

**“ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD PARA LA
IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA
INTELIGENTE DE ANÁLISIS ELÉCTRICO”**

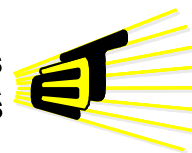
Catalina Pimiento Rodríguez

**Tesis de grado para optar por el título de Ingeniera
Electricista**

Universidad
Industrial de
Santander



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



Bucaramanga, Diciembre de 2008



Tesis de grado para optar por el título de Ingeniera Electricista

**“ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD PARA LA
IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA INTELIGENTE
DE ANÁLISIS ELÉCTRICO”**

Catalina Pimiento Rodríguez

Director

Phd. Gilberto Carrillo Caicedo.

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

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

Bucaramanga, Diciembre de 2008

REGISTRO HISTÓRICO DEL DOCUMENTO		
VERSIÓN	FECHA	DESCRIPCIÓN DEL CAMBIO
Final	Octubre de 2008	Emisión Biblioteca

ELABORADO POR:	REVISADO POR:	APROBADO POR:
Catalina Pimiento Rodríguez.	Phd. Hermann R. Vargas Ms. Liliana Jaimes <i>Profesores E³T</i>	Phd. Gilberto Carrillo Caicedo <i>Profesor E³T</i>

Universidad Industrial de Santander (UIS)

Documento Confidencial

Ni la totalidad ni parte de este documento puede reproducirse, almacenarse o transmitirse por algún procedimiento electrónico o mecánico, incluyendo fotocopias, grabación magnética o electrónica o cualquier medio de almacenamiento de información y sistemas de recuperación, sin permiso escrito de la UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER.

Este es un documento interno de la UIS. Al recibirlo no podrá pasarlo a persona alguna excepto las que se le indique en la lista de distribución autorizada por la UIS. Cualquier persona externa a la UIS que utilice la información en este documento asume la responsabilidad por su empleo. No podrá ser usado de cualquier manera en detrimento de los intereses de la UIS.

Para un angelito

Agradecimientos

A mi bella madre, por todo lo que me ha dado, por su espera y apoyo.

Al profesor Carrillo, el mejor director de tesis del mundo.

A Jhon Albeiro, por su gran aporte.

A mi querido amigo filósofo Ludwing, por su colaboración en la edición.

A las raticas Monacho, Alex, Castilla, Tavo, Omar y Seso, por los buenos momentos.

A Federico Villa, Yair, José Ignacio y Luis Julian, analistas de XM, por lo que me enseñaron en mi período de práctica.

A todos los profesores que me exigieron durante mi carrera y me hicieron lo que soy ahora.

A Armando Burgos por haberme dado la oportunidad de trabajar en este proyecto en XM.

A mi Universidad, con mucho orgullo, por todo lo que me enseñó.

Contenido

1. CONTEXTO DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN	1
1.1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	4
1.3 MARCO CONCEPTUAL.....	6
1.3.1 <i>Fundamentos de la Ingeniería del Conocimiento</i>	6
1.3.2 <i>Niveles del Conocimiento</i>	8
1.3.3 <i>Inteligencia Artificial</i>	9
1.3.4 <i>Resolución de problemas y técnicas de búsqueda heurística</i>	12
1.3.5 <i>Sistemas Expertos</i>	16
1.3.6 <i>Razonamiento Basado en Casos</i>	21
2. ANÁLISIS ELÉCTRICO EN EL CND	23
2.1 PLANEACIÓN A LARGO Y MEDIANO PLAZO.....	25
2.1.1 <i>Descripción general del proceso</i>	25
2.1.2 <i>Tareas Comunes del Análisis Eléctrico</i>	25
2.1.3 <i>Flujo de Información</i>	27
2.2 MANTENIMIENTOS.....	29
2.2.1 <i>Descripción general del proceso</i>	29
2.2.2 <i>Tareas Comunes del Análisis Eléctrico</i>	30
2.2.3 <i>Flujo de Información</i>	34
2.3 DESPACHO.....	35
2.3.1 <i>Descripción general del Proceso</i>	35
2.3.2 <i>Tareas Comunes del Análisis Eléctrico</i>	35
2.3.3 <i>Flujo de Información</i>	37

2.4	SALA DE CONTROL	39
2.4.1	<i>Descripción general del proceso</i>	39
2.4.2	<i>Tareas comunes del Análisis Eléctrico</i>	40
2.4.3	<i>Flujo de Información</i>	42
3.	DIAGNÓSTICO	44
3.1	CONOCIMIENTO EMPÍRICO DE LAS SENSIBILIDADES	45
3.1.1	<i>Descripción del Problema</i>	45
3.1.2	<i>Representación del Problema</i>	46
3.1.3	<i>Casos posibles de localización del problema</i>	47
3.2	INFORMACIÓN QUE NO SE INTERCAMBIA DE UN ÁREA A OTRA	49
3.2.1	<i>Descripción del Problema</i>	49
3.2.2	<i>Representación del Problema</i>	49
3.2.3	<i>Casos posibles de localización del problema</i>	50
3.3	ANÁLISIS QUE SE REPITEN	52
3.3.1	<i>Descripción del Problema</i>	52
3.3.2	<i>Representación del Problema</i>	54
3.3.3	<i>Casos posibles de localización del problema</i>	55
3.4	PÉRDIDA DEL PASADO	57
3.4.1	<i>Descripción del Problema</i>	57
3.4.2	<i>Representación del Problema</i>	57
3.4.3	<i>Casos posibles de localización del problema</i>	58
3.5	TAREAS MANUALES E INEFICIENTES	59
3.5.1	<i>Descripción del Problema</i>	59
3.5.2	<i>Representación del Problema</i>	60
3.5.3	<i>Casos posibles de localización del problema</i>	60
3.6	SUBUTILIZACIÓN DE LOS RECURSOS TECNOLÓGICOS	61

3.6.1	<i>Descripción del Problema</i>	61
3.6.2	<i>Representación del Problema</i>	62
3.6.3	<i>Casos posibles de localización del problema</i>	62
4.	PROPUESTA PARA UN SISTEMA INTELIGENTE DE ANÁLISIS ELÉCTRICO	63
4.1	DELIMITACIÓN Y REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA.....	63
4.2	MÓDULO I: SISTEMA EXPERTO GUÍA DEL ANÁLISIS ELÉCTRICO	64
4.2.1	<i>Delimitación</i>	64
4.2.2	<i>Requerimientos básicos</i>	64
4.2.3	<i>Hipótesis</i>	65
4.2.4	<i>Caracterización del Conocimiento</i>	65
4.2.5	<i>Especificación de la posición inicial</i>	68
4.2.6	<i>Definición de los movimientos legales</i>	73
4.2.7	<i>Posiciones que representan una victoria</i>	77
4.2.8	<i>Explicitar objetivo implícito de no sólo realizar movimientos legales sino también los más óptimos</i>	78
4.3	MÓDULO II: SISTEMA CON RAZONAMIENTO BASADO EN CASOS HISTÓRICOS DEL ANÁLISIS ELÉCTRICO	78
4.3.1	<i>Delimitación</i>	78
4.3.2	<i>Requerimientos básicos</i>	78
4.3.3	<i>Hipótesis</i>	79
4.3.4	<i>Datos de entrada</i>	79
4.3.5	<i>Datos de Salida</i>	80
4.3.6	<i>Conocimiento útil</i>	80
4.3.7	<i>Caracterización del conocimiento</i>	82
4.3.8	<i>Recuperar</i>	85
4.3.9	<i>Reutilizar</i>	88

4.3.10	<i>Retener</i>	89
5.	DESCRIPCIÓN DE LA PLATAFORMA	90
5.1	ESTRUCTURA DEL SISTEMA INTELIGENTE	90
5.2	DATOS	93
5.3	INFORMACIÓN	94
5.3.1	<i>Información de entrada</i>	94
5.3.2	<i>Información de salida</i>	95
5.4	CONOCIMIENTO	95
5.5	MANEJO DE LA INFORMACIÓN	96
5.6	ESPECIFICACIONES DE TAMAÑO	97
6.	CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS	98
7.	BIBLIOGRAFÍA	102
8.	ANEXOS	105

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 PEQUEÑO SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA	4
FIGURA 2 DIFERENCIACIÓN ENTRE SISTEMAS EXPERTOS Y SISTEMAS BASADOS EN CONOCIMIENTO.....	17
FIGURA 3 SE Y SBC RESPECTO A LOS SISTEMAS DE IA	18
FIGURA 4 DIAGRAMA CONCEPTUAL DEL RAZONAMIENTO BASADO EN CASOS.....	22
FIGURA 5 FLUJO DE INFORMACIÓN DEL ANÁLISIS ELÉCTRICO EN EL CND.....	24
FIGURA 6 ANÁLISIS ELÉCTRICO EN PLANEACIÓN.....	25
FIGURA 7 TAREA DAR SUGERENCIAS DE EXPANSIÓN	26
FIGURA 8 TAREA HALLAR GENERACIÓN DE SEGURIDAD EN UN ÁREA OPERATIVA.....	27
FIGURA 9 FLUJO DE INFORMACIÓN EN PLANEACIÓN	28
FIGURA 10 FLUJO DE INFORMACIÓN PLANEACIÓN–MANTENIMIENTOS	28
FIGURA 11 FORMATO DE CONSIGNACIÓN (TOMADO DE XM S.A. E.S.P.).....	29
FIGURA 12 ANÁLISIS ELÉCTRICO DE MANTENIMIENTOS	30
FIGURA 13 TAREA ENCONTRAR LOS MANTENIMIENTOS O SIMULTANENIDAD DE ELLOS QUE GENEREN IMPACTO ELÉCTRICO	31
FIGURA 14 TAREA ANALIZAR MANTENIMIENTO CON IMPACTO ELÉCTRICO	31
FIGURA 15 TAREA IDENTIFICAR RESTRICCIONES ELÉCTRICAS Y OPERATIVAS.....	32
FIGURA 16 TAREA HALLAR UN CORTE	33
FIGURA 17 TAREA HALLAR UNA TENSIÓN OBJETIVO.....	33
FIGURA 18 FLUJO DE INFORMACIÓN EN MANTENIMIENTOS.....	34
FIGURA 19 FLUJO DE INFORMACIÓN MANTENIMIENTOS–DESPACHO.....	34
FIGURA 20 ANÁLISIS ELÉCTRICO DESPACHO	35
FIGURA 21 TAREA ENCONTRAR LAS RESTRICCIONES A PARTIR DE UN N–1 Y LAS MEDIDAS DE CONTROL ÓPTIMAS PARA ALIVIARLA	37
FIGURA 22 FLUJO DE INFORMACIÓN DESPACHO.....	38

FIGURA 23	FLUJO DE INFORMACIÓN DESPACHO-SALA.....	39
FIGURA 24	ANÁLISIS ELÉCTRICO SALA DE CONTROL.....	40
FIGURA 25	TAREA TOMAR MEDIDAS DE CONTROL.....	41
FIGURA 26	TAREA IDENTIFICAR CAUSA DE UN EVENTO.....	41
FIGURA 27	FLUJO DE INFORMACIÓN SALA DE CONTROL.....	42
FIGURA 28	FLUJO DE INFORMACIÓN SALA DE CONTROL – OTRAS ÁREAS.....	43
FIGURA 29	ESQUEMA DE OBTENCIÓN DE GENERACIÓN DE SEGURIDAD	65
FIGURA 30	ESQUEMA DE OBTENCIÓN DE CORTE	66
FIGURA 31	ESQUEMA DE OBTENCIÓN DE TENSIÓN OBJETIVO	67
FIGURA 32	ESQUEMA DE OBTENCIÓN DE SEÑALES DE EXPANSIÓN.....	67
FIGURA 33	RELACIÓN POTENCIA – ÁNGULO.....	72
FIGURA 34	REPRESENTACIÓN DE UN PUNTO DE OPERACIÓN.....	82
FIGURA 35	REPRESENTACIÓN DE UN CASO	83
FIGURA 36	REPRESENTACIÓN DE LA TÉCNICA DE "VECINO MÁS CERCANO"	85
FIGURA 37	REPRESENTACIÓN DE UN DIAGRAMA DE ÁRBOL.....	87
FIGURA 38	EJEMPLO DE UN SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA.....	87
FIGURA 39	ESTRUCTURA DEL ADMINISTRADOR INTELIGENTE INTEGRADO DEL ANÁLISIS ELÉCTRICO DE UN SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA	90
FIGURA 40	ARQUITECTURA DEL MÓDULO 1 – SISTEMA EXPERTO GUÍA DEL ANÁLISIS ELÉCTRICO	91
FIGURA 41	ARQUITECTURA DEL MÓDULO 2 – SISTEMA CON RAZONAMIENTO BASADO EN CASOS HISTÓRICOS DEL ANÁLISIS ELÉCTRICO	93

LISTA DE TABLAS

TABLA 1 CLASIFICACIÓN DE LOS DATOS	94
TABLA 2 ORGANIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN DE UN CASO DE ENTRADA	96

RESUMEN

TITULO: Estudio de prefactibilidad para la implementación de un Sistema Inteligente de Análisis Eléctrico¹.

AUTOR: Catalina Pimiento Rodríguez²

PALABRAS CLAVES: Inteligencia Artificial, restricciones, sistema eléctrico de potencia, operación.

DESCRIPCIÓN

Este trabajo de investigación, presenta en primer lugar, una descripción de la manera como se efectúa el análisis eléctrico en el Centro Nacional de Despacho, ejecutado por el operador del Sistema Eléctrico Colombiano, XM – Compañía de Expertos en Mercados S.A. E.S.P. Posteriormente, formula un diagnóstico que representa un conjunto de problemas relacionados con la cualidad y las condiciones con que se elabora dicho análisis, que ponen en riesgo la calidad, seguridad y confiabilidad del suministro de energía. Finalmente, hace una propuesta para que dichos problemas puedan, en gran proporción, solucionarse con un *Administrador Inteligente Integrado del Análisis Eléctrico de un Sistema Eléctrico de Potencia*. El objetivo central de dicho administrador es encontrar los problemas de la red que ocasionan restricciones eléctricas y operativas, y dar una recomendación eléctrica como medida de control. Se estructura en dos módulos, el módulo 1 es un Sistema Experto que aborda el problema desde la perspectiva del analista para encontrar una solución. Este módulo apunta a recopilar el conocimiento, constituyéndose en guía del proceso de análisis eléctrico. El módulo 2 es un Sistema con Razonamiento Basado en Casos que encuentra soluciones a nuevos casos de entrada a partir de registros de casos de análisis eléctricos históricos similares, tomando como entrada solo la información almacenada acerca de de la generación, demanda, topología y recomendaciones eléctricas de la red en el pasado, sin correr nuevos flujos de carga o efectuar otros análisis. Este módulo por su parte, apunta a estandarizar, almacenar y recuperar la información, lo que constituye uno de los grandes retos de la mayoría de las empresas.

¹ Proyecto de Grado

² Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Phd. Gilberto Carrillo Caicedo.

ABSTRACT

TITLE: Prefeasibility study for the implementation of an Intelligent System of Electric Analysis³.

AUTHOR: Catalina Pimiento Rodríguez⁴

KEY WORDS: Artificial Intelligent, restrictions, Electric Power System, operation.

DESCRIPTION

This research, shows at first, a description of the way electric analysis is carried out in the National Dispatch Center, develop by the Colombian Electric System Operator, XM - Expert Markets Company S.A. E.S.P. Subsequently, it makes a diagnosis that represents a set of problems related to the quality and conditions under which such analysis is made, that jeopardize the quality, safety and reliability of energy supply. Finally, it makes a proposal in order to solve those problems, to a large extent, with an *Intelligent Integrated Manager of Electrical Analysis of an Electric Power System*. The main objective of this manager is to find the network problems that cause electrical and operational restrictions, and to give an electric recommendation as a control gauge. It is structured in two modules, Module 1 is an expert system which tackle the problem from the perspective of the analyst to find a solution. This module aims to compile knowledge, becoming a guide of the electric analysis process. Module 2 is a Case Based Reasoning system which find solutions to new cases of input from historical records of similar electrical analysis cases, using as input only the information stored of the generation, demand, topology and electrical recommendations of the network in the past, without running new load flows or execute other tests. This module aims to standardize, store and retrieve information, which is one of the great challenges of most companies.

³ Degree project

⁴ Faculty of Physical-Mechanic Engineering. Electric, Electronic and Telecommunications School. Phd. Gilberto Carrillo Caicedo.

Capítulo I

1. CONTEXTO DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad hay un amplio rango de aplicaciones tecnológicas en las que las herramientas computacionales juegan un papel fundamental tanto en la ingeniería como en los negocios. Ese uso comprende el acceso y el intercambio de información a través de nuevas tecnologías como bancos de datos públicos, correo electrónico, Internet e Intranet, pero también comprende su uso en las áreas de producción, control o administración de las empresas. Los aspectos mencionados han planteado nuevos retos a resolver, entre los cuales están el desarrollo de software flexible y autónomo, por ello se debe organizar en redes que posibiliten la cooperación entre ellos para almacenar volúmenes de información cada vez mayores, y estructurar contenidos diversos e imprecisos. En particular, la relación entre usuario y computador, demanda una nueva forma de interacción. Este último deja de jugar un papel pasivo y receptor, y se convierte en un participante activo que coopera con el usuario en la solución de problemas.

Es por esto, que en las empresas, los Sistemas Inteligentes empiezan a tener cada vez mayor auge, hasta el punto de ir suponiendo una referencia importante en la toma de decisiones para la junta directiva. En realidad, incluso se podría afirmar que el límite de las aplicaciones objeto de los Sistemas Inteligentes está en la imaginación humana, siendo siempre de utilidad allí donde se necesite un experto.

En la ingeniería eléctrica, y más aun, en el área de análisis de Sistemas de Potencia, la implementación de un Sistema Inteligente, dada la vasta cantidad de información y la complejidad de los análisis, se hace una herramienta en extremo ventajosa y necesaria.

En Colombia, el Sistema Eléctrico posee la característica de ser uno de los sistemas de potencia más dinámicos del mundo, debido al entorno político, económico y social, y al gran crecimiento que lo acompaña. Este dinamismo exige una alta presión sobre los analistas eléctricos y los operadores del sistema para cumplir con los criterios de calidad, seguridad y confiabilidad esperados por parte del servicio de Energía.

Los analistas deben, desde años antes, tratar de predecir o plantear los escenarios más críticos con que podría operar el sistema y formular soluciones para prevenir o tomar medidas de control a largo, mediano, corto plazo y en tiempo real. Esta gran incertidumbre ha hecho requerir especialistas con una gran comprensión y dominio en cuanto atañe al análisis eléctrico; comprensión y dominio que han de perfilarse no sólo en el campo teórico sino que han de poseer un significativo conocimiento empírico.

El paso hacia un sistema inteligente, que sirva de ayuda y soporte para el proceso de análisis eléctrico desde cualquier perspectiva temporal, abre una puerta hacia la automatización de procesos que necesiten “razonamientos” en varios niveles de conocimiento. No obstante, esta puerta se ha cerrado a causa del temor que implica delegar a una máquina tareas que hasta ahora han sido llevadas a efecto con intervención humana. El presente proyecto intenta precisamente de abrir esa puerta e identificar si existe alguna forma en que pueda ser representado el conocimiento de un analista eléctrico para ser caracterizado dentro de un sistema inteligente, sin que constituya un peligro para la seguridad del sistema.

XM, Compañía de Expertos en Mercados S.A. E.S.P., es la empresa que en Colombia se encarga de prestar servicios integrales de operación, administración y desarrollo de mercados mayoristas energéticos, en el ámbito local, regional y mundial. Tiene la tarea de asegurar las condiciones de libre competencia en un ambiente de mercado a través de normas claras, promoviendo la inversión en la actividad eléctrica. Su función más importante es planear la operación de los recursos de generación, interconexión y

transmisión del sistema nacional, teniendo como objetivo una operación segura, confiable y económica.

