente de Trabajo en “Crear Subestación”. Aparecerá la siguiente ventana, en donde se especificará el nombre de la subestación, la presencia del Nivel 2 en la subestación y los campos que la conforman.



SEOS - Construyendo la Subestación - Paso 1

Nombre: Prueba UNO

Presenta Nivel 2 (Sala de Control)?  Si  No

**Campos**

Nombre: Campo Acople

Tipo: Acoplador de Barras y Transferencia de Interru...

Nomenclatura: M 20

Agregar

Campo UNO	L	11
Campo DOS	L	12
Campo Acople	M	20

Aceptar Cancelar

### **Figura D 5: SEOS – Construyendo la Subestación – Paso 1**

Consideraciones a tener en cuenta:

El nombre de la subestación es único. No se pueden guardar dos subestaciones con el mismo nombre.

Tener claro si la subestación que se está montando presenta el Nivel 2 (Sala de Control)

Dos campos no pueden llamarse igual.

Dos campos no pueden tener la misma nomenclatura.

Las siguientes tablas da a conocer cómo se genera en el programa la nomenclatura para los diferentes elementos de la subestación.

<b>Función</b>	<b>Código</b>
Acoplador	I
Seccionamiento de barras	S
Transferencia de interruptores	B
Acoplador de barras y transferencia de interruptores	M
Circuito de generador	G
Circuito de la unidad de generación	U
Circuito de transformación	T
Circuito de autotransformación	A
Circuito de línea	L
Circuito de reactor	R
Circuito de condensador	C

**Figura D 6: Código de grupos operativos.**

<b>Código</b>	<b>Significado</b>
01 a 09	Asociada a barra virtual o ficticia
11 a 19	Asociado a barra 1, a sección 1 de barra o anterior a acoplador
11 a 19	En anillo
20	Principal en doble interruptor/barra doble
21 a 29	Asociado a barra 2, a sección 2 de barra o posterior a acople
21 a 29	Reserva en doble interruptor/barra sencilla

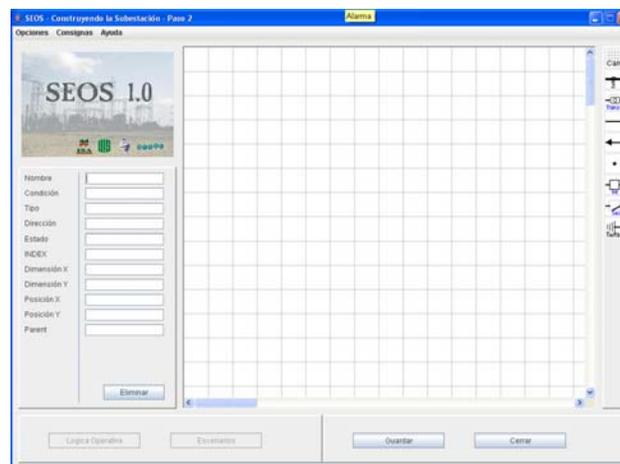
30	Segundo seccionamiento
31 a 39	Asociado a sección 3 de barra
40	Tercer seccionamiento

**Tabla 2. Identificación del campo de la subestación**

Función	Código
Interruptor	0
Conexión a barra 1	1
Conexión a barra 2	2
Conexión a barra de reserva	3
Conexión en serie con un nodo intermedio como primera opción o conexión a sección 4 de barra 1	4
Conexión en serie con nodo intermedio como segunda opción	5
Conexión en paralelo a interruptor (By pass)	6
Conexión de circuito de salida (de línea, transformador, etc.)	7
Cuchilla de puesta tierra como segunda opción	8
Cuchilla de puesta a tierra como primera opción	9

**Figura D 7: Código asignado por posición de los equipos de patio.**

Aparecerá la siguiente ventana, donde se ubicarán los diferentes elementos que conforman una configuración de una subestación.



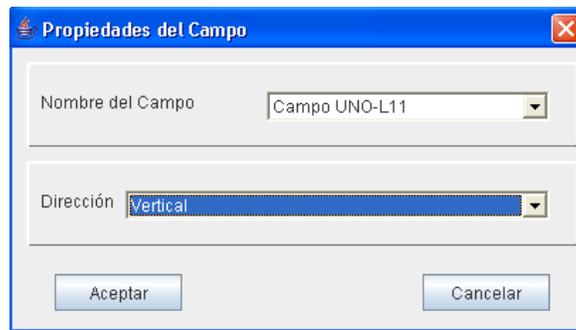
**Figura D 8: SEOS – Construyendo la Subestación – Paso 2**

En la parte izquierda de la ventana, se puede apreciar que se muestran ciertas propiedades de los elementos que se ubican en la cuadrícula de montaje. Proveen información acerca de la ubicación, tamaño, dirección y sobre quien se encuentra ubicado cada elemento.

En la parte derecha, se puede observar una barra de herramientas con diferentes elementos los cuales se detalla a continuación:

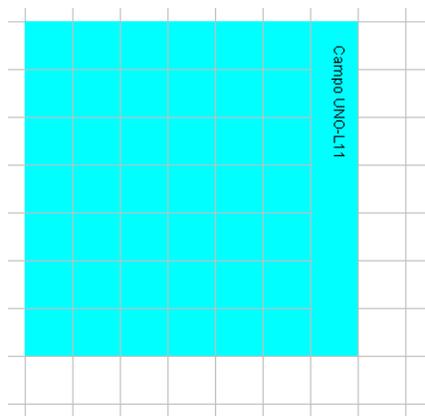
### Campos

Seleccionar este elemento y hacer clic en el lugar que se quiere ubicar. Aparecerá la siguiente ventana donde seleccionaremos el campo y la dirección que se quiere para este.