Este trabajo de pregrado, para optar por el título de Ingeniera Electricista, hace en primer lugar, una descripción de la manera como se efectúa el análisis eléctrico que ejecuta el Centro Nacional de Despacho. Se logró gracias a un período de seis meses de observación y práctica en las dependencias que se consideraron claves en el proceso de análisis eléctrico, como lo son Planeación Largo y Mediano Plazo, Mantenimientos, Despacho y Sala de Control. Posteriormente, formula un diagnóstico que representa un conjunto de problemas relacionados con la cualidad y las condiciones con que se elabora dicho análisis, que ponen en riesgo la calidad, seguridad y confiabilidad del suministro. Finalmente, hace una propuesta para que dichos problemas puedan, en gran proporción, solucionarse con un sistema inteligente; para ello, se formulan dos modelos que apuntan, uno a estandarizar, almacenar y recuperar la información del pasado, y otra a constituirse en guía del proceso de análisis eléctrico.

Posteriormente, se establecen los requisitos que debe cumplir el Sistema Inteligente a desarrollar o adquirir, y se presentan las conclusiones del trabajo.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Para cerciorarse de la calidad, la seguridad y la confiabilidad del servicio de Energía en un Sistema Eléctrico de Potencia⁵, no solo debe garantizarse que el sistema (con disponibilidad⁶ de todos los activos que posee para la actividad de transmisión y generación) soporte cualquier contingencia⁷, sino también que, ante diversas configuraciones⁸ (debido a las indisponibilidades de activos por mantenimientos) resista esta condición. Esto significa que en la realidad, se estaría cubriendo la salida de más de un elemento⁹.

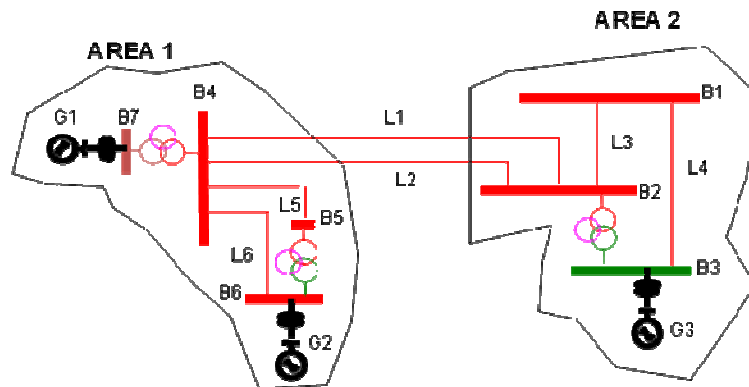


Figura 1 Pequeño Sistema Eléctrico de Potencia

⁵ Sistema Eléctrico de Potencia: Es un conjunto de activos de generación e interconexión, que satisfacen una demanda de Potencia. Sistema de Transmisión Nacional (STN): Es el conjunto de todos los activos en un Sistema Eléctrico de Potencia a más de 230 kV.

⁶ Disponibilidad de un activo: Dícese de un elemento del STN que tiene disposición para usarse en la actividad de Transmisión y/o Generación.

⁷ Contingencia: Es la salida o eliminación dentro de un Sistema Eléctrico de Potencia, de un elemento como Línea, Transformador, o unidad de Generación, por una falla o situación no programada. También se conoce como criterio n-1.

⁸ Configuración de un Sistema Eléctrico de Potencia: Conjunto de estados de disponibilidad y disposición de todos los elementos de un sistema eléctrico.

⁹ Elemento: Es una línea, barra, transformador, unidad de generación y/o elemento de compensación

Supóngase un pequeño sistema eléctrico, como el mostrado en la figura 1, con 3 unidades de generación y 16 elementos de transmisión (6 líneas, 7 barras y 3 transformadores). Supóngase que los tres generadores pueden tener cada uno 3 niveles diferentes de generación: alta, media o baja. Esto daría 27 escenarios de generación diferentes (3^3 , tres estados elevado al número de unidades). Supóngase también que cada barra tiene asignada una demanda, que igualmente puede ser alta, media o baja. Esto daría 2187 posibilidades de demanda diferentes, (3^7 , tres estados elevado al número de barras). La combinación de disponibilidades de los elementos de transmisión, ocasionarían 65536 escenarios topológicos diferentes (2^{16} , dos estados -disponible e indisponible- elevado al número de elementos de transmisión). La combinación de los tres escenarios define el sistema eléctrico de potencia. Si se tienen en cuenta los tres a la vez se tendrían, en teoría, 3.869'835.264 posibilidades ($27 * 2187 * 65536$).

En la realidad no se analizan todas las posibilidades, ya que estas no corresponden todas a puntos de operación del sistema o escenarios, pues pueden corresponder a puntos no factibles de operación. Por ejemplo, que un escenario con todos los elementos indisponibles no es un punto de operación. Una planta térmica cuyo precio de oferta siempre sea elevado y se despache de forma que tenga generación alta, es poco probable. Demandas altas, bajas y medias en el mismo período de tiempo tampoco es probable. Descartando las opciones no factibles y no probables debido al gran tamaño de un sistema eléctrico de potencia, los casos a analizar son normalmente muy numerosos.

Lo que se busca entonces, es formalizar el proceso de análisis eléctrico, de modo tal que se reduzca el tiempo de análisis, se independice el análisis del analista y se facilite el entrenamiento de nuevo personal.

Formulado el camino, se encuentran dos problemas. El primero, consiste en que en XM no se visualizan claramente unos criterios estándares para realizar el análisis eléctrico mediante un procedimiento establecido. Esto se debe a que los criterios y/o reglas que se manejan son muy empíricas y varían en la medida en que va cambiando el sistema. El segundo es, que después de efectuados los análisis, resulta difícil debido a la dimensión del problema, encontrar en el pasado un punto de operación que sea lo suficientemente

similar para que sean válidos los análisis eléctricos y las recomendaciones eléctricas. Este último aspecto del análisis constituye uno de los grandes retos de la mayoría de las empresas: almacenar de una manera segura y eficiente la información obtenida en pruebas y experiencias anteriores, con el fin de vincularla acertada y estratégicamente en un nuevo punto de operación.

1.3 MARCO CONCEPTUAL¹⁰

1.3.1 Fundamentos de la Ingeniería del Conocimiento

El término *ingeniería del conocimiento* [12] hace referencia a los científicos, la tecnología y la metodología necesarios para procesar el conocimiento. Su objetivo es extraer, articular y computarizar el conocimiento de un experto.

Con el fin de precisar el presente trabajo, se esbozan tres conceptos interrelacionados: dato, información, y conocimiento.

Dato: Es la representación simbólica de un aspecto simple, objeto o hecho, del universo de discurso. Se distingue entre datos objeto, que son elementos de determinado dominio (pueden ser pares atributo-valor) y datos hecho, que son relaciones entre objetos.

Información: Es cualquier estímulo capaz de cambiar el estado o de alterar la conducta de un sistema. Es un conjunto de datos organizados de tal forma que aumentan el conocimiento. La cantidad de información que se obtiene de un mensaje depende de

¹⁰ Tratándose de un marco conceptual, donde los principios y definiciones sobre la materia en cuestión han sido ya instituidos previamente por numerosos investigadores y autores destacados, se prescinde aquí de mencionarlos uno a uno, toda vez que dichos conceptos e ideas gozan de una generalidad más que sobreentendida; bástese en su lugar referenciar algunos de ellos, según puede apreciarse en el texto.

cuánto reduzca la incertidumbre en el receptor acerca del correspondiente universo de discurso.

Conocimiento: Es la representación simbólica de aspectos complejos de algún universo de discurso, implica información más organización y abstracción. Puede ser de dos tipos: declarativo y procedimental (procedimental en términos informáticos). El declarativo describe cómo son las cosas y el procedimental cómo funcionan. El uso de uno u otro tipo de conocimiento depende del entorno, aunque en los sistemas expertos buscan usar el declarativo por ser más cercano al lenguaje del usuario.

Dicho en otras palabras, un dato es el resultado de la observación de un acontecimiento u objeto espacio-temporalmente determinado. Éstos tienen un lenguaje y un significado, de manera que se puede determinar si un dato falso o verdadero. Por *información* se entiende, en cambio, darle forma y sentido a los datos seleccionados; es decir, la organización de aquellos que, con base en un interés previo, resultan de importancia en un momento o situación específicos, y su posterior inserción en un contexto determinado. El conocimiento, por su parte, hace referencia a la metabolización de la información, constituye el proceso mental en el cual a partir de la interpretación de la información, se pueden obtener conclusiones, e incitar a su vez a que se originen nuevas ideas.

Las diferencias entre estos conceptos se puede apreciar de acuerdo con el tipo de lenguaje que se requiera. Los datos, por una parte, son transmitidos por un lenguaje meramente descriptivo (descripción de hechos representados en símbolos generalizados). La información, por su parte, requiere un lenguaje explicativo, de modo que el emisor explica al receptor en qué contexto ha ubicado su organización de datos. El conocimiento en cambio, requiere para su transmisión un lenguaje emocional; en efecto, se trata de un intercambio entre el receptor y el emisor, y la metabolización de esa información.

El proceso de formación del conocimiento se considera cíclico. El conocimiento llega incompleto y desordenado. El ingeniero del conocimiento es la persona encargada de organizarlo, completarlo y prepararlo para su transferencia al sistema. El

metaconocimiento es conocimiento sobre el propio conocimiento. Cuanto peor uniformada esté una tarea, más metaconocimiento se necesitará para llevarla a cabo.

La habilidad es la capacidad para trabajar con conocimiento parcial, por parte del experto, y obtener una alta productividad. Es deseable una tarea hábil a una bien informada pero burda. Lo que interesa es reproducir y construir sistemas hábiles. Un sistema no es un sistema experto si no es hábil.

1.3.2 Niveles del Conocimiento

Cuando el experto ha terminado de relatar el conocimiento que posee, se puede establecer la base de conocimiento de orden 0 (teoría de orden 0), formada por conocimiento factual: *es el que se puede conocer sin necesidad de hacer preguntas*. Si se monta un sistema experto con este conocimiento y se intenta resolver un problema, el resultado va ser bastante pobre [12].

Normalmente, los expertos humanos son capaces de dar un paso más, proporcionando una heurística (teoría de orden 1), que se puede definir como el *conocimiento que tiene el especialista a partir de sus propias experiencias*. La heurística son reglas que muestran cómo tratar el conocimiento. Es un conocimiento sobre el propio dominio en el que se trabaja, que dice cómo emplear los conocimientos que el experto humano dio como factuales. Añadiendo la heurística a la base de conocimientos de un sistema experto se mejora la respuesta, pero se comprueba que no se llega al grado de experto que tiene el especialista.

Volviendo al experto, se obtiene el metaconocimiento (teoría de orden 2), que *es independiente del dominio y dice cómo emplear eficientemente el conocimiento*. Es la parte del conocimiento que es completamente independiente del contexto. Dentro del metaconocimiento habrá reglas que indican cómo actuar fuera de cualquier dominio. Puede servir para detectar fallos sintácticos y semánticos en la transmisión del conocimiento por parte del experto. Incluso la forma en la que el experto representa el

conocimiento es metaconocimiento. El metaconocimiento es algo innato en los expertos, por lo que difícilmente hablan de él.

Para obtener metaconocimiento, se examina el conocimiento que ha proporcionado el especialista humano. Cuando el sistema no responde de forma adecuada, se analizan los fallos y se descubren las metareglas (reglas de metaconocimiento) que se deberían de incluir.

El metaconocimiento ayuda a que el sistema se adapte al entorno, permite resolver conflictos entre reglas y permite detectar y suplir fallos simples en las reglas, un ejemplo de metareglas puede ser el siguiente:

M.R.1: Usar reglas proporcionadas por expertos veteranos mejor que por expertos más novatos.

M.R.2: (sintáctica) Toda regla debe tener condición y acción.

M.R.3: (semántica) Toda regla debe tener por lo menos un caso sobre el que aplicarla.

1.3.3 Inteligencia Artificial

La inteligencia artificial¹¹ (IA) es un área de la computación que trata sobre sistemas que pueden emular características que se asocian con la inteligencia humana tales como razonamiento, comprensión del lenguaje, aprendizaje y toma de decisiones, para cumplir con determinadas funciones o soluciones de problemas complejos. Involucra áreas como las redes neuronales, los algoritmos genéticos, los sistemas expertos y la lógica difusa, entre otros.

¹¹ Las secciones 1.3.3, 1.3.4 y 1.3.5 es un texto tomado textualmente del Anexo 1 de la Tesis de Maestría de Luis Everley Llano Zuleta. Referencia [6].

En la IA clásica, que data desde 1952, el control es centralizado y en la IA distribuida, que data desde 1980, varias entidades funcionan de forma coordinada con control distribuido. Como parte de esta última existen los sistemas multiagentes (SMA) caracterizados por las relaciones entre entes que se comunican y cooperan entre sí para cumplir con los objetivos dados al sistema. Los agentes pueden tener la capacidad de alcanzar una meta, evaluar y seleccionar acciones, justificar sus acciones, asumir roles, negociar con otros agentes y coordinar y planificar acciones [11].

De acuerdo con [10] la IA estudia cómo lograr que las máquinas realicen tareas que realizan mejor los seres humanos, considerando que hay tareas que no son bien resueltas por ninguno de los dos. Estas tareas pueden clasificarse en tareas de la vida diaria (percepción, lenguaje natural, sentido común), tareas formales (juegos, matemáticas) y tareas de los expertos (ingeniería, análisis científico, diagnóstico médico, análisis financiero), las cuales requieren inteligencia para llevarse a cabo. Surge entonces la gran pregunta: ¿se puede modelar la inteligencia humana con técnicas de IA?. En 1976 se planteó la hipótesis de sistemas de símbolos físicos (patrones físicos), según la cual la estructura de símbolos (instancias relacionadas), llevan a una colección de estructuras que forman un sistema que tiene procesos de creación, modificación, reproducción y destrucción. Un sistema con estas características tiene los medios disponibles para realizar acciones consideradas inteligentes, por tal motivo, se considera posible modelar la inteligencia humana a través de este tipo de sistemas. En general, se busca el modelo de los procesos involucrados en el razonamiento inteligente.

La IA se ocupó en sus comienzos de los problemas asociados a los juegos y la demostración de teoremas, toda vez que éstos requieren de inteligencia para ser desarrollados, por cuanto su solución por simple exploración lleva a condiciones de explosión combinatoria que lo haría inmanejable con los recursos computacionales existentes. Una de las primeras incursiones en esta área fue en el juego de damas, donde se utilizó experiencia adquirida para mejorar el rendimiento en la solución.

También se ocupó de problemas de sentido común, desarrollándose en su momento el programa GPS (General Program Solver) que además del sentido común hacía

manipulaciones simbólicas en expresiones lógicas. El GPS sólo pudo dar respuesta a problemas de fácil solución, dado que carecía de un programa capaz de manejar una cantidad significativa de conocimientos.

Como respuesta a estas dos considerables situaciones (explosión combinatoria y limitaciones en el manejo del conocimiento), alrededor del mundo se fueron desarrollando técnicas para la manipulación de grandes cantidades de conocimiento, a la vez que se pudo concluir sobre la naturaleza y las propiedades del mismo: Es voluminoso, difícil de caracterizar con exactitud, cambia constantemente, se puede organizar de tal forma que se corresponde con la forma en que será utilizado (esta última es la diferencia principal entre datos y conocimiento). Una técnica de IA es entonces un método que utiliza conocimiento representado, con las siguientes características [10]: El conocimiento debe representar las generalizaciones, debe ser comprendido por las personas que lo proporcionan, puede modificarse fácilmente, puede utilizarse en muchas situaciones y usarse para ayudar a superar su propio volumen. El desarrollo de tales técnicas llevó a importantes avances en las áreas de investigación asociadas con las tareas mencionadas al comienzo. Particularmente, se destaca el éxito en aplicaciones de los Sistemas Expertos en la industria y la administración, para resolver problemas en un dominio específico que requieren mucho conocimiento técnico humano. También se descubrió que si bien el ser humano desarrolla sus habilidades iniciando por tareas en percepción lingüística y de sentido común, hasta llegar a las más especializadas, en la aplicación de la IA, el nivel de dificultad es en orden inverso, es decir, resulta más fácil realizar aplicaciones en dominios especializados que en tareas de sentido común.

Hay consenso en que no está cerca o quizás nunca llegue el momento en que se supere el “test de Turing”¹², pero mientras se esté dispuesto a aceptar menos que una imitación completa de la persona, calibrando el éxito de la IA en dominios más restringidos, se

¹² Se reconoce a Alan Turing como uno de los pioneros de la IA, quien en su artículo *Computing Machinery and Intelligence* planteaba la pregunta ¿pueden pensar las máquinas?

estaría satisfecho con el aporte de esta área de la ciencia. Lo que se aprende al estudiar IA es el diseño de mecanismos de representación de conocimiento y algoritmos que pueden usar los programas para resolver problemas complejos que requieren inteligencia. Finalmente, la estructura de conocimiento y las estrategias de resolución de problemas deben codificarse e integrarse en programas reales.

1.3.4 Resolución de problemas y técnicas de búsqueda heurística

El principio de una buena resolución de un problema es especificar tan bien como sea posible el “criterio de éxito” para el funcionamiento del programa en su dominio particular y restringido. Y, dado el alcance de la IA, un sistema de IA debe incorporar mucho conocimiento y manejar adecuadamente el ciclo que se produce con el incremento en la cantidad de conocimiento, tal que, por su aumento, se vuelve cada vez más difícil acceder a las cosas cuando se necesitan, entonces se demanda más conocimiento y así continúa el ciclo.

Para construir un Sistema que resuelve un problema específico se debe:

1. Definir el problema con precisión. Se requiere claridad de las situaciones iniciales y finales que se aceptarán como soluciones del problema
2. Analizar el problema. Con base en las características que pueden tener un gran efecto en la selección de la técnica que sería utilizada.
3. Aislar y representar el conocimiento necesario para resolver el problema.
4. Elegir las mejores técnicas que resuelvan el problema y aplicarlas al problema en particular.

Se requiere también crear una descripción formal y manejable del propio problema:

1. Definir un espacio de estados, el cual debe tener a su vez las generalizaciones respectivas.
2. Identificar los estados de partida
3. Especificar estados objetivos
4. Especificar las reglas que describen las acciones (operadores):
 - Suposiciones en la descripción informal del problema no especificadas:
 - Generalidad de las reglas
 - Cantidad del trabajo para resolver el problema debe ser preprocesado y representado en reglas.

Un ejemplo que plantea [10] en este particular es con el problema: "juego de ajedrez", para el cual se requiere:

1. Especificar la posición inicial del tablero
2. Identificar las reglas que definen los movimientos legales
3. Determinar las posiciones del tablero que representan una victoria
4. Explicitar el objetivo implícito de no sólo realizar movimientos legales sino también ganar la partida.

Incorporar restricciones en la parte izquierda de las reglas, que restringen la aplicación de las reglas a estados en los que su uso es más adecuado para llegar a una solución, aumenta la eficiencia del programa que utiliza reglas. También puede darse preferencia a las reglas para resolver el conflicto cuando se llega a la viabilidad de aplicar varias simultáneamente. [10] ejemplifica este concepto con el problema: "las jarras de agua".