**Figura D 9: Propiedades del Campo**

Esta dirección se usa por la disposición de los elementos dentro del campo y por la dirección de la barra (ubicar el campo perpendicular a la barra). Dar clic en Aceptar y el elemento aparecerá de la siguiente forma en la cuadrícula.



### **Figura D 10: Forma como se dibuja el campo**

La posición y tamaño del campo se puede variar si no hay elementos sobre este. Al hacer doble clic se puede cambiar la dirección del campo.

Los valores predeterminados de propiedades para este elemento son:

Dimensión en X: 7 celdas.

Dimensión en Y: 7 celdas.

Se recomienda no ubicar elementos sobre la franja donde aparece el nombre del campo.

- Barras

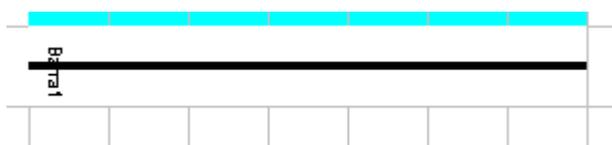
Seleccionar este elemento y hacer clic en el lugar que se quiere ubicar. Se nombra automáticamente, teniendo en cuenta el número de barras que se hayan ubicado en la cuadrícula de montaje.

Los valores predeterminados de propiedades para este elemento son:

Dirección :Horizontal

Dimensión en X: 7 celdas.

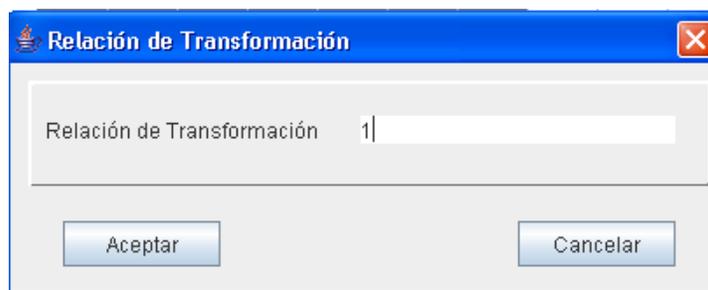
Al hacer doble clic se puede cambiar la dirección de la barra. Si se toma de los extremos, se puede variar la longitud. Si se toma por el centro se puede cambiar su posición.



### **Figura D 11: Forma como se dibuja la barra**

Transformadores

Seleccionar este elemento y hacer clic en el lugar que se quiere ubicar. Aparecerá la siguiente ventana donde se solicita la Relación de Transformación de la Tensión. Tiene 1 como valor predeterminado.



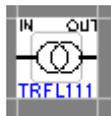
**Figura D 12: Relación de Transformación**

Este elemento solo se puede ubicar sobre un campo. Se nombra automáticamente, teniendo en cuenta el número de transformadores que se hayan ubicado en el campo.

Al hacer doble clic se puede cambiar su dirección y sentido. Los valores predeterminados de propiedades para este elemento son:

Dirección :Horizontal

Sentido: Izquierda a Derecha.



**Figura D 13: Forma como se dibuja el transformador**

Línea de Conexión

Seleccionar este elemento y hacer clic en el lugar que se quiere ubicar. Este elemento solo se puede ubicar sobre un campo. Los valores predeterminados de propiedades para este elemento son:

Dirección :Horizontal

Dimensión en X: 1 celda.

Al hacer doble clic se puede cambiar la dirección de la línea. Si se toma de los extremos, se puede variar la longitud. Si se toma por el centro se puede cambiar su posición.



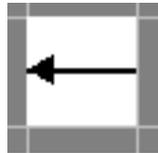
**Figura D 14: Forma como se dibuja la línea**

#### Línea de Salida

Permite definir si un circuito o línea es de generación o de carga. Seleccionar este elemento y hacer clic en el lugar que se quiere ubicar. Este elemento solo se puede ubicar sobre un campo. Al hacer doble clic se puede cambiar su dirección y sentido. Los valores predeterminados de propiedades para este elemento son:

Dirección :Horizontal

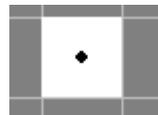
Sentido: Derecha a Izquierda.



**Figura D 15: Forma como se dibuja la línea de salida**

#### Punto de Conexión

Permite interconectar elementos. Seleccionar este elemento y hacer clic en el lugar que se quiere ubicar. Este elemento solo se puede ubicar sobre un campo.



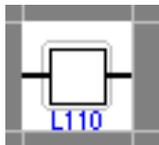
**Figura D 16: Forma como se dibuja el punto de conexión**

#### Interruptor

Seleccionar este elemento y hacer clic en el lugar que se quiere ubicar. Este elemento solo se puede ubicar sobre un campo. Se nombra automáticamente. Solo se puede

ubicar un interruptor por campo. Al hacer doble clic se puede cambiar su dirección. Los valores predeterminados de propiedades para este elemento son:

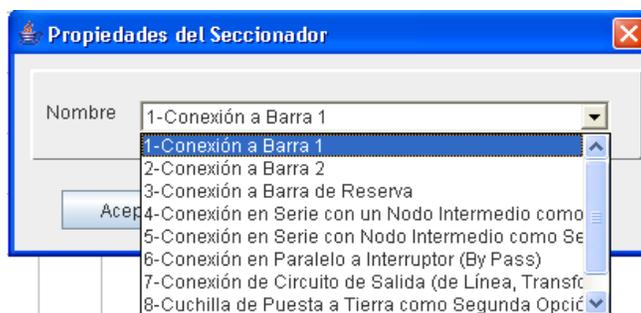
Dirección :Horizontal



**Figura D 17: Forma como se dibuja el interruptor**

Seccionador

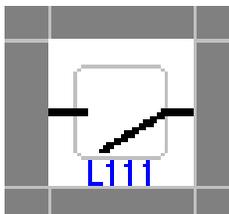
Seleccionar este elemento y hacer clic en el lugar que se quiere ubicar. Aparecerá la siguiente ventana donde se solicita definir el tipo de seccionador.



**Figura D 18: Propiedades del Seccionador**

Este elemento solo se puede ubicar sobre un campo. Se nombra automáticamente. Solo se puede ubicar un seccionador por tipo en el campo. Al hacer doble clic se puede cambiar su dirección. Los valores predeterminados de propiedades para este elemento son:

✓ Dirección :Horizontal



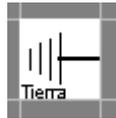
**Figura D 19: Forma como se dibuja el seccionador**

Tierra

Seleccionar este elemento y hacer clic en el lugar que se quiere ubicar. Este elemento solo se puede ubicar sobre un campo. Al hacer doble clic se puede cambiar su dirección y sentido. Los valores predeterminados de propiedades para este elemento son:

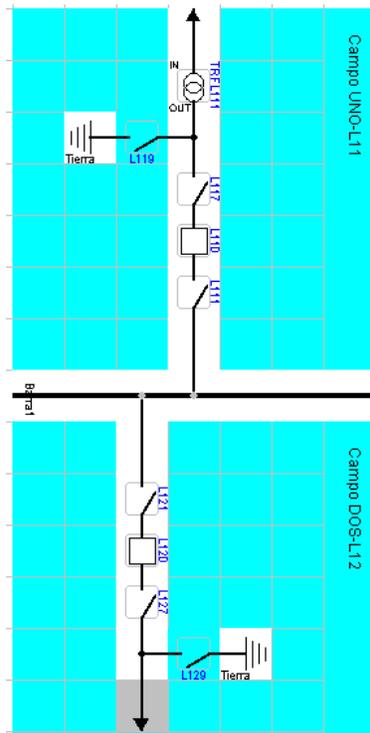
Dirección :Horizontal

Sentido: Izquierda a Derecha.



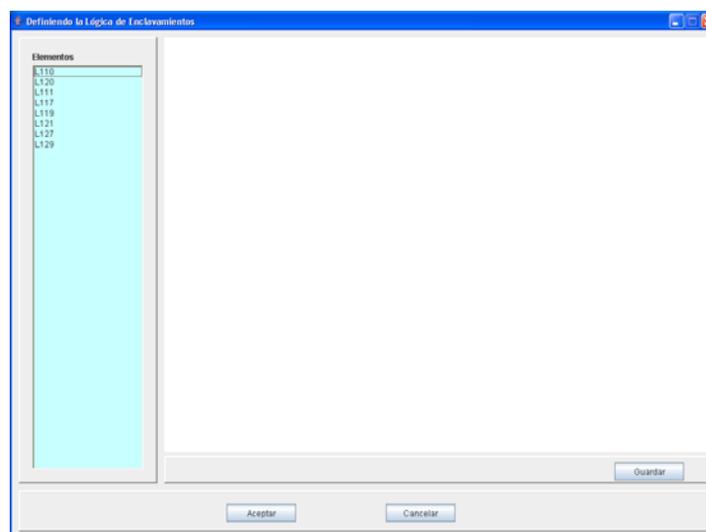
**Figura D 20: Forma como se dibuja la Tierra**

Usando los elementos descritos anteriormente, se hace el montaje de la subestación.



**Figura D 21: Montaje de una subestación barra sencilla**

Al hacer clic en el botón “Guardar” se activan los dos botones que se encuentran en la parte inferior izquierda de la ventana. Para definir la lógica operativa de la subestación, hacer clic en el botón “Lógica Operativa” con lo cual aparecerá la siguiente ventana, listando en su parte izquierda los elementos que necesitan lógica para operar.



**Figura D 22: Definiendo la lógica de enclavamientos**

Al hacer doble clic sobre cualquier elemento de la lista, mostrará el panel donde de debe introducir su lógica de enclavamientos. Esta lógica está definida mediante el uso de compuertas AND y OR.

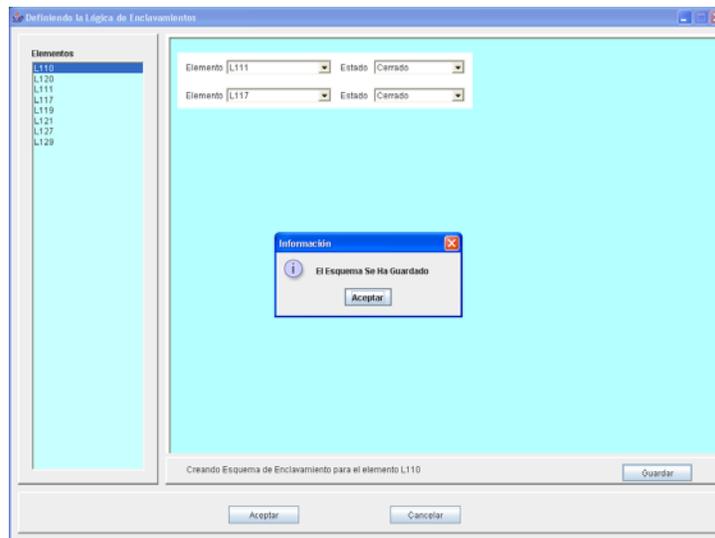
Cuando se da clic derecho sobre el panel anteriormente mencionado aparecerá un menú emergente con las siguientes opciones:

Agregar condición: Se usa para agregar una relación con el elemento seleccionado en la lista.