Lo anterior forma parte de la especificación de un espacio de estados, lo cual es muy importante en la solución del problema. Otro aspecto a considerar es el de los Sistemas de Producción [10, pág. 38] que permiten o facilitan describir y desarrollar el proceso de búsqueda, partiendo del hecho de que el proceso de búsqueda constituye el núcleo de muchos procesos inteligentes. Los Sistemas de Producción requieren:

1. Conjunto de reglas.
2. Una o más bases de datos o de conocimiento, donde la información debe estructurarse en forma adecuada.
3. Una Estrategia de Control, que se relaciona con el orden en que las reglas se comparan con la base de datos. Es la guía de aplicación de las reglas en el proceso de búsqueda. Debe cumplir los requisitos: que produzca algún cambio de estado y que sea sistemática, lo cual implica la necesidad de producir cambios globales (en el curso de varios pasos) o cambios locales (en el curso de un paso sencillo).

Los dos métodos de búsqueda por exploración más sencillamente ilustrados son: búsqueda primero en anchura, así como en profundidad. Sin embargo, en problemas complejos, conducen a un elevado costo computacional por explosión combinatoria. [10] ejemplifica esta situación con el problema "agente viajero", para incursionar en otro tipo particular de búsqueda conocida como "búsqueda heurística". Ésta es una técnica que aumenta la eficiencia de un proceso de búsqueda posiblemente sacrificando demandas de completitud, existen de propósito general que pueden adoptarse para la aplicación en muchos problemas (son ejemplos: generación y prueba, escalada, el primero mejor, el vecino más próximo) y las hay de propósito específico, las cuales explotan el conocimiento específico del dominio. Más adelante tendrá mayor detalle en el uso de heurísticas en la solución de problemas¹³.

¹³ Este tema está básicamente resuelto por [2] en donde se organiza la búsqueda en forma organizada para identificar el mejor con una alta probabilidad primero, para luego moverse en soluciones buenas, de modo que en el momento de parada, el óptimo normalmente se ha logrado.

Todos los procesos de búsqueda pueden plantearse como un recorrido sobre una estructura en forma de árbol [2], donde cada nodo representa un estado del problema y cada enlace representa la relación entre los estados que representan los nodos conectados. El árbol puede estar dado explícitamente o implícitamente en las reglas (las cuales generan explícitamente solamente lo que se explora) y tiene los siguientes aspectos importantes: Dirección (razonamiento adelante o atrás), forma de seleccionar las reglas (hay que emparejar las reglas con los estados) y forma de representar los nodos en el proceso de búsqueda. Por su parte, puede suceder que el espacio de búsqueda se represente mejor por un grafo de búsqueda que por un árbol de búsqueda, en los casos donde un estado puede ser sucesor de varios nodos a la vez.

En la definición de las características del problema resulta fundamental atender a los siguientes interrogantes:

1. ¿Puede descomponerse el problema?
2. ¿Pueden deshacerse o ignorarse pasos hacia una solución?
3. ¿Es predecible el universo?
4. ¿Una solución adecuada es absoluta o relativa (absoluta: cuando es posible reconocer un estado objetivo simplemente con examinarlo)?
5. ¿La solución es un estado o una ruta de estados?
6. ¿Cuál es el papel del conocimiento?
7. ¿Necesita la tarea interactuar con una persona?

Teniendo presente que: “No existe una única forma de resolver todos los problemas. Sin embargo, los nuevos problemas no deben considerarse totalmente *ab initio*” [10, pág. 59], esto podría resumirse en la frase “construir sobre lo construido”, la cual está fortalecida en [10] con la siguiente afirmación: “Se analizan con cuidado los problemas y se clasifican los métodos de resolución de los mismos atendiendo a las clases de problemas para los

que son adecuados, podrían reutilizarse muchas cosas aprendidas en la anterior resolución de problemas similares”.

1.3.5 Sistemas Expertos

Los Sistemas Expertos (SE) hacen parte de las técnicas de IA que captan el conocimiento de las personas conocedoras de un área o dominio particular para ejecutar tareas o solucionar problemas complejos en dicha área. Tales sistemas reflejan el discernimiento y la intuición humana, constituyéndose en una aplicación informática que simula el proceso de razonamiento mediante la aplicación específica de conocimientos e inferencias.

Entre las características de los sistemas expertos se encuentran:

- Amplio conocimiento del dominio
- Aplicación de técnicas de búsqueda
- Soporte para análisis heurístico
- Habilidad para inferir nuevos conocimientos a partir de conocimientos ya existentes
- Procesamiento de símbolos
- Capacidad para explicar su propio razonamiento

Al realizar un recorrido en la literatura de los SE es común toparse con el concepto de Sistemas Basados en Conocimiento (SBC), los cuales son manejados indistintamente en muchos textos aduciendo que conceptualmente representan lo mismo. Sin embargo en [13] se habla de ellos como dos paradigmas de sistemas inteligentes diferentes, donde el primero está dado desde un punto de vista funcional (conductista) y el segundo desde un punto de vista estructural (cognoscitivo), en forma gráfica en la figura 2.

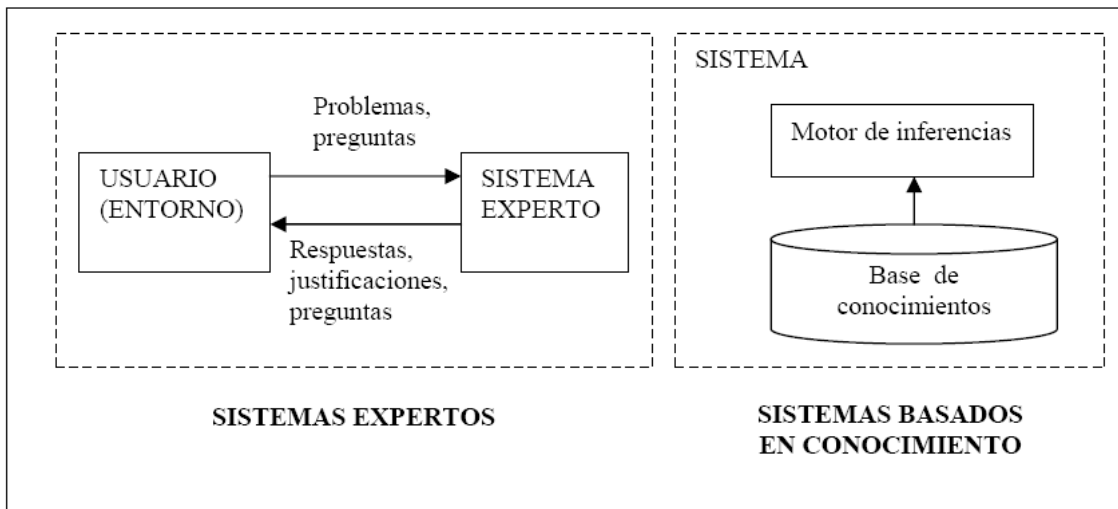


Figura 2 Diferenciación entre Sistemas Expertos y Sistemas Basados en Conocimiento

En los SE con orientación funcional (conductista) se analiza la actividad de un experto humano cuando resuelve problemas en un área muy concreta y se intenta emularlo o ayudarlo, con capacidad para adquirir cada vez más experiencia y capacidad para conversar con los usuarios y explicarles sus líneas de razonamiento.

Por su parte, los SBC con orientación estructural (cognoscitiva), plantean que la posibilidad de resolver determinados problemas radica en un "saber" o conocimiento específico sobre el tipo de problemas más que en capacidades intelectivas generales. Se da la separación entre el conocimiento codificado en la máquina (base de conocimientos) y los mecanismos deductivos (motor de inferencias).

La figura 3 planteada en [13], muestra la intersección para los SE y los SBC respecto a los sistemas de IA. Entendiéndose en este enfoque que los SE hacen parte de los SBC, donde los primeros se refieren más a la aplicación, y los segundos al concepto de conocimiento y arquitectura en general.

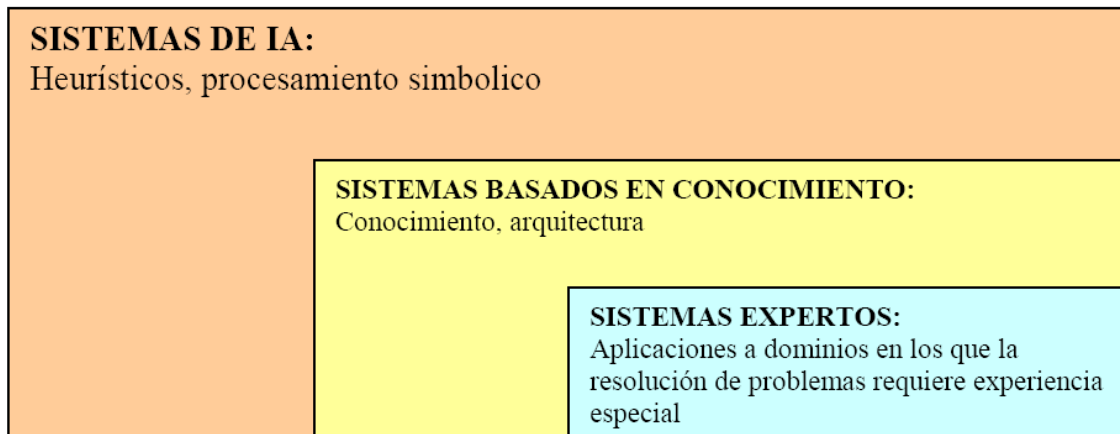


Figura 3 SE y SBC respecto a los Sistemas de IA

Existen varios componentes del conocimiento que es importante tener en cuenta en el análisis del desempeño experto, los cuales se indicarán en mayor detalle en la arquitectura:

- Hechos, relacionan elementos de la realidad con referencia al área específica
- Reglas de procedimiento, describen secuencias fundamentales de eventos y relaciones relativas al área, son bien definidas e invariables
- Reglas heurísticas, reglas generales en forma de opiniones o reglas empíricas que sugieren procedimientos que se pueden seguir cuando no están disponibles reglas de procedimiento invariables (el uso de estas reglas contribuye enormemente a la potencia y flexibilidad de los SE y tiende a distinguirlos aún más del software tradicional). Además de estas formas específicas de conocimientos, un experto posee un *modelo conceptual* general del área específica y un *esquema global* para hallar una solución, estas visiones globales conforman la infraestructura básica para la aplicación por parte del experto de conocimientos detallados.

En su forma general, podría plantearse la arquitectura de los sistemas expertos constituida por cinco elementos: 1: El usuario, 2: La interfaz de usuario, 3; El sistema de

almacenamiento y generación de conocimiento, 4: Los medios para explicación, y 5: Los medios para actualización de conocimiento.

El sistema de almacenamiento y generación de conocimiento es el corazón de un sistema experto y consta de una base de conocimiento y un motor de inferencia. Su función es almacenar confiablemente los conocimientos del experto para recuperarlos e inferir nuevo conocimiento cuando se requiera. La base de conocimiento es un depósito de las primitivas del conocimiento tales como hechos, reglas de procedimiento y reglas heurísticas, y que define la capacidad del SE para actuar como un experto. Especial atención requiere el esquema de representación de conocimiento que se utilice para almacenar la información en la base de conocimiento, dado que éste afecta el diseño del motor de inferencia, el proceso de actualización del conocimiento, el proceso de explicación y la eficiencia global del SE. El motor de inferencia es el sistema de software que ubica los conocimientos e infiere nuevos usando la base de conocimientos; su razón de ser está dada por la necesidad del SE de tratar flexiblemente con situaciones cambiantes y por la necesidad de tener en la base de conocimiento sólo las primitivas de conocimiento en vez de todas las posibles combinaciones de hechos que podrían darse con estas primitivas produciendo una explosión combinatoria. El paradigma del motor de inferencia es la estrategia de búsqueda que se emplea para producir el conocimiento demandando. La mayoría de paradigmas se basan en dos conceptos:

- (a). Encadenamiento hacia atrás (o retro-encadenamiento) que parte de los objetos deseados y trabaja hacia atrás en dirección a las condiciones pre-requisito y
- (b). Encadenamiento hacia delante (o encadenamiento frontal) que parte de las condiciones conocidas y trabaja hacia delante para alcanzar los objetivos deseados. La selección del paradigma de inferencia considerando la explosión combinatoria, influye fuertemente en el desempeño global de un SE.

Por su parte el sistema de explicaciones se inclina por la identificación de los pasos en el proceso de razonamiento y la justificación de cada uno de ellos. El sistema debe acceder a un registro de los conocimientos que se emplearon en el procesamiento, basándose en el

esquema de representación de la base de conocimientos y traducirlo a una forma que sea aceptable por el usuario. Es importante en la valoración de la credibilidad que se le concede al SE ya que este emula la capacidad que tiene el experto de justificar el razonamiento que conduce a cierta conclusión. En este punto es importante también poder diferenciar el nivel de conocimientos del usuario y entender cómo adaptar la explicación al nivel de experiencia del mismo. La aplicación de procesos para comunicar esta información con lenguaje natural es un alcance deseable, aunque no siempre posible, en el desempeño del SE. En muchos sistemas la explicación se limita a listar las reglas que se utilizaron durante la ejecución.

La actualización del conocimiento es otro elemento de la arquitectura de un SE, el cual refleja la habilidad para aprender del experto como un componente básico de su inteligencia. Su razón de ser radica en el hecho de que el conocimiento crece y cambia constantemente en las áreas de solución del SE, por lo cual la base de conocimiento debe cambiar en el mismo sentido. Dicha actualización puede darse de forma manual por el desarrollador del SE, manual por los usuarios del SE o de forma automática por medio del aprendizaje mecánico. La segunda forma requiere de un sistema de actualización más elaborado, mientras que la tercera forma es producto de mucha investigación, pues requiere que el sistema genere nuevos conocimientos en forma automática a partir de generalizaciones deducidas de experiencias anteriores.

Los dos elementos restantes de la arquitectura, el Usuario y la Interfaz de Usuario representan los componentes de entorno que forman parte de cualquier aplicación de software. En el caso de los SE el usuario puede estar operando como: Verificador, comprobando la validez del desempeño del sistema; Tutor, dando información adicional al sistema o modificando su conocimiento; Alumno, desarrollando pericia personal en el dominio de la aplicación y Cliente, aplicando la pericia del sistema a tareas específicas reales. La interfaz de usuario debe 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. Idealmente, debería estar compuesta de un sistema procesador de lenguaje natural.

1.3.6 Razonamiento Basado en Casos

En los últimos años, el Razonamiento Basado en Casos [9] ha experimentado un rápido crecimiento desde su nacimiento en Estados Unidos. Lo que sólo parecía interesante para un área de investigación muy reducida, se ha convertido en una materia de amplio interés multidisciplinar, así como de gran interés comercial.

El Razonamiento Basado en Casos, no es más que otro paradigma de resolución de problemas, pero son precisamente las diferencias con el resto de los acercamientos de la inteligencia artificial las que lo hacen tan especial. En lugar de confiar únicamente en el conocimiento general del dominio del problema, o realizar asociaciones a lo largo de relaciones entre descripciones del problema y conclusiones, este paradigma es capaz de utilizar conocimiento específico de experiencias previas, es decir, situaciones de un problema concreto (casos). Un problema nuevo (entiéndase, *nunca antes tratado*) es resuelto cuando se encuentra un caso pasado similar y se reutiliza en la situación del problema nuevo.

Una segunda diferencia, no por ello menos importante, es un acercamiento al aprendizaje incremental, sostenido, ya que se guarda una experiencia nueva cada vez que se resuelve un problema, pasando a estar disponible desde ese mismo momento para futuros problemas.

Se podría definir el Razonamiento Basado en Casos como: Resolver un problema nuevo recordando una situación similar previa y reutilizando su información y conocimiento. El ciclo del Razonamiento Basado en Casos (RBC) se considera formado por los siguientes procesos (ver figura 4):

1. RECUPERAR. Identificar las características principales de una descripción de un caso o problema y recordar un caso pasado evaluando similitudes con el nuevo problema.
2. REUTILIZAR. Adaptar la solución del problema anterior al nuevo problema, modificar una solución previa para encajarla dentro de un nuevo contexto y evaluar la solución sugerida.
3. RETENER. Almacenar la experiencia resultante como un nuevo caso en la memoria.

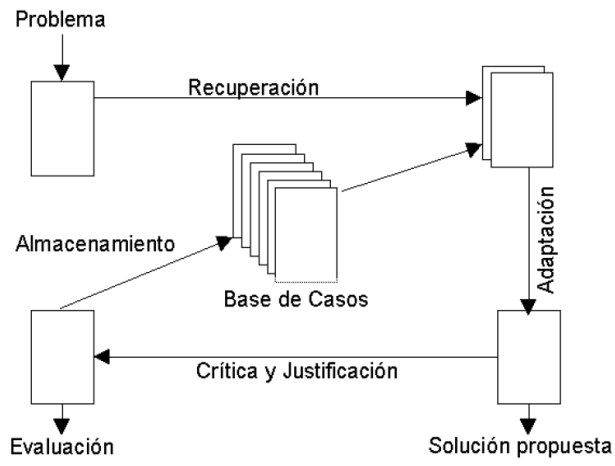


Figura 4 Diagrama conceptual del Razonamiento Basado en Casos

Capítulo II

2. ANÁLISIS ELÉCTRICO EN EL CND

El Centro Nacional de Despacho (CND) es el ente encargado de hacer la planeación de la operación, el despacho económico de generación de energía y la coordinación, supervisión y control de la operación del sistema eléctrico colombiano.

La planeación de la operación consiste en efectuar el planeamiento operativo energético y eléctrico de los recursos del SIN en el mediano y largo plazo. El planeamiento energético, es de carácter indicativo para los agentes, en tanto que el planeamiento eléctrico, que es propio de los analistas eléctricos, tiene carácter obligatorio. También comprende el seguimiento del mercado energético regional para orientar la gestión de la Empresa y la promoción de la integración en la coordinación gas-electricidad.

La finalidad del despacho económico de generación de energía es programar diariamente la utilización de los recursos de generación del Sistema Interconectado Nacional, para atender la demanda a menor precio, con calidad, seguridad y confiabilidad. Ofrece información sobre ofertas diarias, el programa actualizado de generación y los costos marginales de la operación.

La coordinación, supervisión y control de la operación efectúa la planeación de corto plazo, coordinación, supervisión y control de la operación integrada de los recursos de generación y transmisión del Sistema Interconectado, de acuerdo con lo estipulado en los artículos 33 y 34 de la Ley 143 de 1994 y en concordancia con el reglamento de operación expedido por la CREG y los acuerdos técnicos aprobados por el CNO. Su objetivo es garantizar la utilización óptima de los recursos para la prestación del servicio eléctrico mediante la monitorización permanente de las centrales hidroeléctricas y unidades térmicas y de la red de interconexión a 230 y 500 kV, para coordinar las acciones

necesarias que permitan mantener los niveles de tensión y de frecuencia dentro de los rangos de calidad establecidos en el marco regulatorio vigente¹⁴.

El análisis eléctrico consiste en efectuar estudios de estabilidad de un sistema eléctrico de potencia de tal manera que se garantice la calidad, seguridad y confiabilidad del mismo. Cuando se hace algún análisis eléctrico en departamentos del CND, la entrega y la retroalimentación de la información debe ser en todos los sentidos, tal como se ilustra en la figura 5.