Agregar AND: Se usa para agrupar condiciones.

Agregar OR: Se usa para agrupar condiciones

Es posible ingresar cualquier lógica de enclavamientos sin importar lo compleja que sea. A continuación se define la lógica para los elementos que se crearon anteriormente.

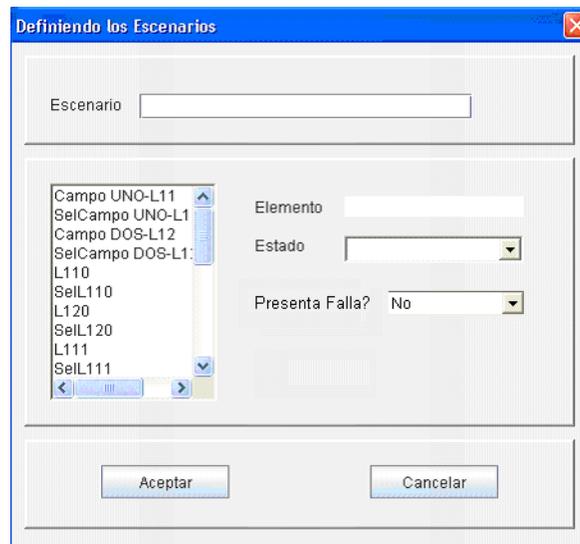


**Figura D 23: Definiendo la lógica de enclavamientos para el elemento L110 (Interrupor de línea del Campo UNO)**

Recordar guardar cada lógica por separado, es decir, ingresándola para cada elemento y presionando el botón “Guardar”.

Al definir a todos la lógica de la subestación, hacer clic en aceptar para cerrar la ventana.

Para definir los escenarios de simulación, hacer clic en el botón “Escenarios” con lo cual aparecerá la siguiente ventana, en donde se solicita el nombre del escenario y se lista todos los elementos de la subestación. Es necesario definir por lo menos un escenario para la subestación.



**Figura D 24: Definiendo los Escenarios**

Al seleccionar cada elemento de la lista se mostrarán sus estados en la lista desplegable etiquetada “Estado”. Allí se escoge el estado inicial del elemento al empezar la simulación.

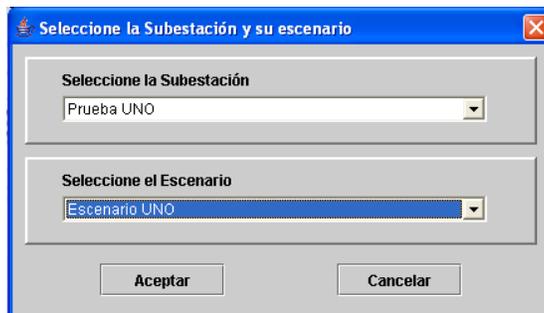
Para definir una falla en ejecución, seleccionar el elemento (Interruptor o Seccionador), y establecer en la lista etiquetada “Presenta Falla?” la opción “Sí”. Puede definir cualquier número de elementos en falla. Estas fallas aparecerán en forma aleatoria en el transcurso de la simulación.

Cuando todos los elementos tengan su estado inicial, hacer clic en el botón “Aceptar” para guardar.

Con esto se concluye el montaje de una subestación. Se está listo para probarla en el simulador.

## **A.6 ¿COMO SIMULAR UNA SUBESTACIÓN?**

Para empezar a simular una subestación, en Opciones, hacer clic en “Simular Subestación” o sobre el Ambiente de Trabajo en “Simular Subestación”. Aparecerá la siguiente ventana, en donde se seleccionará el nombre de la subestación y el escenario. Hacer clic en el botón “Aceptar” para continuar.



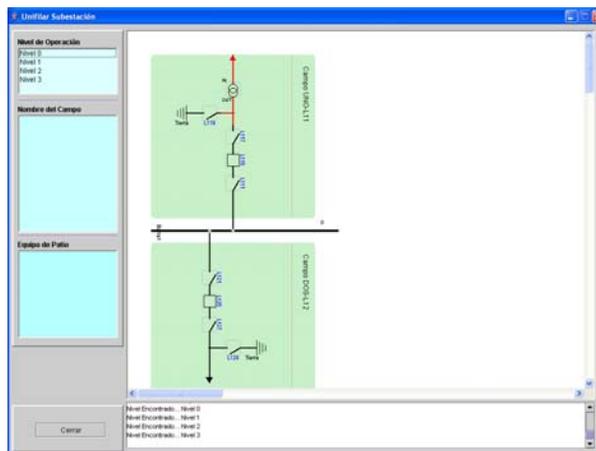
**Figura D 25: Selección de la Subestación y su escenario**

A continuación se muestra la ventana en donde se realizará la simulación en los niveles especificados al crear la subestación.

En la parte izquierda de la ventana se muestran tres listas que contienen los niveles de operación que se simulan, los campos de la subestación y los elementos pertenecientes al campo seleccionado.

En la parte central se muestran los diagramas que representan cada uno de los elementos de la subestación.

En la parte inferior se listan las acciones que hace el usuario durante la sesión de simulación.



**Figura D 26: Unifilar de la Subestación**

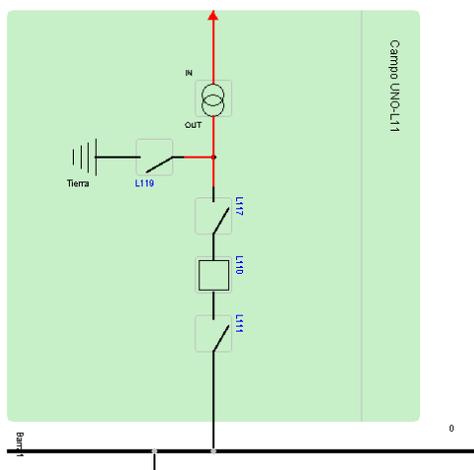
Operación NIVEL 2

Seleccione en la lista etiquetada “Nivel de Operación” la opción “Nivel 2”.

Seleccionar el campo donde realizará la maniobra. Puede hacerse seleccionando el campo desde la lista etiquetada “Nombre del Campo” o haciendo clic sobre el campo.

Seleccionar el elemento que va a operar. Puede hacerse seleccionando el elemento desde la lista etiquetada “Equipo de Patio” o haciendo clic sobre el elemento.

Aparecerá una ventana con tres opciones: “Abrir”, “Cerrar” y “Salir”. Hacer clic en la acción que desea realizar. Si la acción no se pudo realizar, el sistema enviará un mensaje indicando una posible causa por la cual no operó el elemento.



**Figura D 27: Unifilar de la Subestación Nivel 2**

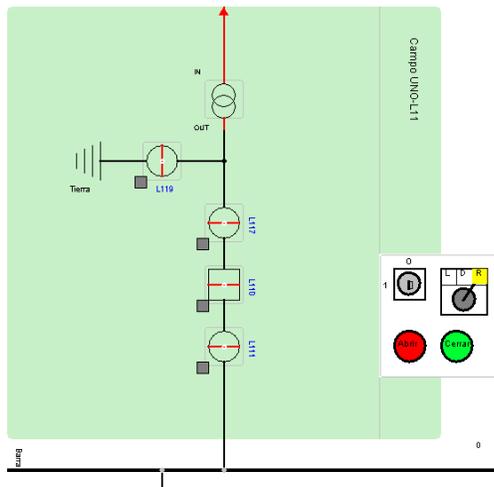
#### Operación NIVEL 1

Seleccionar en la lista etiquetada “Nivel de Operación” la opción “Nivel 1”.

Seleccionar el campo donde realizará la maniobra. Puede hacerse seleccionando el campo desde la lista etiquetada “Nombre del Campo” o haciendo clic sobre el campo. Aparecerá un panel de control del campo en donde se encuentran el selector, la llave de emergencia, y los botones de abrir y cerrar.

Seleccionar el elemento que va a operar. Puede hacerse seleccionando el elemento desde la lista etiquetada “Equipo de Patio” o haciendo clic sobre el elemento.

Hacer clic sobre el panel especificando la acción que se desea realizar, es decir, si se desea cerrar el elemento hacer clic en el botón “Cerrar”, si se desea abrir el elemento hacer clic en el botón “Abrir” y si desea operar el selector hacer clic sobre las opciones de este. Si la acción no se pudo realizar, el sistema le enviará un mensaje indicando una posible causa por la cual no operó el elemento.



**Figura D 28: Unifilar de la Subestación Nivel 1**

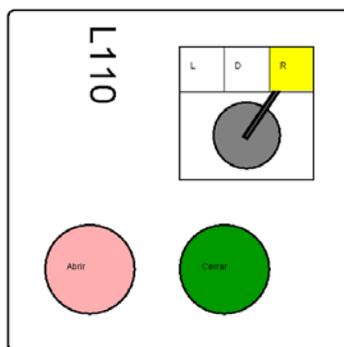
#### Operación NIVEL 0

Seleccionar en la lista etiquetada “Nivel de Operación” la opción “Nivel 0”.

Seleccionar el campo donde se realizará la maniobra. Puede hacerse seleccionando el campo desde la lista etiquetada “Nombre del Campo” o haciendo clic sobre el campo.

Seleccionar el elemento que va a operar. Puede hacerse seleccionando el elemento desde la lista etiquetada “Equipo de Patio” o haciendo clic sobre el elemento.

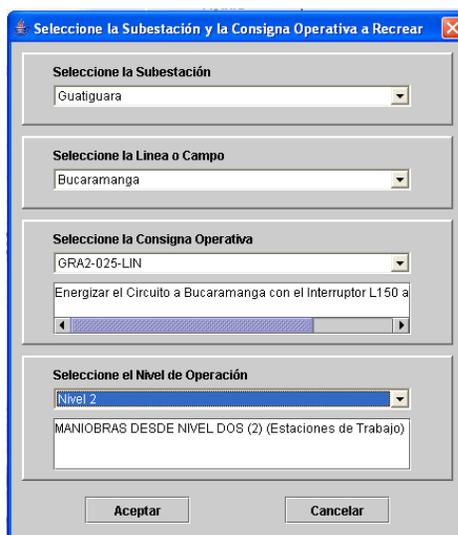
Aparecerá un panel de control del elemento en donde se encuentran el selector, y los botones de abrir y cerrar. Hacer clic sobre el panel especificando la acción que se desea realizar, es decir, si se desea cerrar el elemento hacer clic en el botón “Cerrar” o si se desea abrir el elemento hacer clic en el botón “Abrir”. Si la acción no se pudo realizar, el sistema le enviará un mensaje indicando una posible causa por la cual no operó el elemento.



**Figura D 29: Gabinete de Control Interruptor L110**

## A.7 Cómo recrear una consigna?

Para empezar a simular una subestación, en Opciones, hacer clic en “Recrear Consigna” o sobre el Ambiente de Trabajo en “Recrear Consigna”. Aparecerá la siguiente ventana, en donde se seleccionará el nombre de la subestación, el campo o línea, la consigna y el nivel de operación. Hacer clic en el botón “Aceptar” para continuar.