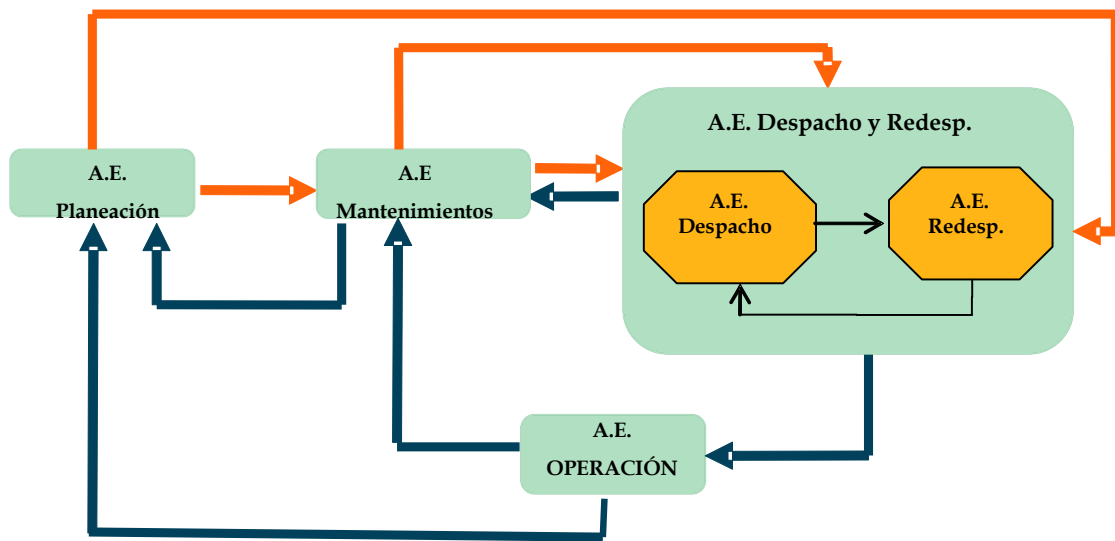


Figura 5 Flujo de Información del análisis eléctrico en el CND

En esta primera parte se va a hacer una descripción de la forma de realizar el análisis eléctrico en Planeación, Mantenimientos, Despacho y Operación. Para cada área se muestra la dirección de la información de los análisis eléctricos, algunas tareas que se desarrollan y por último se hacen algunas observaciones de lo detectado en cada uno de los procesos.

¹⁴ Definiciones tomadas del Manual de Calidad, XM S.A. E.S.P.

2.1 PLANEACIÓN A LARGO Y MEDIANO PLAZO

2.1.1 Descripción general del proceso

El objetivo que se tiene en el Área de Planeación, es analizar la evolución de la operación y las restricciones del SIN con un horizonte de largo plazo, planteando escenarios de demanda (máxima, media, baja), topología y generación para que de esta manera se pueda llegar al más crítico donde se tengan las posibles restricciones. Así mismo, se identifican y analizan proyectos que permitirían minimizar o eliminar restricciones que actualmente se hayan venido repitiendo de forma continua (ejemplo: sobrecargas sobre los mismos elementos).

En cada área el analista se enfrenta a tareas diferentes que generan interrogantes distintos. La figura 6, esquematiza la pregunta que debe responderse cualquier analista en el área de planeación, la manera en que se la resuelve y lo que se obtiene como producto del análisis eléctrico.

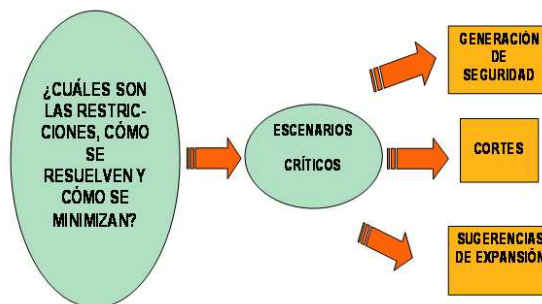


Figura 6 Análisis Eléctrico en Planeación

2.1.2 Tareas Comunes del Análisis Eléctrico

Cuando se hace la planeación para el largo y mediano plazos, se da respuesta a una serie de preguntas que el analista se formula en el momento de resolver las tareas de planeación. Una de esas es, por ejemplo, dar sugerencias de expansión, como se esquematiza en la figura 7. En principio, el analista deberá saber cómo percatarse de cuándo es preciso dar tal tipo de sugerencia; al saber esto y detectar un caso, se

preguntará, qué tipos de sugerencias puede dar, cómo determinará la ubicación de la expansión, etc., y así hasta lograr llegar a la recomendación eléctrica asociada.

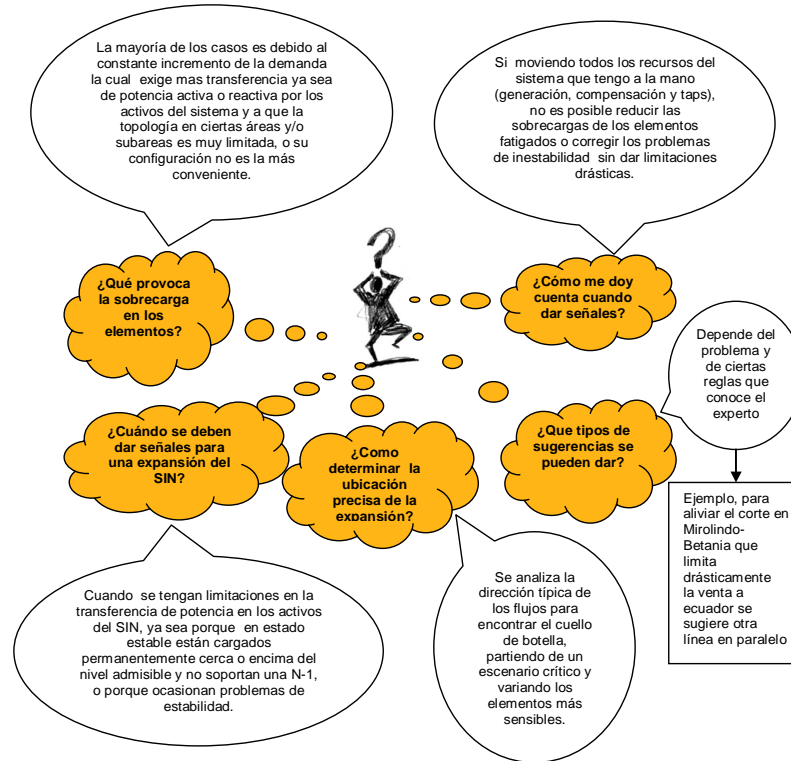


Figura 7 Tarea dar Sugerencias de Expansión

Otra tarea esquematizada en la figura 8, que no solo es común en el Análisis eléctrico de Planeación, sino también en el análisis de corto plazo semanal (análisis de mantenimientos) es hallar una generación de seguridad en un área operativa¹⁵. Cabe aclarar que aunque el producto sea el mismo la manera de llegar a éste es diferente. En general para poder obtener una generación de seguridad se deberá formular preguntas de cómo llegar a los escenarios críticos, qué condiciones de los parámetros y cómo llegar a obtener un valor adecuado de generación de seguridad para dar una recomendación eléctrica.

¹⁵ Área Operativa: Es el conjunto máximo de elementos de red que encierran la mayor cantidad de demanda en el número mínimo de líneas. Estas líneas representan puntos críticos del sistema.



Figura 8 Tarea hallar Generación de Seguridad en un área operativa

2.1.3 Flujo de Información

En el área de planeación, en CND considera dos tipos de información: una corresponde a los proyectos enviados por la UPME y la otra corresponde a los análisis eléctricos realizados en los otros departamentos (mantenimientos, despacho y operación) y a los resultados de la operación del SIN (análisis eléctrico postoperativo). La figura 9 detalla el flujo de Información del Análisis Eléctrico en Planeación.

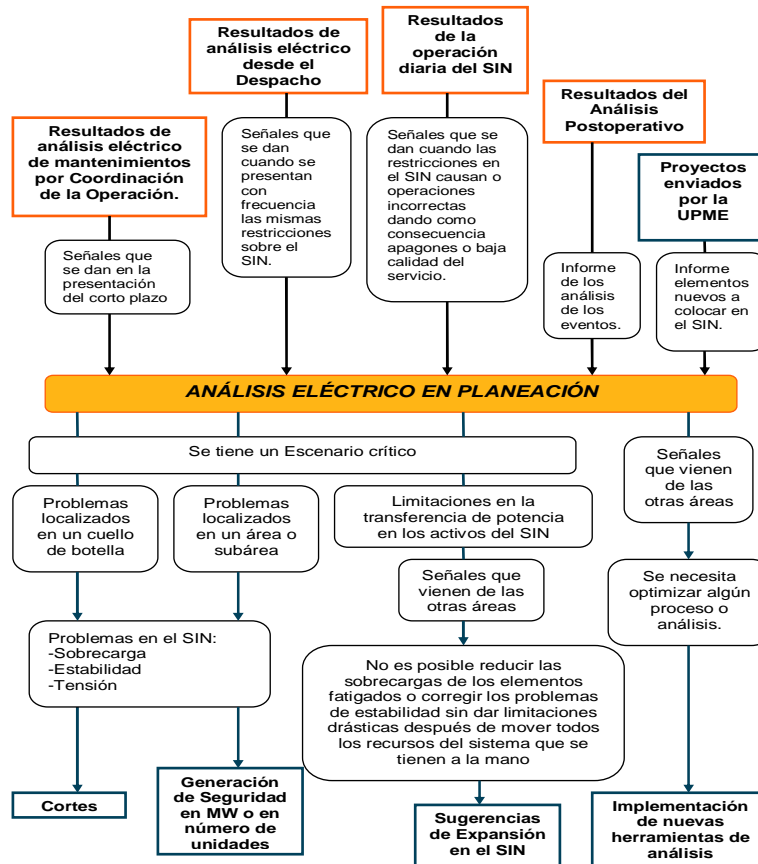


Figura 9 Flujo de Información en Planeación

El departamento de planeación del CND, además, envía información al departamento de mantenimientos para que éste realice sus correspondientes análisis, La figura 10 nomina el contenido de esos flujos de información.

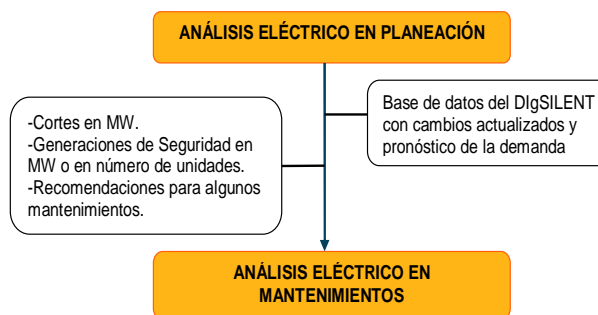


Figura 10 Flujo de Información Planeación-Mantenimientos

2.2 MANTENIMIENTOS

2.2.1 Descripción general del proceso

El departamento de Mantenimientos tiene el objeto de analizar el impacto que tienen las consignaciones¹⁶ programados semanalmente sobre el sistema, y a partir de las restricciones que generen, dar las recomendaciones apropiadas, garantizando siempre que el SIN opere con la adecuada confiabilidad, seguridad y calidad. Un ejemplo de un formato de consignación de elementos que entran en mantenimiento, que actualmente se está manejando en XM se muestra en la figura 11.

XM COMPAÑÍA DE EXPERTOS EN MERCADOS S.A. E.S.P
Permiso Consignación Nacional Equipos del SIN - Fecha del Reporte: 2007/09/11

P

Número de consignación C0044252	Estado Actual Solicitada	Fecha Estado Actual 2007/09/15 19:12	Tipo de Elemento BahiaLinea	Elemento Consignado BL1 PURNIO A NOROESTE 230 kV	Origen Mantenimiento MtoMayor
Agente Propietario INTERCONEXION ELECTRICA S.A. E.S.P.			Agente Operador INTERCONEXION ELECTRICA S.A. E.S.P.		Tipo de Ingreso Plan
Fecha de Inicio Programado 2007/09/20 07:30			Fecha de Fin Programado: 2007/09/22 17:30	Horas: 58	Lugar de Mantenimiento SUBESTACION PURNIO
Jefe de Trabajo ARTURO MARTINEZ			Responsable de Mantenimiento RAUL BURITICA		Teléfono 74734
Ref	Tipo de Elemento	Nombre Elemento	Fecha Inicial	Fecha Final	Estado Operativo y Detalle
AP	BahiaLinea	BL1 PURNIO A NOROESTE 230 kV	2007/09/20 07:30	2007/09/20 17:30	DesenergizadaAterrizada -
AP	BahiaLinea	BL1 PURNIO A NOROESTE 230 kV	2007/09/21 07:30	2007/09/21 17:30	DesenergizadaAterrizada -
AP	BahiaLinea	BL1 PURNIO A NOROESTE 230 kV	2007/09/22 07:30	2007/09/22 17:30	DesenergizadaAterrizada -
EA	Linea	NOROESTE - PURNIO 1 230 kV	2007/09/20 07:30	2007/09/20 17:30	DesenergizadaAterrizada -
EA	Linea	NOROESTE - PURNIO 1 230 kV	2007/09/21 07:30	2007/09/21 17:30	DesenergizadaAterrizada -
EA	Linea	NOROESTE - PURNIO 1 230 kV	2007/09/22 07:30	2007/09/22 17:30	DesenergizadaAterrizada -
EA	SegmentoBarra	PURNIO 1 230 KV	2007/09/20 07:30	2007/09/20 17:30	DesenergizadaAterrizada -
EA	SegmentoBarra	PURNIO 2 230 KV	2007/09/21 07:30	2007/09/21 17:30	DesenergizadaAterrizada -
EA	SegmentoBarra	PURNIO 2 230 KV	2007/09/22 07:30	2007/09/22 17:30	DesenergizadaAterrizada -

Operadores Involucrados

Semana Inicio 38	Semana Fin 38	Restricción Operativa NO	Comentarios: Restricción Operativa	Analista Electrico Responsable	Color Amarillo
----------------------------	-------------------------	------------------------------------	---	---------------------------------------	--------------------------

Sitio	APERTURA				CIERRE				Disponible
	Instrucción	Confirmar	Despeje de Campo	Tierra	Tierra	Cerrar Campo	Instrucción	Confirmar	

Descripción de los trabajos a realizar
 *Mantenimiento Periodico Equipos de Protecciones y Subestaciones (6 Años). Cambio tornillos de seguridad y montar válvula de seguridad interruptor L220.

Figura 11 Formato de Consignación (Tomado de XM S.A. E.S.P.)

¹⁶ Consignación: Declaración de indisponibilidad de un elemento en cierto número de períodos por mantenimientos

Es muy importante tener presente que se deben analizar los mantenimientos que coincidan temporal y espacialmente, cuya indisponibilidad afecta los límites de intercambio de las áreas, las generaciones mínimas de seguridad, la confiabilidad de la operación del sistema y/o la atención de la demanda, para ello, se deben dar recomendaciones que solucionen o alivien las restricciones que se presenten al ejecutar de estos mantenimientos.

Un analista en Mantenimientos se enfrenta a la pregunta ¿Cuáles son las recomendaciones eléctricas?, en el proceso de planeación de mantenimientos. La respuesta que debe dar se nomina en la figura 12.

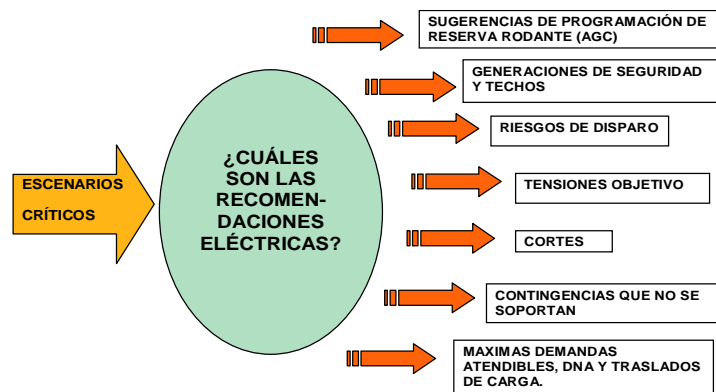


Figura 12 Análisis Eléctrico de Mantenimientos

2.2.2 Tareas Comunes del Análisis Eléctrico

Las actividades más importantes que se formula un analista en el momento de hacer un análisis de mantenimientos son: Encontrar los mantenimientos o simultaneidad de ellos que generan impacto eléctrico, analizar un mantenimiento con impacto eléctrico, identificar las restricciones eléctricas y operativas, dar un corte y dar una tensión objetivo.

En general, debido a la gran cantidad de consignaciones, solo se hacen análisis detallados a aquellas consignaciones con impacto eléctrico. La figura 13 hace referencia a la tarea de encontrar los mantenimientos o simultaneidad de ellos que generen impacto eléctrico, para ello es necesario que el analista sepa responderse cuáles mantenimientos son importantes e igualmente debe conocer acerca de las sensibilidades del sistema.

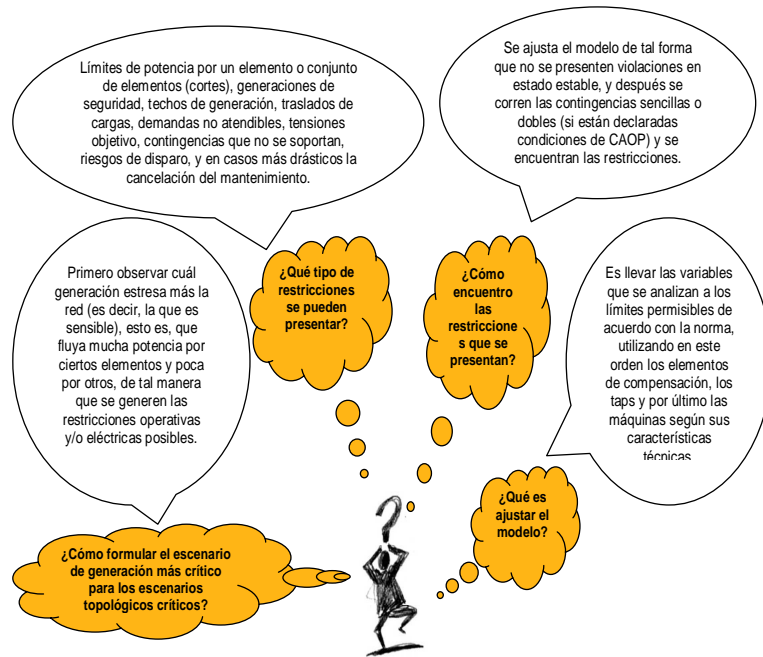


Figura 13 Tarea encontrar los mantenimientos o simultaneidad de ellos que generen impacto eléctrico



Figura 14 Tarea analizar mantenimiento con impacto eléctrico

Después de distinguir aquellas consignaciones cuyo análisis se debe detallar, el analista debe saber formularse los escenarios topológicos más críticos, los tipos de

restricciones que se pueden presentar, cómo encontrarlas y hacer esto trabajando sobre un modelo ajustado a los límites permisibles por las normas. La figura 14, hace referencia a esta tarea.

Dicho análisis consiste básicamente en identificar las restricciones eléctricas y operativas, de las cuales hace referencia la figura 15, y en últimas busca dar una recomendación eléctrica, como lo es una generación de seguridad, señalada en la sección anterior, o un corte¹⁷, (figura 16) o una tensión objetivo (figura 17).



Figura 15 Tarea identificar restricciones eléctricas y operativas

¹⁷ Corte: Limitación en el flujo de potencia por un elemento del STN.



Figura 16 Tarea hallar un corte



Figura 17 Tarea hallar una tensión objetivo

2.2.3 Flujo de Información

La información que entra al departamento de mantenimientos y la que sale del proceso de análisis eléctrico se representa en la figura 18. El producto básico y muy importante dentro de la cadena es un informe llamado RecElec (Recomendaciones Eléctricas), que está en un formato resumido y estandarizado. Éste informe es básicamente usado por los analistas del Despacho, Redespacho y en la operación en tiempo real.

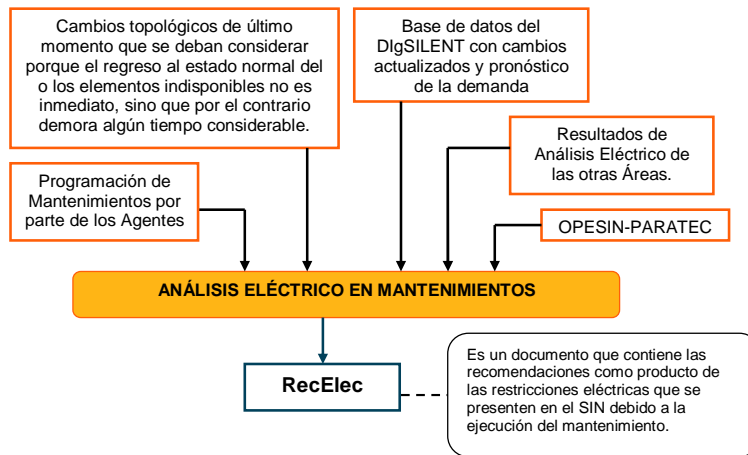


Figura 18 Flujo de información en mantenimientos

Por su parte la información que va directamente de Mantenimientos al Despacho, se muestra en la figura 19.

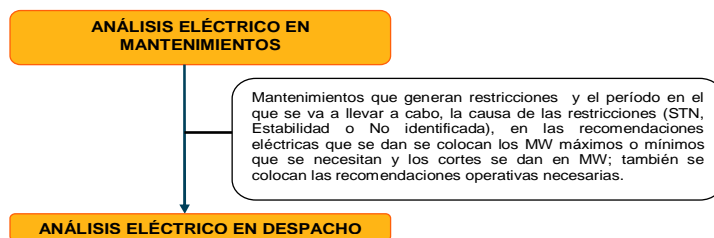


Figura 19 Flujo de información Mantenimientos-Despacho

2.3 DESPACHO

2.3.1 Descripción general del Proceso

El proceso de despacho corresponde a la programación de lo que deben generar en cada momento las unidades de generación ante una determinada solicitud de suministro de la demanda nacional. El objeto de este proceso es, entonces, programar diariamente la utilización de los recursos de generación del SIN, con el fin de atender la demanda a un menor precio, cumpliendo siempre con los criterios de calidad, seguridad y confiabilidad. En este departamento lo más importante es programar la operación del sistema y encontrar las medidas de control óptimas para satisfacer las restricciones que se presenten en el Sistema con el fin de que no haya violaciones a las magnitudes condicionadas por las normas. En la figura 20 se muestra un esquema del proceso:



Figura 20 Análisis Eléctrico Despacho

2.3.2 Tareas Comunes del Análisis Eléctrico

Analizando las actividades que se realizan en el departamento del despacho, se detectó que la tarea más importante que realiza un analista en el momento de hacer un análisis

eléctrico en el despacho es encontrar las restricciones a partir de una n-1 y las medidas de control óptimas para aliviarlas.

En este punto cabe aclarar que, en teoría, no sería necesario un proceso de análisis eléctrico tan detallado en este departamento, si existiera un software que optimizara los flujos en A.C. (y no en D.C como se tiene actualmente), ya que este tiene como función objetivo el mínimo costo de la operación del sistema, garantizando condiciones de no violación de los parámetros eléctricos, es decir, de las restricciones.

La figura 21 muestra las preguntas que le van surgiendo al analista al desarrollar esta labor. En principio, él debe tener un conocimiento previo de cómo identificar las restricciones, cuáles son las variables que debe monitorear y cómo encontrar las medidas de control óptimas. En el momento de recomendar una medida de control deberá saber qué elementos del sistema eléctrico podrá afectar, de tal manera que sean los más sensibles para resolver una violación y afecten lo mínimo los demás parámetros y, después de haber encontrado la medida de control, cómo comprobar que se trata realmente de la mejor.





Figura 21 Tarea encontrar las restricciones a partir de un n-1 y las medidas de control óptimas para aliviarla

2.3.3 Flujo de Información

El flujo de información que entra y sale del análisis eléctrico en el despacho se muestra en la figura 22. Allí se observa que una de las entradas son los RecEles mencionados en la sección anterior, que son demasiado útiles ya que estos deben plasmar los puntos del sistema donde se pueden obtener violaciones de los parámetros a monitorear, y por ende, dan una visión previa no solo para poder obtener una optimización que satisfaga las

condiciones, sino hacer más ágil este proceso que debe ser, por norma, ejecutado en muy pocas horas, por ser el producto más cercano a la operación en tiempo real. También se poseen como entradas la actualización del estado real de disponibilidad y oferta de los generadores, en una declaración que deben hacer directamente ellos mismos a la oficina de despacho al empezar el día, y estado de cada uno de los elementos del SIN, en una base de datos actualizada con los últimos sucesos.

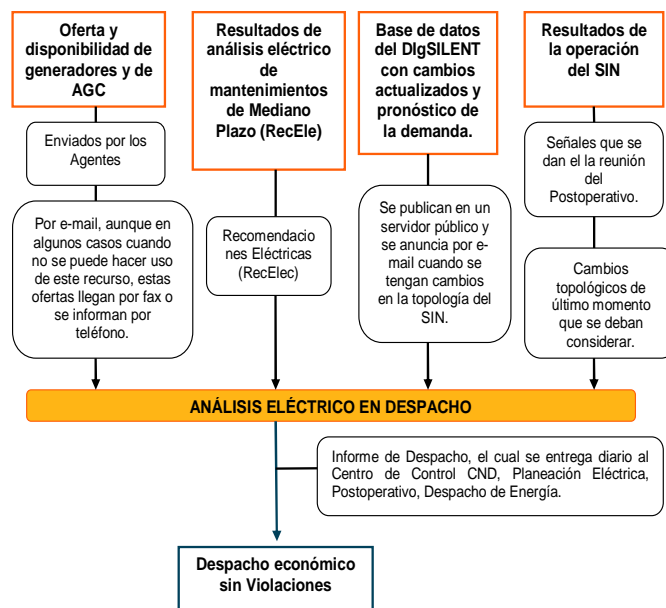


Figura 22 Flujo de Información Despacho

Adicionalmente el departamento de despacho envía información a la Sala de Control, que es el lugar donde se hace la monitorización en tiempo real de todos los parámetros que garantizan una operación segura y confiable en el SIN. Esto se nomina en la figura 23.

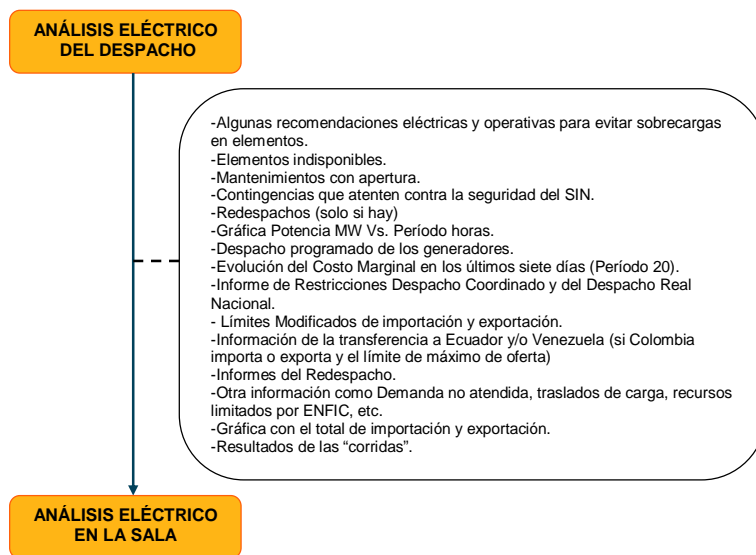


Figura 23 Flujo de Información Despacho-Sala

2.4 SALA DE CONTROL

2.4.1 Descripción general del proceso

La sala de control es físicamente el espacio donde se encuentran las pantallas, que a través del sistema SCADA¹⁸, refleja los valores de tensión, corriente, potencia activa, potencia reactiva, demanda y estado de cada uno de los elementos del SIN. Allí se encuentran permanentemente cinco analistas: un re-despachador, un operador, un analista de información y eventos, un analista de apoyo y el coordinador.

El objetivo es garantizar la utilización óptima de los recursos para la prestación del servicio eléctrico, para ello se hace un monitoreo constante de las características generales del sistema (topología, generación, compensaciones y variables de análisis como tensión,

¹⁸ SCADA: (Supervisory Control And Data Acquisition) Es un Sistema de Supervisión y Control en tiempo real. Posee funciones de comando sobre dispositivos, funciones de consignas sobre dispositivos, provee información para la toma de decisiones. Es una herramienta para mantener y controlar voltaje, frecuencia, potencia activa y potencia reactiva.

frecuencia y cargabilidad), con el fin de permitirle al analista conocer las nuevas condiciones del sistema y su comportamiento durante la operación.

Aquí se tiene una visión real de lo que sucede en el sistema, se determina el estado de las variables de la operación y se ejerce el control sobre ellas para coordinar, supervisar y controlar la Operación; se hace una revisión detallada de los eventos ocurridos en la operación, sus causas e implicaciones en el futuro, para realimentar el proceso de planear la operación.

En la figura 24 se muestra cuál es el interrogante que deben responderse los analistas de la Sala de Control y sus resultados:

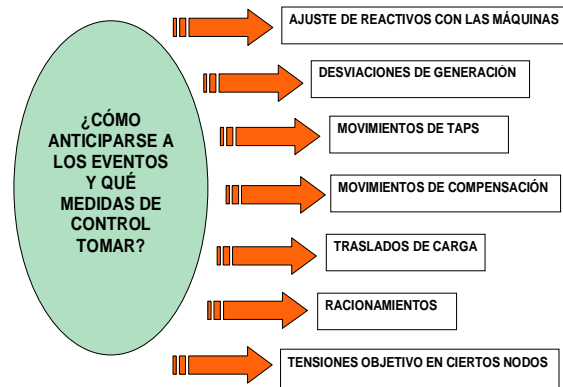


Figura 24 Análisis eléctrico Sala de Control

2.4.2 Tareas comunes del Análisis Eléctrico

En la Sala de control el analista debe responderse a sí mismo incógnitas de cómo tomar medidas de control e identificar ágilmente las causas de los eventos, para poder anticiparse a otros y garantizar la seguridad del sistema y la confiabilidad del suministro.



Figura 25 Tarea tomar medidas de control



Figura 26 Tarea identificar causa de un evento

La figura 25, muestra que para tomar una medida de control el analista debe saber en principio cuáles son las señales y cómo interpretarlas, para llegar a saber los indicadores con los que puede predecir un evento y la gama de posibilidades con las que cuenta para

resolver un problema que, aunque a veces, en el caso del operador en tiempo real, no pueda llegar a ser 100% la más óptima, debe ser claramente segura y confiable. La figura 26 por su parte, muestra que para identificar las causas de un evento, el analista debe hacer una selección de las señales del SOE¹⁹ que le son útiles, ya éste no hace ningún tipo de selección de información relevante, y por supuesto, debe tener el conocimiento que asocie el evento con la causa.

2.4.3 Flujo de Información

El flujo de información que entra y sale del análisis eléctrico en la Sala de Control se muestra en la figura 27. Se evidencia que tiene unas entradas muy similares a las del despacho, ya que es muy parecido al proceso que allí se ejecuta, solo que reajustado a las condiciones condiciones más actualizadas del SIN.

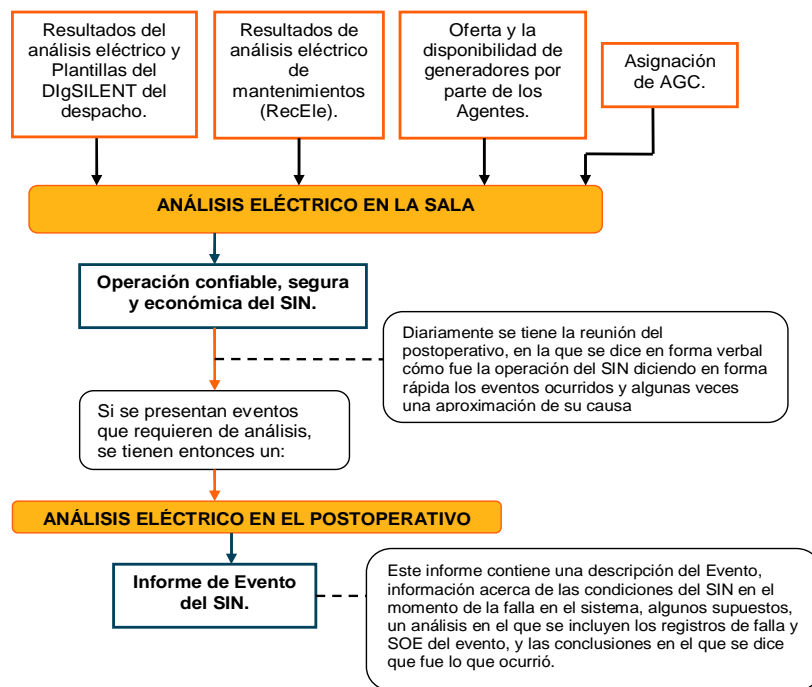


Figura 27 Flujo de Información Sala de Control

¹⁹ SOE: Sequence Of Events

La información que va directamente de la Sala de Control a las otras áreas se muestra en la figura 28, y comprende básicamente los resultados de los análisis de los eventos que se hacen en el subdepartamento de análisis eléctrico post-operativo.

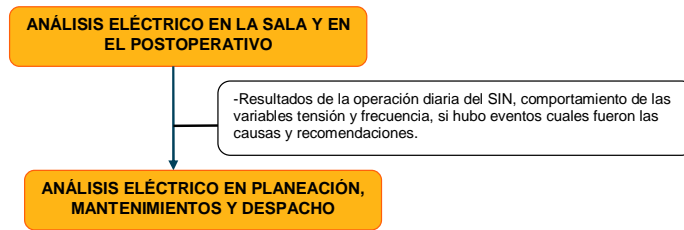


Figura 28 Flujo de Información Sala de Control - Otras áreas

Capítulo III

3. DIAGNÓSTICO

En medicina un diagnóstico es la búsqueda de síntomas y signos que sirven para reconocer la naturaleza de una enfermedad, a través de la observación y la realización de diferentes exámenes o pruebas. Durante el desarrollo de este proyecto en el día a día de la operación se detectaron algunas falencias, que para este caso, representan la enfermedad. Estas son:

- Conocimiento empírico de las sensibilidades
- Información que no se intercambia de un área a otra
- Análisis repetidos
- Pérdida del pasado
- Tareas manuales e ineficientes
- Subutilización de los recursos tecnológicos

Este conjunto de errores conllevan a la pérdida de calidad, seguridad y confiabilidad del suministro, y reducen las utilidades de la empresa. Para elaborar un diagnóstico adecuado, se ha escogido como metodología la desagregación de dichos problemas teniendo en cuenta el siguiente esquema:

- Descripción del problema
- Representación del problema
- Casos posibles de localización del problema

3.1 CONOCIMIENTO EMPÍRICO DE LAS SENSIBILIDADES

3.1.1 Descripción del Problema

El tratamiento de las restricciones técnicas impuestas por la red de transporte en un mercado de energía competitivo precisa desarrollos en dos ámbitos: técnico y económico. Desde el punto de vista técnico el problema a resolver consiste en encontrar la variación mínima con respecto al despacho ideal²⁰ que satisface las restricciones de operación en condiciones normales y anormales (bajo la hipótesis de fallo de algún elemento del sistema). Desde el punto de vista económico el problema consiste en encontrar la modificación más barata posible para cumplir las restricciones. La elección de los generadores que aumentan y reducen su generación tiene en cuenta tanto el criterio técnico (se seleccionan los generadores más “sensibles” para el alivio del problema) como el económico (se “amarran” el generador o grupo de generadores más sensibles y se hace una optimización de la variación más económica posible).

En general, el conocimiento de las sensibilidades²¹ del sistema es elemental en todos los procesos de análisis eléctrico desde cualquier contexto temporal (planeación, programación y operación) que implica saber:

- Qué tan sensible es la cargabilidad de uno o varios elementos ante el cambio de generación en una máquina, esto es, conocer la sensibilidad del flujo de potencia por un elemento (línea o transformador) con relación a la potencia suministrada en una barra específica.
- Qué tan sensible es la tensión en uno o varios nodos ante la salida de un elemento.

²⁰ Despacho Ideal: Programación de unidades de generación como si estuviera toda la generación en un solo nodo, esto es, sin tener en cuenta el sistema de transmisión.

²¹ Sensibilidades: Derivadas de la función objetivo con respecto a las variables de operación que permiten predecir el comportamiento del sistema ante variaciones tan pequeñas que admitan considerar linealidad en las variaciones.

- Qué tan sensible es el flujo de potencia por un elemento ante el incremento o decremento de la carga (demanda) en una barra.
- Qué tan sensible es la frecuencia ante un cambio de generación.
- Qué tan sensible es la tensión en uno o varios nodos ante un cambio en la generación de potencia reactiva en una máquina.
- Qué tan sensibles son las tensiones en los nodos al movimiento de ciertos elementos de compensación y taps.

La importancia de concretar un conocimiento más formal sobre la sensibilidad tiene como causa y efecto un método más riguroso del análisis de las contingencias. Lo anterior no implica que se deba erradicar el conocimiento empírico, sino fortalecer los análisis formales técnicos más detallados, dado que existen formulaciones teóricas sobre la sensibilidad de las variables de un sistema eléctrico de potencia con relación a las acciones de control, que se concretan en métodos de análisis de contingencias, como por ejemplo, por medio de índices de severidad (Ver Anexo 1).

3.1.2 Representación del Problema

Para encontrar la “sensibilidad” de alguna(s) variable(s) o elemento(s) del sistema sobre otra(s) o variable(s) (desde cualquier perspectiva de análisis) ante cierta circunstancia, se poseen metodologías principalmente heurísticas que consisten en:

- Recordar circunstancias similares (Por ejemplo, ante la salida de la línea Ocaña-Primavera se recuerda que se bajan las tensiones en Nordeste).
- Correr un flujo de cargas y mover la variable o el elemento (variable de control), cuando la variable que se desea que cambie de estado (variable controlada) se afecta en un porcentaje “más significativo” con respecto a otras.
- Tener en cuenta que los elementos topológicamente más cercanos son probablemente los más sensibles.

El “conocimiento” de las sensibilidades del sistema o Análisis de Sensibilidad, es importante para encontrar:

- Escenario de Generación más crítico: para llevar la red a puntos de operación críticos (en lenguaje común de los analistas estresar la red) se necesita saber la sensibilidad de algunas variables ante un cambio de generación.
- Escenario Topológico más crítico: sensibilidad de algunas variables del sistema ante la salida de ciertos elementos.
- Escenario de Demanda más crítico: sensibilidad de algunas variables ante una alta/baja demanda.
- Acciones de control: cambios en estados de elementos o variables que solucionen el problema.

El uso de metodologías con un gran componente heurístico en el análisis de sensibilidades, conlleva a dificultades, sobre todo cuando no se posee una amplia experiencia para formular escenarios críticos, cuando no se han efectuado variados casos de simulación que permitan encontrar rápidamente las acciones de control.

3.1.3 Casos posibles de localización del problema

Algunos ejemplos donde se detecta una alta necesidad del conocimiento heurístico de las sensibilidades son:

- En el análisis eléctrico del despacho, después de haber dado solución a las restricciones, la agilidad con la que se “arreglen los casos” (llevar las variables que se analizan a los límites permisibles de acuerdo con la norma, utilizando primero los elementos de compensación, después los movimientos de taps y por último las máquinas según sus características técnicas) depende en gran medida de que el analista tenga claridad de cuáles son los elementos que afectan o son sensibles a los cambios de la variable.
- En el análisis de consignaciones, para organizar el Tablero de Mantenimientos, se requiere encontrar los mantenimientos o simultaneidad de ellos que merecen un

análisis eléctrico detallado. Para esto el analista se hace un mapa mental y saber cuáles mantenimientos simultáneos tienen impacto eléctrico; y esto lo logra con el conocimiento heurístico que tiene de la sensibilidad ante una salida de un elemento, articula sus efectos, de manera que coincidan temporal y espacialmente (que estén cercanas topológicamente y que por esto la ejecución de un mantenimiento afecte el otro) y puedan llegar a afectar significativamente las variables.