Seleccione la Subestación y la Consigna Operativa a Recrear

Seleccione la Subestación  
Guatiguara

Seleccione la Línea o Campo  
Bucaramanga

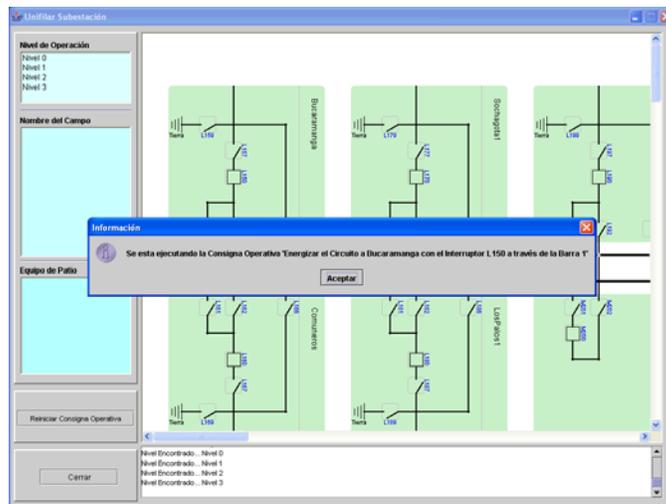
Seleccione la Consigna Operativa  
GRA2-025-LIN  
Energizar el Circuito a Bucaramanga con el Interruptor L150 a

Seleccione el Nivel de Operación  
Nivel 2  
MANIOBRAS DESDE NIVEL DOS (2) (Estaciones de Trabajo)

Aceptar Cancelar

**Figura D 30: Selección de la subestación y la consigna a recrear**

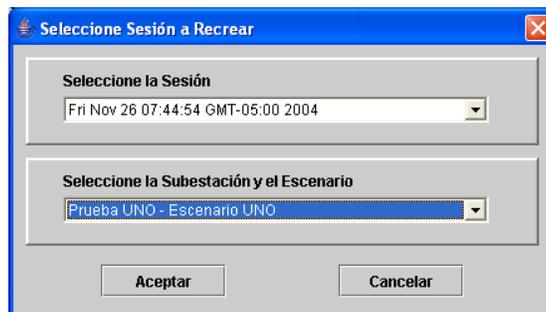
A continuación se muestra la ventana donde se recreará la consigna. Para iniciar la ejecución hacer clic en el botón “Iniciar Consigna Operativa” y seguir las instrucciones.



**Figura D 31: Ejecución de la consigna**

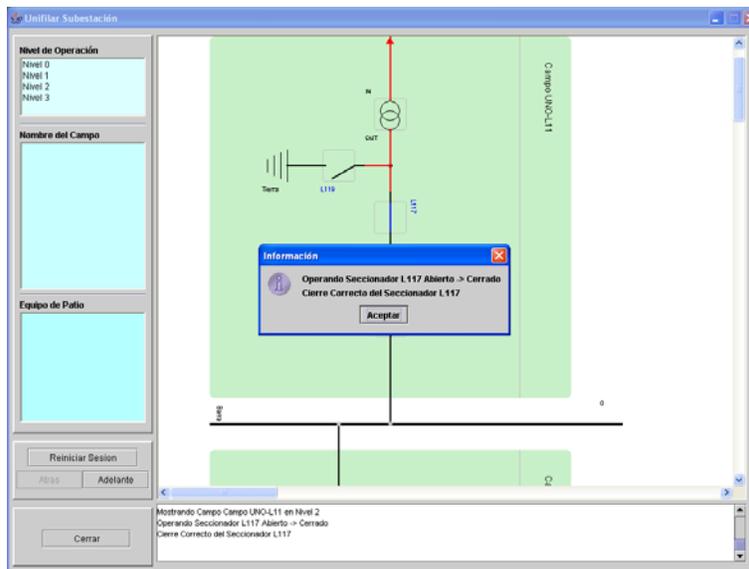
## A.8 ¿CÓMO RECREAR UNA SESIÓN DE SIMULACIÓN?

Para empezar a simular una subestación, en Opciones, hacer clic en “Recrear Sesión de Simulación” o sobre el Ambiente de Trabajo en “Recrear Sesión de Simulación”. Aparecerá la siguiente ventana, en donde se seleccionará la sesión y la subestación con su escenario. Hacer clic en el botón “Aceptar” para continuar.



**Figura D 32: Selección de la sesión y la subestación con su escenario a recrear**

A continuación se muestra la ventana donde se recreará la consigna. Para iniciar la ejecución hacer clic en el botón “Adelante” y siga las instrucciones.



**Figura D 33: Ejecución de la sesión de Simulación**

*ANEXO D*

CONSIGNA BAJO FALLA ANTE LA INOPERANCIA DE UN INTERRUPTOR







## DESCRIPCIÓN

### CARGADOR DE BATERÍAS EN FALLA

El conjunto de **cargadores** y el **banco de baterías** constituye la fuente de **alimentación de 125 Vcc** que, a partir de la tensión alterna del transformador de servicios auxiliares, produce una tensión continua obtenida por rectificación que se utiliza para:

Alimentar de manera permanente los equipos de la subestación.

Asegurar la conservación y la recarga del banco baterías.

En funcionamiento normal, los dos cargadores de 125 Vcc se hallan en paralelo con el banco de baterías. Uno de los dos cargadores es el encargado de alimentar las salidas y el otro cargador sirve como respaldo. En caso de defecto de un cargador, este se aísla automáticamente a través de los contactores **K1 y K2**, y el segundo cargador asegura la alimentación de los circuitos de corriente continua.

Los cargadores tienen tres regímenes de funcionamiento:

**FLOTACIÓN:** Este es el régimen de explotación normal y sirve para alimentar los equipos en condiciones óptimas de tensión, además de mantener la carga de la batería, alimentándola con una corriente débil que compensa sus pérdidas internas.

**CARGA:** Este es el régimen que sirve para la carga normal de la batería. Permite alimentar los equipos con un nivel de tensión mas elevado que en régimen de flotación, (pero permaneciendo dentro de los límites aceptables) y recargar la batería en un tiempo limitado.

**MANUAL:** Este régimen es utilizado para cargar a fondo la batería y no se tiene regulación de tensión. Por tal motivo, los circuitos de los equipos deben estar forzosamente desconectados.

El flujo de corriente del cargador es la suma de las corrientes absorbidas por el banco de baterías y los circuitos de utilización. En todos los casos, el flujo de corriente del cargador está limitado por su intensidad nominal.

### Revisión posterior a la identificación de la falla

Cuando se presente una falla en alguno de los cargadores de 125 Vcc, evidenciada por las lámparas de señalización, reportar la anomalía al Coordinador de Disponibilidad del CTE Oriente y CENS. Verificar que el cargador de respaldo asegura la alimentación de los circuitos de utilización, y proceder a revisar los siguientes aspectos para identificar la falla del cargador.

POSIBLE CAUSA	POSIBLE SOLUCIÓN
Selector <b>MARCHA</b> – <b>PARO</b> en posición <b>PARO</b> .	Pasar selector a posición <b>MARCHA</b> .
Tecla de selección <b>MANUAL</b> – <b>AUTO</b> de la tarjeta electrónica en posición <b>MANUAL</b> .	Apretar la tecla de selección <b>MANUAL</b> – <b>AUTO</b> de la tarjeta electrónica y verificar que el LED verde “ <b>AUTO</b> ” se enciende.
<b>Falla alimentación</b> principal del cargador.	<p>Revisar lectura actual del voltímetro del cargador.</p> <p>Verificar posición de interruptores <b>2E1</b> y <b>2E2</b> en el tablero 2B, en sala de servicios auxiliares.</p> <p>Verificar tensión de <b>208 Vac ± 5%</b> entre los pares de bornes U - V, V - W y W - U.</p> <p>Verificar tensión de <b>208 Vac ± 5%</b> entre los pares de bornes 58 - 60, 60 - 61 y 58 - 61. Si alguna de las tensiones medidas anteriormente no es correcta, los fusibles de protección F10, F11 y/o F12 deben estar abiertos.</p> <p>Ver plano <b>COREDEL RB 4267</b>.</p>
<b>Bloqueo</b> por relé térmico del contactor disyuntor K1 – F1.	Reponer relé térmico.
<p><b>Tensión</b> de alimentación del cargador está por fuera de los límites permisibles.</p> <p>El circuito SR de vigilancia de tensión del cargador, produce el paro del cargador en los siguientes casos:</p> <p>Desconexión de una fase.</p> <p>Tensión de alimentación &gt; <b>239.2 V</b>.</p> <p>Tensión de alimentación &lt; <b>176.8 V</b>.</p>	<p>Verificar el valor de tensión actual en el voltímetro del cargador.</p> <p>El reenganche del cargador es automático cuando la tensión alcanza un valor normal de utilización así:</p> <p>Reenganche a <b>228.8 V</b> para un nivel de tensión alto.</p> <p>Reenganche a <b>187.2 V</b> para un nivel de tensión bajo.</p>

POSIBLE CAUSA	POSIBLE SOLUCIÓN
<b>Falla alimentación</b> del Transformador principal <b>T1</b> .	<p>Verificar tensión de <b>208 Vac ± 5%</b> entre los pares de bornes 4 – 5, 5 – 6 y 4 – 6. Si la tensión medida no es correcta, debe estar defectuoso el contactor <b>K1</b>.</p> <p>Verificar tensión de <b>208 Vac ± 5%</b> entre los pares de bornes 10 – 11, 11 – 12 y 10 – 12. Si la tensión medida no es correcta, debe estar defectuoso el relé térmico <b>F1</b>.</p> <p>Ver plano <b>COREDEL RB 4267</b>.</p>
<b>Falla Transformador</b> principal <b>T1</b> .	<p>Verificar tensión de <b>125 Vac ± 5%</b> entre los pares de bornes 22 – 23, 23 – 24 y 22 – 24. Si la tensión medida no es correcta, el transformador <b>T1</b> debe estar defectuoso.</p> <p>Ver plano <b>COREDEL RB 4267</b>.</p>
<b>Bobina</b> de contactores <b>K1</b> y/o <b>K2</b> quemada.	<p>Verificar tensión de <b>220 Vac ± 5%</b> entre los bornes 44 y 48 (Bobina del contactor <b>K1</b>), <b>ver plano en la parte interior del gabinete</b>.</p> <p>Verificar tensión de <b>220 Vac ± 5%</b> entre los bornes 68 y 69 (Bobina del contactor <b>K2</b>), <b>ver plano en la parte interior del gabinete</b>.</p> <p>Si las tensiones medidas anteriormente son correctas, revisar por inspección visual las bobinas de los contactores <b>K1</b> y <b>K2</b>.</p> <p>Si se observa alguna anomalía, reportar la falla al CTE Oriente y CENS.</p>