- En el contexto de análisis eléctrico de planeación o de mantenimientos, cuando un analista requiere dar un corte necesita saber cuáles máquinas impactan más directamente la operación, en otros términos, esto significa conocer la sensibilidad del flujo de potencia por el elemento o conjunto de elementos que se conviertan en el cuello de botella para poder satisfacer la potencia solicitada en una barra específica.
- Para dar una generación de seguridad en número de máquinas por soporte de tensiones, se necesita encontrar cuáles máquinas impactan las tensiones en los nodos donde se presenta el problema. El analista logra hacerlo porque tiene un conocimiento heurístico de la sensibilidad de la tensión en un nodo ante un cambio en la generación de reactivos en una máquina, por ejemplo, de antemano sabe que la planta de Betania ejerce una influencia directa en la tensión de Jamondino.
- En la sala de control en todo momento se están ajustando los elementos de compensación que más afectan a las tensiones en los nodos que se desean controlar. Para saber si el movimiento del elemento de compensación y/o tap tendrá el efecto suficiente requerido sobre la tensión en la barra, no se corren flujos de carga, se hace por simple conocimiento heurístico de la sensibilidad de las tensiones en los nodos ante ciertos elementos de compensación y taps.

3.2 INFORMACIÓN QUE NO SE INTERCAMBIA DE UN ÁREA A OTRA

3.2.1 Descripción del Problema

Existen formas de entregar la información que no son las mejores para abstraer las ideas relevantes en análisis particulares de cada proceso. Las descripciones extensas, donde hay que realizar un esfuerzo para visualizar escenarios concretos, o las charlas informales, donde el rango de captación es restringido y el rango de interpretación muy amplio, pueden representar problemas cuando se trata de información que necesita delimitarse y puntualizarse.

La optimización del proceso de análisis eléctrico no solo significa que las metas se cumplan y no haya anomalías en la operación, es decir que haya eficacia, sino también que lo que se realice sea llevado a efecto de la mejor manera posible. Esto se debe a que aunque muchas veces estos problemas de flujo de información no desencadenen errores en el producto final, actúan en detrimento de la optimización del proceso.

3.2.2 Representación del Problema

Se encontró que tanto en el análisis eléctrico de Planeación como en el de Mantenimientos, en las recomendaciones eléctricas algunas veces no queda claro la forma como se describen los escenarios y requiere especificar claramente cuatro aspectos fundamentales:

- El rango de demanda con el que se activa la restricción y/o para la que es válida una recomendación (precisándola si es debido por áreas).
- El escenario de generación que activó la restricción o posibles escenarios que pueden activarla.
- La disponibilidad de activos de la que depende que se active o no la restricción y/o ser válida una recomendación.
- La contingencia o contingencias que provocan la restricción.

A esto se le suma la dependencia en algunas actividades de la información que se entrega oralmente de forma individual, que así sea la manera más rápida de hacer fluir la información, se generan vacíos cuando un grupo completo necesita conocerla, o cuando se requiere validar. Lo anterior desencadena obstáculos en la información que necesita tener en cuenta un analista para su estructuración y procesamiento.

3.2.3 Casos posibles de localización del problema

- En Planeación:

Los informes de las restricciones entregados por Planeación, se presentan en formatos diferentes que dependen del estilo y entendimiento de la persona que lo elabora. Un análisis para encontrar las máximas transferencias (cortes) y las generaciones de seguridad, empieza considerando tres escenarios de demanda para todo el sistema: alta, media y baja. En general, se plantean dos tipos de escenarios topológicos: red completa y con indisponibilidades típicas debidas a mantenimientos de muy alto impacto o alta probabilidad de voladura de torres. En cuanto a los escenarios de generación, se van formulando de tal manera que activen restricciones. Habitualmente, al presentar una restricción en un informe de Planeación, no se describe el escenario de generación que la activó; esto se hace en función de la importancia que le de el analista, por ejemplo, la activación del corte San Carlos-Virginia se presenta cuando suroccidente está altamente importador, EPM alto y Nordeste Marginando. Los analistas algunas veces tampoco mencionan la contingencia que activan la restricción.

En la forma descriptiva de presentar los escenarios en los informes de Planeación, no se presenta con claridad el rango de demanda para el que se activa una restricción ni las indisponibilidades con que se relaciona directa o indirectamente. Por ejemplo, el problema de congestión de la red en el centro del país se activa con indisponibilidad de cualquiera de E1, E2, E3... Elementos y se soluciona con

Generación de Seguridad en las plantas Termo Zipa I, II y/o III, para una demanda hasta de ciertos MW en esta área.

- En mantenimientos:

Se observó que en las Recomendaciones Eléctricas del análisis de mantenimientos (RecEles) no se le otorga mucha importancia a la descripción de la causa asociada a la restricción. Para un mantenimiento que produce una restricción eléctrica y/o una recomendación, se le asocia una causal que se describe en una sola palabra, por ejemplo “Estabilidad”, “STN” o simplemente “No identificada”. El análisis que lleva a cabo el analista de mantenimientos para encontrar el problema, sus causas y sus efectos se pierde (solo llega la medida de control que se recomienda tomar). El conocimiento de la causa que provocó la restricción (por ejemplo, de una contingencia que activa una sobrecarga), muy seguramente será útil al analista del despacho para encontrarla en su caso de análisis, y el efecto de dicha restricción será útil para medir su importancia.

- En la Sala de Control:

Las reuniones diarias en la Sala de Control con representantes de cada departamento, se realizan con el objetivo de retroalimentar principalmente al Despacho, los eventos de la operación que se dieron lugar las horas anteriores. Estas se presentan al estilo de un “noticiero informativo”. Usualmente el analista de Despacho que asiste a la reunión informa a su departamento las consideraciones “importantes” que se debe tener en cuenta para la programación diaria de la operación, como por ejemplo el disparo de algún elemento, el retraso de algún mantenimiento, la voladura de alguna torre, etc. Muchas veces, por cualquier motivo la persona que asiste a la reunión no está programando el despacho del día; si esta persona no consideró “importante” o “significativo” para la programación diaria nada de lo que allí se mencionó, entonces no comunica nada.

Con este método de comunicación podrían cuestionarse los siguientes aspectos.

- ✓ La efectividad que tiene que una persona vaya a decir a otras personas lo mismo que se escuchó en la reunión a otras personas. Si bien se puede implementar un método de comunicación más directo se puede correr el riesgo de provocar un “teléfono roto”.
- ✓ El tiempo y el interés de las personas para asistir a la reunión es normalmente muy bajo, además la forma en que se da la información se repite en los sistemas de información.

En términos generales, se podría concluir, por ende, que algunos mecanismos que perpetúan el problema de poca efectividad en el intercambio de información son:

- La no concertación de una forma estándar como se entrega una restricción en planeación, esto es, entregar informes ampliamente descriptivos.
- La arraigada costumbre de suponer, que hay información que es obvia o que no es necesaria sobre todo cuando se refiere a la causa o efecto de una restricción.
- El uso y costumbre de transmitir información oral y no cerciorarse de que sus destinatarios la han recibido y entendido cabalmente.
- La falta de tiempo del personal vinculado a la empresa para realizar procedimientos donde se analice y evalúe la información que se ha transmitido.

3.3 ANÁLISIS QUE SE REPITEN

3.3.1 Descripción del Problema

Dentro del ciclo cerrado de procesos, la operación del sistema se ha estado proyectando desde 5 años, 6 meses, 3 meses, una semana, un día y unas horas antes. Esto no significa que los análisis se deban repetir, ya que cada uno de ellos se realiza desde diferentes perspectivas. Sin embargo, la repetición de un análisis se presenta cuando existen los mismos escenarios con diferentes criterios y por lo tanto un producto diferente.

El problema consiste en que el departamento de despacho entrega a la operación un modelo que considera “ajustado”, pero que en el análisis eléctrico de la Sala de Control se “reajusta” a otro punto de operación. Dado que se lleva a otra solución del flujo de cargas se puede ver como una o la suma de las siguientes causas:

- No se ve una confianza por parte del operador de que la realidad funcione como el modelo ajustado entregado por el despacho.
- Existen diferentes lineamientos que deben ser unificados para concretar criterios comunes.
- Existe un problema cultural arraigado de costumbre, según el cual hay duda de que las cosas resulten justamente como se esperan, duda que se acompaña a su vez de un temor por explorar e indagar diferentes posibilidades.
- El modelo implementado en el DIgSILENT²² no siempre se ajusta a lo que acontece en la realidad.

Cuando se habla de lo que acontece “en la realidad” se hace referencia a lo que se observa con el modelo que se trabaja directamente en tiempo real, que en este caso, se trata del modelo con el que trabaja el SCADA, que no es exactamente igual al del DIgSILENT. Desde este punto de vista, no es tan fácil lograr que los analistas del despacho tengan la heurística operativa de los analistas de la sala de control, si no están en la operación o que, en su defecto, los operadores formalicen más su conocimiento acerca de las tensiones objetivo, ya que al ser un conocimiento con un gran componente heurístico no es preciso.

²² DIgSILENT: Es un programa para análisis de sistemas de potencia eléctricos con la finalidad de alcanzar los objetivos de la optimización en la operación y la planeación de las redes eléctricas con el manejo de miles de barras. Tiene como utilidades el análisis de: Flujos de Carga / Transmisión, Despacho de potencia Activa y Reactiva, Corto Circuito, Estabilidad, Transitorios Electromagnéticos, Protecciones, Protección de Distancia, Armónicos, Confiabilidad y posee un lenguaje de programación o DPL (DIgSILENT Programming Language)

Las consideraciones respecto a las tensiones objetivo y, por ende, al flujo de reactivos, se pueden ser consideradas también como un problema de seguridad vs. economía. Esto es, si existen dos formas que representan dos soluciones a un mismo problema, una es más segura que económica, y otra es más económica que segura; la solución implica, por ende, un compromiso del analista, quizás si se remunerara la generación de reactivos este problema resultaría más evidente.

3.3.2 Representación del Problema

Los continuos redespachos sin cambios de topología del sistema, evidencian desacuerdos entre la programación diaria y la operación, esto causa repetición del trabajo por parte del equipo del despacho.

En teoría, el “modelo ajustado” que entrega el departamento de despacho debería aplicarse tal cual a la operación y funcionar en la realidad, sin tener que reajustarse a nuevos lineamientos con los que se produzca una solución diferente al flujo de cargas. No obstante, diariamente se están reajustando los casos entregados por el despacho por cualquiera de las siguientes causas:

- A veces “parecen” no cumplirse con rigor los lineamientos del código de operación de utilizar primero (y al máximo) todos los recursos de compensación disponibles, segundo los taps y tercero las máquinas, esto es, dejar reserva de reactivos en los elementos más rápidos (Ver Anexo 2). Esto significaría que en el despacho podrían no estar dejando lo suficientemente holgada la reserva.
- A veces “parece” que no se tuviera en cuenta que hay subestaciones diseñadas para 230 kV y subestaciones diseñadas para 220 kV, para los cuales el límite permisible del 10% por encima la tensión de diseño, da un valor diferente.
- Algunas tensiones que se recomiendan en la programación no son factibles en la operación integrada (p. ej., Recomendación: Voltaje mínimo en Fundación de 237 kV, en la realidad si se pone el voltaje mayor a 234 kV, el OR llama al centro de control a pedir que se baje la tensión porque está muy alta en 115 kV y se le pueden dañar los equipos).

- Las diferencias en las tensiones objetivo, y por lo tanto en la cantidad de reactivos que fluyen por los elementos del sistema, ocasionan movimientos de taps, compensación y potencia reactiva entregada por algunas máquinas, que difieren del “modelo ajustado” entregado por el departamento de despacho.
- El uso de modelos diferentes (DRP por áreas y DRP con red) entre el despacho y el redespacho, ocasionado por limitaciones tecnológicas en el tiempo de compilación de la optimización, produce cambios en la programación que afectan a todos los períodos, y que por lo tanto desajustan el “modelo ajustado” entregado por el despacho, ya que aunque el redespacho se haya ocasionado por un cambio en solo unos períodos, la optimización los afecta a todos.

Estos aspectos, aunque pueden parecer mínimos, ocasionan diferencias principalmente en el valor programado en generaciones de seguridad; diferencias que muchas veces modifican la programación del despacho.

3.3.3 Casos posibles de localización del problema

Uno de los puntos del proceso de análisis eléctrico donde está localizado el problema de los análisis que se repiten, es cuando en el despacho se deben hacer ajustes para prevenir la activación de restricciones; esto se hace de tal forma que las tensiones queden dentro de los límites permitidos por la norma. En el redespacho, cuando llega este modelo ajustado a unos valores, igualmente se considera que las tensiones queden dentro de los límites permitidos, pero se añade un componente de heurística operativa (o en el lenguaje informal de los analistas llamado “feeling operativo”), que hace modificar los voltajes en ciertos nodos a unas “tensiones objetivo” que se predicen por un analista del tiempo real, pero difícilmente por un analista del despacho.

Una tensión objetivo no necesariamente es una consigna operativa, ya que depende del escenario que visualice el operador, por ejemplo, en una condición de muy alta demanda en Bogotá, en un día ordinario, el operador considera que la tensión en Chivor debe estar

por encima de 242 kV, mientras un analista eléctrico del despacho puede no estar de acuerdo.

Para saber “predecir” una tensión objetivo se debe tener un conocimiento heurístico de la operación, que se representa en los siguientes aspectos:

- Un alto grado de conocimiento de la sensibilidad que existe en la realidad de las tensiones en ciertos nodos sobre otros en el sistema.
- Un conocimiento de la posición adecuada en los taps (sensibilidad) con los que se logrará las tensiones objetivo.
- Un conocimiento del punto indicado de la compensación (sensibilidad) para obtener la cantidad necesaria de reactivos para poder controlar las tensiones.
- Un conocimiento de la factibilidad de las tensiones en los nodos, que depende por ejemplo de la carga que esté conectada a la barra o de las protecciones.

Por otra parte, se es un hecho que en el proceso de despacho-redespacho no se cuenta con mucho tiempo para hacer retroalimentaciones detalladas de lo que ocurre al hacer los “reajustes”. En general, cuando las diferencias ocasionan resultados apreciables en la generación de seguridad, los encargados de la operación informan al personal de despacho oralmente lo que ocasionó dicha diferencia para que las próximas ocasiones éstas sean tenidas en cuenta si es posible y si se considera debido. Sin embargo se observa la ausencia de un control de cambios, que compare lo que se programa en el despacho y lo que se tiene que “reajustar” en la operación para poder atribuir con certeza el grado de participación de las causas antes mencionadas y que permita, por tanto, corregir en el detalle del día a día lo que marcan las diferencias.

3.4 PÉRDIDA DEL PASADO

3.4.1 Descripción del Problema

El gran dinamismo del sistema eléctrico de potencia es un factor que añade un alto grado de dificultad a la estructuración del conocimiento acerca del análisis eléctrico, de tal manera que se pueda adaptar y ser aplicable a nuevos análisis. Tal dinamismo se considera un problema ya que este conocimiento heurístico almacenado en la memoria de los analistas se va perdiendo en la medida en que no lo recuerden o no trabajen ya en la empresa.

3.4.2 Representación del Problema

La carencia de un sistema estructurado que recopile experiencias del pasado evita que esos casos puedan servir como apoyo al proceso de análisis eléctrico desde cualquier perspectiva (planeación, programación y operación). Es necesario documentar estructuradamente acciones y estudios como:

- Estabilidad de ángulo, tensión, frecuencia y/o otros efectos que comprometen algunos mantenimientos.
- Probabilidad de eventos.
- Alerta y prevención de maniobras de alto riesgo.
- Recomendaciones eléctricas de problemas repetitivos y/o aplicables a nuevos problemas.
- Conocimiento inmediato de las consignas operativas.
- Probabilidades históricas de falla de los elementos
- Conocimiento de información referida a limitaciones de los elementos o que pueden ocasionar restricciones del sistema eléctrico.

3.4.3 Casos posibles de localización del problema

El conocimiento asociado a situaciones ocurridas puede servir ampliamente para mejorar la respuesta a nuevas situaciones sobre todo en:

- El análisis eléctrico de corto plazo, donde para empezar a analizar el impacto eléctrico que tiene un mantenimiento, es de gran utilidad tener una noción de los efectos que ha causado o podría causar la salida de los elementos en consignación, para detectar y atacar el problema. Aunque se debe tener claro que los efectos de mantenimientos pasados van a ser iguales a los nuevos ya que el sistema está cambiando constantemente, si pueden dar al analista una perspectiva más clara del problema actuado.
- La Sala de control, ya que del éxito de las maniobras que significan un riesgo en la operación (p. ej., cambios de barra, salida y/o entrada de elementos), depende la salida de más de un elemento del sistema con impacto eléctrico significativo en tensión, frecuencia, ángulo y/o cargabilidad de los equipos, y solo se encuentran almacenadas en las memorias de los analistas que las vivieron y en largos informes con textos de difícil búsqueda.
- Toda la operación, ya que los resultados de los análisis que se han establecido como consignas operativas y se almacenan en textos de difícil búsqueda, resultan no ser muy prácticos y, por ende, no muy usados en la cotidianidad²³.
- El análisis eléctrico del despacho y el redespacho, ya que existen limitaciones de los elementos del sistema eléctrico que no están estructuradas en un solo sistema de información, y puesto que lo ideal sería que fuera automático. Algunas de estas limitaciones son:

²³ En el CTE de oriente de ISA, se ha mejorado esa documentación mediante el apoyo de la Universidad Industrial de Santander a través de proyectos de grado y trabajos de asesoría, documentando las consignas operativas estableciendo las consignas bajo ellas para todas sus subestaciones.

- Inflexibilidades de las máquinas: tiempos y costos grandes de arranque y/o parada, mínimos técnicos, zonas prohibidas de generación, tiempos mínimos fuera de línea, tiempos de carga estable.
- Cargabilidad máxima de las líneas y transformadores.
- Elementos normalmente abiertos y/o cerrados.
- Indisponibilidad permanente de equipos.
- Máquinas que se pueden disponer para soportar reactivos.
- Máquinas que se pueden disponer como referencia.
- “Pesos” de las máquinas²⁴
- Cadenas hidráulicas y sus factores de distribución.
- Líneas que comparten torre.
- Tipos de carga (industriales, residenciales).
- Limitaciones ocasionadas por condiciones del mercado (por ejemplo, no es factible encender una planta a gas cuando existe un riesgo inminente de racionamiento de gas)
- Limitaciones por nivel de los embalses.

3.5 TAREAS MANUALES E INEFICIENTES

3.5.1 Descripción del Problema

La eficiencia y mejora continua de los procesos es un factor clave en los índices de productividad de la empresa. Las prácticas que aumentan el riesgo de cometer errores y hacen más largo el desarrollo de una tarea desoptimizan el proceso, así como la ejecución

²⁴ Los pesos es un número utilizado básicamente en el despacho que da una medida de la inercia de la máquina. Es empleado para destinar unas unidades mínimas por áreas para subir las tensiones en los nodos principales (“levantar la carpa”, en el lenguaje informal de los analistas). Por ejemplo, en la costa se necesita un peso mínimo de 4 en demanda alta, que puede lograrse con cuatro unidades de Tebsa (peso de 1 c/u) o con 2 Barranquillas, 2 Cartagenas, 2 Proeléctricas (peso de 0.5 c/u) y una Tebsa

manual de labores que con la tecnología actual pueden ser llevadas a efecto de manera automática. Se encontraron las siguientes ausencias:

- Falta de evaluación continua del desarrollo de las tareas.
- Falta de promoción del uso de DPLs y macros existentes.
- Falta de tiempo de los analistas para dedicar al desarrollo e implementación de métodos más automáticos en la resolución de tareas.

3.5.2 Representación del Problema

El desempeño y tiempo de ejecución de algunas tareas pueden ser significativamente mejorados reevaluando la manera en que estos son desarrollados, al igual que el uso o la implementación de herramientas y tecnologías.

3.5.3 Casos posibles de localización del problema

- En la sala de control y en análisis eléctrico de mantenimientos, para incluir los cambios topológicos de las 24 horas (períodos) del día, no se utiliza una macro sino que esta labor es realizada a mano modificando el DOLE²⁵ o directamente en el DIGSILENT, lo cual, además de tardarse más tiempo, aumenta la probabilidad de cometer errores.
- En la sala de control la desagregación de las cadenas de generación²⁶ se hace manualmente, ya que esta opción en el Gerenciador²⁷ se encuentra deshabilitada.

²⁵ DOLE: (DIGSILENT Object Level Exchange) : Es un conjunto de instrucciones que permite insertar información en DIGSILENT, crear y modificar objetos en la base de datos y manipular de objetos gráficos. Un archivo DOLE es un archivo de texto ASCII, con extensión .dle y puede ser modificado con un procesador de texto como la aplicación Notepad de Windows.

²⁶ Desagregación de las cadenas de generación: Procedimiento que tiene como objetivo ajustar el despacho de los recursos definidos como cadenas especiales.

²⁷ Gerenciador: Sistema que administra todas las aplicaciones y macros utilizadas en la Dirección Despacho de Energía del CND, para efectuar Análisis eléctrico del Despacho. Tiene integradas utilidades que

- En mantenimientos para cargar la Demanda por barras no se utiliza ninguna macro sino que se hace directamente desde el DIGSILENT.
- Para hallar las coincidencias temporales de las consignaciones se contrasta visualmente para detectar los cruces en el tiempo. Realizar esta tarea manualmente se corre el riesgo de no considerar algunos cruces, y supone además una pérdida considerable de tiempo.
- El SINAUT (Ver anexo 3) genera un formato del preinforme del Análisis Eléctrico de los Eventos pero su contenido no está asociado con el evento, y la realización de los informes es muy frecuente y quita mucho tiempo. La generación automática de estos informes podría hacerse si un sistema detectara el evento y la causa.
- El uso continuo e insistente del teléfono tanto en la sala de control como en el departamento de despacho, representan un gran factor de ruido y desconcentración para los analistas; su metodología de revisión debe ser reevaluada, de manera que sea más organizada y desde luego mucho menos dispendiosa.

Algunos DPLs no son conocidos y/o usados por todos los analistas.

3.6 SUBUTILIZACIÓN DE LOS RECURSOS TECNOLÓGICOS

3.6.1 Descripción del Problema

La falencia en el uso de todas las funcionalidades de las herramientas que se poseen aumenta el uso del conocimiento heurístico para la toma de decisiones, y constituye productos ociosos, que en términos monetarios representan inversiones con retorno nulo.

facilitan el procesamiento de la información de entrada y salida de programas de Análisis Eléctrico como el Power Factory y el ESTYRA.

3.6.2 Representación del Problema

La subutilización de los recursos tecnológicos en todas las dependencias, la costumbre de hacer las cosas de una determinada manera, así como la falta de estudio de los manuales impiden la utilización plena de los recursos.

3.6.3 Casos posibles de localización del problema

- Este problema se observa en la operación ya que no se utiliza todo el paquete del Network Analysis (Ver Anexo 3)
- En todas las dependencias, y en especial en el departamento de despacho, aplicaciones del DIgSILENT que pueden llegar a ser muy útiles como el OPF no son utilizadas.
- En casi todas las dependencias, el Enlace Eléctrico PF²⁸ y el ESTYRA²⁹ no lo usan todos los analistas.

²⁸ El enlace Eléctrico PF es la herramienta utilizada para generar los archivos DOLE (*.dle) necesarios para introducir las condiciones esperadas de operación en el DIgSILENT Power Factory.

²⁹ ESTYRA: Es un software que efectúa una estimativa de la seguridad del sistema ante la ocurrencia de contingencias en todos y cada uno de los elementos del STN.

Capítulo IV

4. PROPUESTA PARA UN SISTEMA INTELIGENTE DE ANÁLISIS ELÉCTRICO

4.1 DELIMITACIÓN Y REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA

Después de haber explorado algunos aspectos en el diagnóstico, es claro que no se tiene un solo problema a resolver, sino un conjunto de ellos. Por lo tanto, se plantea la situación problemática como:

“Administrador inteligente integrado del análisis eléctrico de un sistema eléctrico de potencia”

En general, los requerimientos de este administrador deben ser:

- Tener la capacidad de retroalimentar estudios hechos con anterioridad y problemas o situaciones que se hayan presentado en el pasado y que sean válidos para un análisis eléctrico actual.
- Tener la capacidad de ser una guía para el análisis eléctrico en cualquier tipo de escenario (planeación, programación y operación).
- Contar con un modelo que sea capaz de adaptarse al dinamismo de cualquier tipo de sistema eléctrico de potencia real.

A partir de estos requerimientos, y del diagnóstico, se definirán y caracterizarán los problemas que ha de resolver este administrador inteligente.

4.2 MÓDULO I: SISTEMA EXPERTO GUÍA DEL ANÁLISIS ELÉCTRICO

4.2.1 Delimitación

“Determinar a partir de los resultados de un flujo de cargas en un análisis eléctrico, cuándo es necesario tomar una medida de control y sugerir una solución posible”

El problema apunta al segundo requerimiento general del administrador inteligente integrado del análisis eléctrico, de ser una guía con la cual se puedan identificar en un Sistema de Potencia sus restricciones y respectivas soluciones. Esto se debe inferir a partir de la información que se pueda obtener del flujo de cargas y de las condiciones de la red, y con base en el conocimiento que utilizan diariamente los expertos para realizar sus estudios y observaciones. Para hacer más sencillo el tratamiento de este problema, se enfocará solo hacia el desarrollo del análisis de mantenimientos, pero se puede extender a todos los departamentos.

4.2.2 Requerimientos básicos

Las técnicas que se utilicen para resolver el problema deben:

- Estar basadas en parámetros medibles de los estados de los elementos, de la información que se obtiene del flujo de cargas o de otros análisis conocidos.
- Ser capaz de describir los procesos de análisis eléctrico.
- Tener en cuenta todos los tipos de elementos que caracterizan el modelo de red colombiano.

4.2.3 Hipótesis

A partir de los resultados de simulación y la experiencia en análisis y operación del sistema, pueden modelarse estados y reglas finitos e invariantes en el tiempo, que se adapten a la variabilidad del sistema eléctrico de potencia.

4.2.4 Caracterización del Conocimiento

Los analistas desarrollan unos procedimientos básicos que fueron descritos en el capítulo II, a partir de esta descripción se logra visualizar que es posible representar el conocimiento a partir de unas reglas y hechos, que pueden ser escritas en lenguaje natural.

Cuando se habló de la obtención de una generación de seguridad, como medida de control para una limitación del sistema del sistema eléctrico, se dijo que en principio era necesario saber cómo deben formularse los escenarios críticos. Dichos escenarios se formulan a partir de unos criterios que “conoce” el analista.

Para determinar en qué momento un determinado problema de la red se solucionará con esta medida de control y para encontrar las unidades de generación que lo resolverán, el analista aplica una lógica de reglas que son activadas por hechos que determinan los estados de los elementos. La figura 29 hace referencia a este proceso.

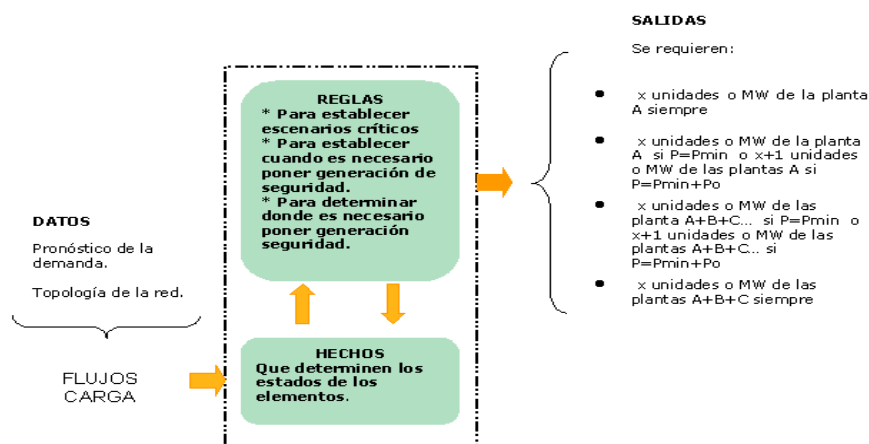


Figura 29 Esquema de obtención de Generación de Seguridad

Igualmente, cuando se habló de un corte, como medida de control para una limitación del sistema del sistema eléctrico, también se mencionó la necesidad de una formulación previa de escenarios críticos y de un conocimiento necesario para encontrar el cuello de botella o ubicación del corte. La figura 30, refleja que el conocimiento necesario para ejecutar este proceso puede ser organizado a partir de reglas que son activadas por hechos.

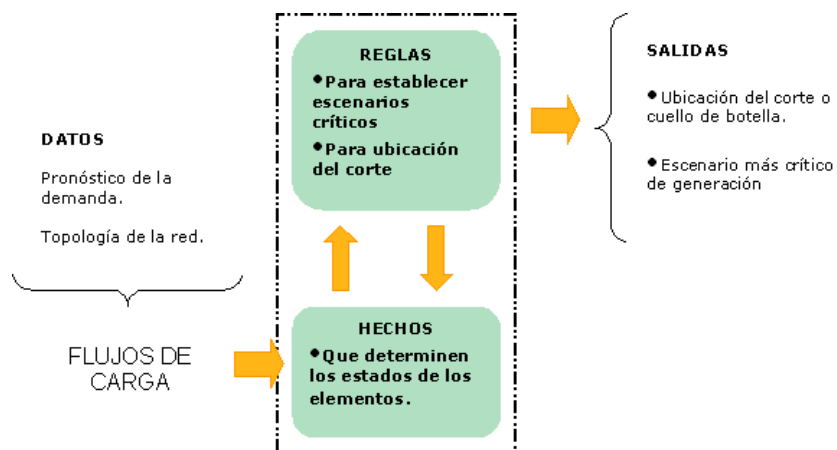


Figura 30 Esquema de obtención de Corte

Otra medida de control muy usada por los analistas de la Sala de Control, Despacho y Mantenimientos son las Tensiones Objetivo en ciertas barras. Se mencionó que es necesario "saber" cuándo un problema de caída de tensión puede y debe ser solucionado con una Tensión objetivo, y también cuáles barras principales son las que ejercen más efecto sobre las demás, es decir, representan un nodo piloto. La figura 31, sugiere la representación de este conocimiento también con base en reglas y hechos.

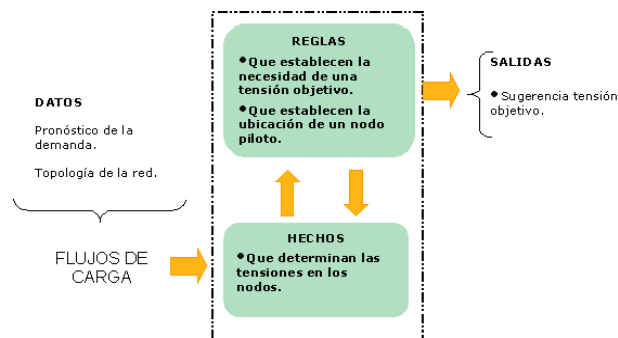


Figura 31 Esquema de obtención de tensión objetivo

Cuando las medidas de control citadas, y otras más que no se mencionan, no son suficientes para garantizar la calidad, seguridad y confiabilidad del suministro eléctrico, es necesario, según se expuso en el capítulo II, enviar señales de Expansión al departamento de Planeación. Estas señales son presentadas como insuficiencias del sistema, que van siendo detectadas en el caso de que no puedan ser solucionados los problemas y sea necesario exponer al sistema a medidas extremas como interrupciones del suministro. El analista de cualquier dependencia debe tener el conocimiento necesario para determinar dichas insuficiencias, el analista de planeación debe tener el conocimiento de las expansiones posibles que se puedan llegar a implementar, y así mismo, poder sugerir la ubicación del nuevo elemento o la nueva configuración. Este conocimiento también se estructura en reglas y hechos en la figura 32.

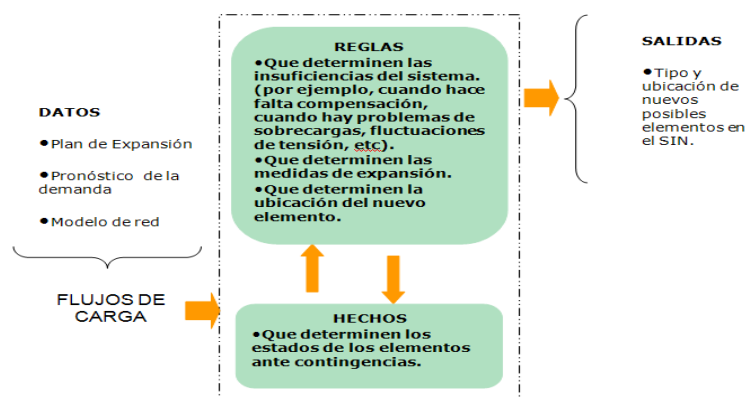


Figura 32 Esquema de obtención de señales de expansión

Presentado lo anterior, se pretende que en este módulo, el sistema sugiera Generaciones de Seguridad, Cortes, Tensiones Objetivo y Señales de Expansión ante una determinada insuficiencia del sistema eléctrico. El modelo se desarrollará de acuerdo a las pautas de solución de un “juego de ajedrez” [10], según se mencionaron en el Capítulo 1 en el Marco Conceptual.

A partir de la caracterización del conocimiento se pueden observar tres aspectos importantes:

- El problema se puede resolver a partir de un modelo basado en reglas y hechos, en lenguaje natural de los expertos, que hacen activar estados hasta llegar a una solución.
- Las reglas a formular pueden ser condicionales del tipo “Si... (sentencia)... Entonces... (sentencia)”.
- En general, la solución del problema puede llegar a ser adaptable a cualquier perspectiva de análisis eléctrico.

Las sentencias se basarán en parámetros medibles, o calculables según los datos de entrada o a partir de un flujo de cargas. El modelo de red consta de elementos básicos como líneas, transformadores, elementos de compensación y unidades de generación o máquinas.

4.2.5 Especificación de la posición inicial

Para el análisis eléctrico de mantenimientos, conocer la posición inicial realizando la analogía de la posición inicial en un tablero de ajedrez, implica seleccionar cuáles mantenimientos requieren análisis eléctrico. Dado que en la práctica, la cantidad de elementos que entran consignación puede ser inmenso, y muchos de estos pueden no tener efectos significativos en el sistema, entonces sólo se consideran los casos en que

podría haber un *impacto eléctrico significativo*³⁰ y por lo tanto merecer análisis eléctrico detallado. Por ende, se tiene una primera regla.

- *Si la salida de un elemento E puede tener impacto eléctrico significativo entonces merece análisis eléctrico.*

Lo anterior implica que se deben encontrar los escenarios topológicos críticos de la red, es decir, se supone que en condiciones normales (disponibilidad de todos los elementos) no se presenta ninguna restricción, entonces, se deben determinar el conjunto de elementos en consignación que pondría en riesgo al sistema, y en qué período³¹ podría ocurrir.

En otras palabras, los escenarios topológicos críticos en el análisis eléctrico para mantenimientos representan las condiciones de la red para las cuales se pueden presentar restricciones eléctricas y operativas, y se deben analizar cuidadosamente para validar la viabilidad de que un elemento entre en consignación. Asimismo, el escenario de demanda crítico corresponde a encontrar el período de demanda en el cual la salida de elementos en consignación ocasiona las restricciones más severas. Esto implica que no solo se debe observar el efecto que causa la indisponibilidad del elemento, sino también su efecto en conjunto con otros al evaluar las contingencias.

Algunas de las reglas que utilizan los analistas eléctricos, se pueden formalizar así:

- *Si el elemento E es una línea que interconecta dos áreas operativas entonces el mantenimiento de E puede tener un impacto eléctrico significativo.*

³⁰ Impacto Eléctrico significativo: Que puede ocasionar una restricción eléctrica u operativa.

³¹ Período: En el Sistema Eléctrico Colombiano se analizan diariamente 24 períodos de una hora.

- *Si los elementos E1 y E2 están en la misma área operativa y entran en consignación el mismo período **entonces** los mantenimientos simultáneos de E2 y E3 pueden tener un impacto eléctrico significativo.*

Se observa, entonces, que cada elemento (línea, barra, transformador y/o elemento de compensación) se debe asociar a un área operativa o como línea que interconecta dos áreas. Otro tipo de reglas puede formularse con base en las sensibilidades del sistema eléctrico de potencia, de las cuales los analistas eléctricos hacen uso “empírico” pero que se pueden formalizar a partir de su cálculo, como las siguientes:

- *Si el flujo de potencia en elemento E1 es altamente sensible a la salida de elemento E2 **entonces** el mantenimiento de E1 o E2 puede tener impacto eléctrico significativo*
- *Si el flujo de potencia en elemento E1 es altamente sensible a la salida de elemento E2 y **si** el flujo de potencia en elemento E1 es altamente sensible a la salida de elemento E3 **entonces** los mantenimientos simultáneos de E2 y E3 puede tener impacto eléctrico significativo sobre el flujo de potencia en el elemento E1.*

La sensibilidad del flujo de la línea ℓ entre nudos j y k respecto al aumento de generación en el nudo i se define como [14]:

$$a_{\ell i} = \frac{\Delta F_{\ell}}{\Delta P_i} = \frac{1}{x_{\ell}} \left(\frac{\Delta \theta_j}{\Delta P_i} - \frac{\Delta \theta_k}{\Delta P_i} \right) = \frac{1}{x_{\ell}} (Z_{ji} - Z_{ki}) \quad (1)$$

La sensibilidad del flujo de la rama ℓ entre nudos i y j con respecto al flujo que circula por la rama ℓ^* entre nudos n y m viene definido por:

$$d_{\ell \ell^*} = \frac{\Delta F_{\ell}}{F_{\ell^* 0}} = \frac{\frac{x_{\ell^*}}{x_{\ell}} (Z_{in} - Z_{jn} - Z_{im} + Z_{jm})}{x_{\ell^*} - (Z_{nm} - Z_{mm} - 2 \cdot Z_{nm})} \quad (2)$$

$a_{\ell i}$: sensibilidad del flujo de la rama ℓ respecto al aumento de generación en el nudo i

ΔP_i : Aumento de generación en el nudo i

x_ℓ : Reactancia de la rama ℓ

$\Delta \theta_i$: Aumento de ángulo de la tensión del nudo i

Z_{ij} : Término ij de la inversa de la matriz de admitancias nodales de la red

$d_{\ell \ell^*}$: Sensibilidad del flujo de la rama ℓ con respecto del flujo de la rama ℓ^*

$P_{\ell 0}$: Flujo de potencia inicial de la rama ℓ^*

Deberán entonces definirse unos valores de $a_{\ell i}$, $d_{\ell \ell^*}$ que se consideren altos o bajos, para la aplicación de la siguiente regla:

- *Si la tensión en la barra E es altamente sensible a la salida del elemento E entonces merece análisis eléctrico.*

La manera en que varía la potencia de salida de los generadores ante cambios en el ángulo de sus rotores es un factor fundamental en el problema de la pérdida de sincronismo. En estado "estable" existe un equilibrio entre el par mecánico y el electromagnético de cada generador y su velocidad permanece constante. Al ocurrir un disturbio, el equilibrio se pierde y se presentan aceleraciones y desaceleraciones de los rotores de los generadores. Si un generador gira más rápido que otro, la posición angular relativa de éste con respecto al "lento" se incrementará. Ésta diferencia angular provoca que parte de la carga del generador "lento" sea transferida al más rápido conforme a su relación "potencia-ángulo" (que se puede ver como una relación individual Generador 1-barra infinita y Generador 1-barra infinita. Una característica de este tipo se puede ver en la figura 33).