POSIBLE CAUSA	POSIBLE SOLUCIÓN
---------------	------------------

<p><b>Falla alimentación</b> del Transformador auxiliar <b>T2</b>.</p>	<p>Verificar tensión de <b>208 Vac ± 5%</b> entre los bornes 63 y 64, <b>ver plano en la parte interior del gabinete</b>.</p> <p>Si la tensión medida no es correcta, debe estar abierto el juego de fusibles <b>F3 – F9</b>. Ver plano <b>COREDEL RB 4267</b>.</p>
<p><b>Falla Transformador</b> auxiliar <b>T2</b>.</p>	<p>Verificar tensión de <b>220 Vac ± 5%</b> entre los bornes <b>22 – 23, 23 – 24 y 22 – 24</b>. Si la tensión medida no es correcta, el transformador <b>T2</b> debe estar defectuoso.</p> <p>Ver plano <b>COREDEL RB 4267</b>.</p>
<p><b>Falla del circuito de rectificación</b>.</p>	<p>Verificar tensión de <b>125 Vcc ± 5%</b> entre los bornes 32 y 33, <b>ver plano en la parte interior del gabinete</b>. Si la tensión medida no es correcta, reportar la anomalía al CTE Oriente y CENS.</p> <p>Ver plano <b>COREDEL RB 4267</b>.</p>
<p><b>Fusibles de protección interna quemados</b>.</p>	<p>Verificar tensión de <b>125 Vcc ± 5%</b> entre los bornes 51 y 54, <b>ver plano en la parte interior del gabinete</b>. Si la tensión medida no es correcta, los fusibles <b>F7 y F8</b> deben estar abiertos.</p> <p>Verificar tensión de <b>125 Vcc ± 5%</b> entre los bornes 33 y 34. Si la tensión medida no es correcta, el fusible <b>F4</b> debe estar abierto.</p> <p>Ver plano <b>COREDEL RB 4267</b>.</p>
<p><b>Tarjeta</b> electrónica averiada.</p>	<p>Revisar por inspección visual la tarjeta electrónica del cargador. Si se observa alguna anomalía, reportar la falla al CTE Oriente y CENS.</p>
<p><b>Componentes</b> del circuito de potencia quemados.</p>	<p>Revisar por inspección visual el banco de condensadores, tiristores, e inductancia. Si se observa alguna anomalía, reportar la falla al CTE Oriente y CENS.</p>

Si después de este chequeo no se ha encontrado la falla, informar al **CTE Oriente** y **CENS** para coordinar las labores de revisión y reparación.

#### OPERACIÓN DEL CARGADOR

En esta parte de la consigna, se presenta una breve descripción de la operación del cargador de 125 Vcc. En la figura siguiente, se muestra el panel indicador de la tarjeta electrónica.

DEMANDA		
CARGA		
DEMANDA		
FLOTACIÓN		
AUTOMÁTICO		
MANUAL		

El régimen automático es señalado por el LED verde que se enciende en la tecla **MANUAL – AUTO** del circuito electrónico. El paso de **CARGA** a **FLOTACIÓN** y viceversa se realiza automáticamente.

En marcha normal, el cargador debe ser utilizado en automático, ya que este régimen es el que ofrece la mayor seguridad de funcionamiento, gracias a la regulación de tensión, a la limitación de intensidad y al paso de **FLOTACIÓN** a **CARGA**.

Cuando el cargador ha estado fuera de servicio por un largo período de tiempo, y entra a funcionar, arranca en régimen de **CARGA**. El encendido de un LED rojo confirma el funcionamiento en este régimen y la carga se mantiene durante 15 horas, lapso fijado por un relé temporizador electrónico.

Al terminarse el ciclo de carga, el relé temporizador electrónico provoca automáticamente el regreso al régimen de **FLOTACIÓN**.

En caso de que falle la alimentación del cargador, este se detiene y el banco de baterías asegura la alimentación de los equipos y comienza a producirse la descarga.

Si el paro del cargador es inferior a 5 minutos, el cargador arranca en régimen de **FLOTACIÓN** ya que la descarga de la batería es ligera. Si el paro del cargador es superior a 5 minutos, el cargador arranca entonces en régimen de **CARGA** hasta que se alcance nuevamente el régimen de **FLOTACIÓN**.

Cuando se presiona la tecla “DEMANDA – FLOTACIÓN”, se impone el régimen de **FLOTACIÓN** y se enciende el LED rojo que se encuentra en la tecla para confirmar.

Cuando se presiona la tecla “DEMANDA – CARGA”, se impone el régimen de **CARGA** y se enciende el LED rojo que se encuentra en la tecla para confirmar.

Para anular los regímenes impuestos de **FLOTACIÓN** y **CARGA**, se presionan de nuevo las teclas utilizadas anteriormente. Cualquier paro del cargador en régimen impuesto, provoca el retorno en **AUTOMÁTICO**.

El régimen **MANUAL** se utiliza únicamente para cargar a fondo el banco de baterías. La utilización de este régimen debe ser coordinada con el CTE Oriente y CENS. Además, los circuitos de utilización deben estar desconectados, debido a la elevada tensión que puede ser alcanzada. Para utilizar este régimen se debe seguir el siguiente procedimiento:

Verificar que el potenciómetro manual se encuentra en “O”, haciéndolo girar en sentido contrario a las manecillas del reloj.

Apretar la tecla de selección **MANUAL – AUTO** del circuito. El LED verde debe apagarse y el LED rojo debe encenderse. El flujo del cargador baja a cero.

Hacer girar muy lentamente el potenciómetro manual hasta que la corriente de carga aparezca en el amperímetro. Esta operación debe ser efectuada con mucho cuidado, ya que el potenciómetro actúa directamente sobre el ajuste de fase de los tiristores y la aparición de corriente es muy rápida.

Al terminar la operación, volver a poner el potenciómetro en “O”.

Presionar la tecla de selección **MANUAL – AUTO** del circuito para regresar al régimen **AUTOMÁTICO**.

Cualquier paro del cargador en régimen **MANUAL**, provoca el retorno a **AUTOMÁTICO**.

Para mayor información de la operación del cargador, ver Manual de Operación del Cargador **S3N3T 125 V/ 60 A - COREDEL**.