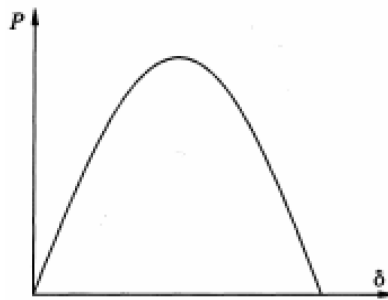


Figura 33 Relación Potencia - ángulo

Esta transferencia de carga tiende a “frenar” al generador rápido reduciendo la diferencia de velocidades entre ambos, y por consiguiente, la correspondiente diferencia angular. La relación “potencia-ángulo”, que se muestra en la figura, indica que después de cierto límite, un incremento de la diferencia angular provocará una reducción en la potencia de salida, lo que a su vez causará que la diferencia angular continúe incrementándose, por tanto a una condición de inestabilidad.

La pérdida de sincronismo se puede presentar entre una máquina y el resto del sistema, o entre grupos de máquinas, manteniéndose en sincronismo cada uno de los grupos una vez que estos se hayan separado. Dicho esto, la pérdida de sincronismo se puede medir con el desfase de dichos ángulos del flujo de cargas, entonces:

- *Si la falla de un elemento E puede producir pérdida de sincronismo **entonces** tiene impacto eléctrico significativo.*

Después de obtenerse los mantenimientos que tienen impacto eléctrico significativo, y que por tanto merecen análisis eléctrico, debe saberse en cuál período es más crítica la consignación.

- *Si la consignación está programada en varios períodos y hay riesgo de sobrecarga **entonces** se debe analizar a la hora de más alta demanda a la que esté programado.*

- *Si la consignación está programado en varios períodos y hay riesgo de tensiones altas entonces se debe analizar a la hora de más baja demanda a la que esté programado.*

Este conjunto de reglas que define la posición inicial, debe entonces contener como entrada, todos los elementos que entran en consignación y, como salida, aquellos que merecen análisis eléctrico; igualmente, el período en deben efectuarse hacerse dichos análisis.

4.2.6 Definición de los movimientos legales

Una vez que se tengan definidos los mantenimientos y los períodos en los que se realiza análisis eléctrico, teniendo en cuenta que se está en una etapa de planeación a corto plazo, se suponen los escenarios de generación más críticos para el sistema, de manera que éste sea sometido a condiciones críticas, y se evidencien, con las contingencias, sus consiguientes restricciones.

Los siguientes son algunos ejemplos de las reglas que pueden formularse para someter la red a condiciones críticas:

Si E1 y E2 están en paralelo y E1 o E2 sale en consignación entonces hay riesgo de disparo de uno o varios elementos.

Si hay riesgos de disparo entonces leer cargabilidad de los elementos.

Si cargabilidad en elemento "E" es sensible a generación en "G1" entonces aumentar MWs en G.

Si cargabilidad en elemento "E" no es sensible a generación en "G2" entonces disminuir MWs en G.

Si cargabilidad es igual a cargabilidad máxima entonces la red ya está en condiciones críticas con respecto a ese punto.

*Si E1 es un elemento que interconecta dos áreas y sale en consignación **entonces** hay riesgo de inestabilidad en tensiones o tensiones por fuera de los límites permisibles.*

*Si hay riesgo de inestabilidad en tensiones o tensiones por fuera de los límites **entonces** leer tensiones en barras.*

*Si tensiones por fuera de límites en un área operativa **entonces** disminuir o aumentar el número de unidades en el área operativa hasta el mínimo, esto es, hasta que se garanticen buenos niveles de tensión en la red.*

*Si E1 es una línea larga y sale en consignación **entonces** puede haber riesgo de inestabilidad de ángulo.*

*Si hay riesgo de inestabilidad de ángulo **entonces** leer ángulos de las máquinas en varios puntos de la red.*

*Si tiempo crítico de despeje de la falla³² en el elemento "E" es sensible a generación en "G1" **entonces** disminuir MWs en G1.*

*Si tiempo crítico de despeje de la falla en el elemento "E" no es sensible a generación en "G2" **entonces** aumentar MWs en G2.*

*Si tiempo crítico de despeje de la falla es menor de 1s **entonces** la red ya está en condiciones críticas con respecto a ese punto.*

Cuando sale una línea de transmisión del sistema, todas las potencias activas de los elementos del sistema se afectan. Por otro lado, existen zonas que se ven más influenciadas que otras cuando se retira un elemento del sistema, y el efecto principal afecta a los elementos vecinos del elemento que salió de servicio. En la literatura especializada existen metodologías que ilustran la manera en que la salida de un elemento afecta a los elementos vecinos, pudiéndose hacer un equivalente del sistema de

³² Tiempo crítico de despeje de falla: Es la duración máxima permisible de una falla para que haya estabilidad.

la zona influenciada. Además, sobre la zona influenciada se aplican los índices de evaluación de contingencias para observar los casos más críticos. En consecuencia, por lo general sólo se analizan las contingencias sobre la zona de influencia. Estas metodologías son computacionalmente más rápidas.

Los analistas eléctricos, a partir de su conocimiento de la red, realizan una evaluación de las contingencias que consideran más críticas. Sin embargo, una metodología más formal consiste en elaborar un listado de contingencias organizado de acuerdo con su índice de severidad. Los principales índices de funcionamiento utilizados para cuantificar la severidad de las violaciones de los límites operativos ante la salida de los elementos de un sistema eléctrico de potencia, son: índice de tensión e índice de potencia activa. Estos índices tienen valores pequeños cuando estas variables están dentro de los límites operativos de los componentes del sistema, y tienen valores grandes cuando están fuera de los límites operativos. Estos índices dan una medida de la severidad relativa de las contingencias. Se puede crear un listado de contingencias de acuerdo a la severidad.

El índice de funcionamiento utilizado para cuantificar la magnitud de las sobrecargas en las líneas de transmisión y en los transformadores, puede definirse en función de sus flujos de potencia activa como [4]:

$$IP_{MW} = \sum_{l=1}^{NL} \frac{W_l}{2n} \left(\frac{P_l}{P_l^{\text{lim}}} \right)^{2n}$$

P_l = Flujo de potencia activa de la línea o transformador.

P_l^{lim} = Capacidad de la línea o transformador.

NL = Número de líneas o transformadores del sistema.

n = Exponente de la función de evaluación ($n \geq 1$) y entero.

W_l = Coeficiente de ponderación para las líneas o transformadores (número real no negativo).

Estos índices IP_{MW} toman valores pequeños cuando todos los flujos en las líneas o transformadores están dentro de sus límites operativos y toman valores altos cuando

existen líneas o transformadores sobrecargados en un sistema de potencia. El factor de ponderación W_i sirve para reflejar la importancia de la línea de transmisión o del transformador. Se le pueden asignar valores asociados, por ejemplo, al nivel de voltaje que maneje tal elemento, empezando con los elementos que tengan niveles de voltajes de mayor magnitud hasta los elementos de menor magnitud. Aunque en muchos casos de estudio se pueden manejar valores de W_i iguales a uno para todas las líneas o transformadores, indicando así que todas las líneas o transformadores del sistema eléctrico tienen el mismo peso o ponderación. También el exponente de la función de evaluación (n), se utiliza para amplificar los valores críticos y así tratar de reducir los errores de mal ordenamiento en la lista de contingencias. Experimentalmente se ha observado que valores altos del exponente de la función de evaluación disminuyen los efectos de mal ordenamiento.

Si las medidas de control no son suficientes para solucionar los problemas, con base en datos estadísticos de la operación del sistema eléctrico, se pueden formular reglas que indiquen al analista de planeación el momento en que se debe darse una señal de expansión, estas reglas pueden ser:

- *Si sobrecarga en elemento es frecuente **entonces** se necesita dar señales.*
- *Si restricción ocasiona generaciones de seguridad frecuentes **entonces** se necesita dar señales.*
- *Si altas y/o bajas tensiones es frecuente **entonces** se necesita dar señales por tensiones.*
- *Si problemas de inestabilidad son frecuentes **entonces** se necesita dar señales.*
- *Si la salida de un elemento E ocasiona demandas no atendidas **entonces** se necesita dar señales.*

4.2.7 Posiciones que representan una victoria.

Continuando con la analogía del juego de ajedrez, la victoria para un analista eléctrico sería haber encontrado satisfactoriamente un corte, una generación de seguridad, una tensión objetivo, o en últimas, una sugerencia de expansión.

Después de haber elaborado el listado de contingencias, ordenadas por índice de severidad, el analista debe proceder a hacer una revisión de los límites violados en las contingencias más críticas. Para una generación de seguridad y/o corte, algunas de las reglas del tablero que representan victoria serían:

- *Si la tensión en una barra es $< 0.9 \cdot V_n$ y están agotados todos los elementos de compensación **entonces** poner generación de seguridad en número de unidades.*

- *Si hay un punto crítico **entonces** hay un cuello de botella.*
- *Si cargabilidad es \geq cargabilidad máxima y existe un cuello de botella **entonces** hallar un corte.*
- *Si cargabilidad es \geq cargabilidad máxima y no existe un cuello de botella **entonces** se necesita una generación de seguridad en MW.*

- *Si hay un problema de inestabilidad y existe un cuello de botella **entonces** hallar un corte.*
- *Si hay un problema de inestabilidad y no existe un cuello de botella **entonces** dar generación de seguridad en MW.*

Para una tensión objetivo, la victoria sería:

- *Si tensiones por fuera de los límites **entonces** dar tensión objetivo en nodo piloto.*

4.2.8 Explicitar objetivo implícito de no sólo realizar movimientos legales sino también los más óptimos

- *Si se necesita una generación de seguridad entonces darla con máquinas altamente sensibles.*
- *Si se encuentra un corte para un período de demanda pico entonces revisar si es válido en los períodos de menor demanda.*
- *Si se necesita tensión objetivo para una carga radial entonces nodo piloto es el primero de la rama.*

4.3 MÓDULO II: SISTEMA CON RAZONAMIENTO BASADO EN CASOS HISTÓRICOS DEL ANÁLISIS ELÉCTRICO

4.3.1 Delimitación

“Realizar un análisis eléctrico del presente a partir de análisis eléctricos históricos similares”

El problema consiste en definir un modelo que tome el conocimiento, que se adapte a los cambios topológicos de un Sistema Eléctrico de Potencia y que aplique dicho conocimiento en un análisis eléctrico actual en cualquier etapa del proceso, sin necesidad de realizar nuevos flujos de carga, análisis de cortocircuito o análisis transitorio y/o dinámico.

4.3.2 Requerimientos básicos

Las técnicas que se utilicen para resolver el problema deben:

- Ser adecuadas para la clasificación de casos de comportamiento del sistema y ser robustas para soportar el aprendizaje de un número de casos elevado, esto

implica que debe llegar a una capacidad de generalización tal que después de determinado número de casos de entrenamiento, el modelo debe ser capaz de resolver nuevos casos (casos de validación).

- Facilitar la adaptación de nuevos casos al conjunto de casos de entrenamiento y validación de tal forma que se posibilite un aprendizaje continuo en el tiempo.
- Los datos deben tener un grado de redundancia elevado para realizar su clasificación

4.3.3 Hipótesis

- La información de los análisis eléctricos se puede almacenar de forma organizada y estandarizada.
- El sistema se puede representar en un conjunto histórico de estados de operación, finitos, que se pueden parecer a nuevos estados de operación.
- Es posible definir ciertas características, que representen estados o puntos de operación de un sistema eléctrico, que se pueden obtener a partir de la información almacenada de los análisis eléctricos.
- Es posible detectar nuevos estados de operación inconvenientes para el sistema, y llevarlos a puntos de operación convenientes a través de una recomendación eléctrica obtenida de estado de operación pasado similar.
- Existen técnicas de inteligencia conocidas que resuelven este problema.

4.3.4 Datos de entrada

En concordancia con el ordenamiento y la indexación de información, se toma como entrada aquello que define un estado de un sistema eléctrico de potencia, éstas entradas son tres características de las que ya se ha hablado:

- ✓ Demanda (MW, Carga)
- ✓ Generación (MW, Nivel de los Activos de Generación de Energía Eléctrica)
- ✓ Topología (Estado de los activos de Transmisión de Energía Eléctrica)

Entonces, una entrada corresponde a:

- Valor asociado a Demanda en cada una de las barras del sistema de potencia.
- Valor asociado a Generación en cada una de las máquinas del sistema de potencia.
- Disponibilidad de todos y cada uno de los elementos (compensadores, líneas, trafos, barras) del sistema eléctrico de potencia.

4.3.5 Datos de Salida

Como salida, se toma aquello que un analista eléctrico encuentra después de hacer un análisis eléctrico, esto es, una sugerencia de posible solución (recomendación eléctrica) a las restricciones que presente el sistema. Los tipos de recomendaciones eléctricas que un analista puede dar son:

- Subir/Bajar Generación en M_1 , M_2 y/o M_3 ... máquinas
- Limitar la transferencia de potencia en E_1 y/o E_2 y/o E_3 ... elemento (s) del orden de X_1 , X_2 y/o X_3 MW (corte)
- Ajustar Reactivos con M_1 , M_2 y/o M_3 ... máquinas
- Máxima demanda atendible en área A o sub-área SA o Barra B.
- Tensión objetivo en barras B_1 , B_2 y/o B_3 ...
- Programación Reserva Rodante
- Cambio topológico o reconfiguración
- Activación esquema de desconexión de carga
- Traslado de carga
- Reprogramación de un mantenimiento
- Programación de Racionamiento

4.3.6 Conocimiento útil

Un analista eléctrico, necesita conocer, los tipos de causas que ocasionan las restricciones eléctricas para poder dar una recomendación eléctrica. Estas pueden ser:

- Contingencia en E_1 y/o E_2 elemento(s) puede causar sobrecarga en E_1 , E_2 y/o E_3 ... elemento(s)
- Contingencia E_1 y/o E_2 elemento(s) puede causar problemas de inestabilidad de ángulo.
- Contingencia en E_1 y/o E_2 elemento(s) puede causar problemas de inestabilidad de frecuencia.
- Contingencia en E_1 y/o E_2 elemento(s) puede causar problemas de inestabilidad de tensión.
- Nivel de cortocircuito copado en elemento E

Es necesario hacer ciertas definiciones para relacionar las variables que han de tenerse en cuenta en el modelo a proponer.

- ✓ SOBRECARGAS (Variable: Potencia; Parámetro: P_{max} en cada elemento)

Se presentan cuando el flujo de potencia por el elemento excede los límites térmicos impuestos por las características físicas de los materiales. Un elemento está sobrecargado cuando excede una P_{max} impuesta por dicho límite térmico.

- ✓ ESTABILIDAD DE ANGULO (Variable: ángulos de los rotores de las máquinas)

La estabilidad de ángulo se refiere a la habilidad de las máquinas sincrónicas del sistema de potencia de mantener el sincronismo después de ser sujetas a una perturbación. Las variables a monitorizar son los ángulos de los rotores de las máquinas relativos a una máquina de referencia, que oscilan luego de una perturbación (si el sistema es estable las máquinas interconectadas permanecen "en sincronismo")

Este ángulo es función del balance entre:

- Potencia mecánica aplicada al rotor (máquina primaria)
- Potencia eléctrica transferida a la red.

- ✓ ESTABILIDAD DE FRECUENCIA (Variable: Frecuencia)

La estabilidad de frecuencia se refiere a la habilidad del sistema de potencia de mantener estable la frecuencia siguiendo una severa perturbación del sistema resultante en un desbalance significativo entre carga y generación.

✓ ESTABILIDAD DE TENSION (Variable: Tensión)

La estabilidad de tensión se refiere a la habilidad del sistema de potencia de mantener tensiones estables después de haber sido sujeto a una perturbación. La inestabilidad que puede resultar ocurre en la forma de un aumento o caída progresiva de tensiones en ciertas barras. Las variables a monitorear son las tensiones en las barras de la red).

✓ NIVEL DE CORTOCIRCUITO (Variable: Corriente; Parámetro: I_{max})

Es la corriente máxima de cortocircuito. Determina los esfuerzos electrodinámicos máximos que pueden soportar las barras y los tramos de conexión en una subestación.

4.3.7 Caracterización del conocimiento

Las condiciones de un sistema eléctrico de potencia pueden quedar perfectamente descritas a partir de la combinación de tres variables básicas, n-dimensionales: generación, demanda y topología. La figura 34 hace una representación gráfica de ello.

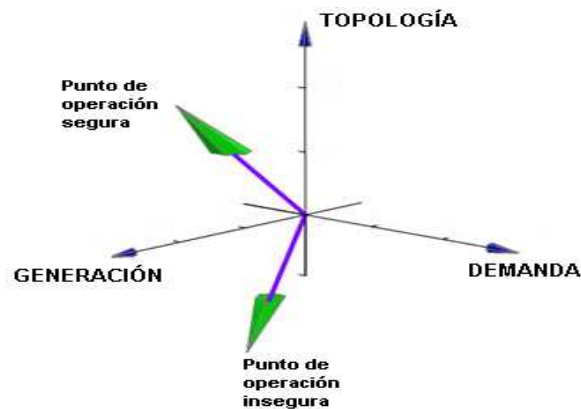


Figura 34 Representación de un punto de operación

Cada combinación de estas tres variables representa un punto de operación; esto se puede ver como un vector que define completamente el sistema eléctrico. Lo que se supone es que, almacenando estos puntos de operación con sus recomendaciones

eléctricas asociadas, hechas por los analistas eléctricos en el pasado, se puede, detectar un punto de operación inseguro en el presente y llevarlo a un punto de operación segura.

La combinación de datos puede llegar a ser muy compleja, sin embargo, se puede dividir el conjunto de datos en distintos subconjuntos (casos), cada uno de los cuales agrupa datos similares, con algún tipo de característica en común (figura 35). El desarrollo de alguna metodología para resolver este problema requiere elaborar alguna medida de semejanza entre los datos. Es necesario, entonces, para hacer más pequeño el problema, analizarlo por áreas operativas. Esto es, toda entrada (generación, demanda y topología) debe estar asociada a un área operativa. Es bueno recordar que un área operativa es el conjunto máximo de elementos de red que encierra la mayor cantidad de demanda en el número mínimo de líneas.

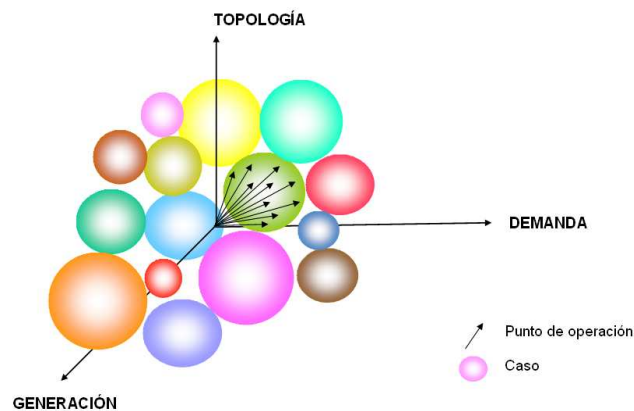


Figura 35 Representación de un caso

La naturaleza de este problema, se parece a la mencionada en el proceso de Razonamiento Basado en casos, mencionado en el Marco Conceptual del Capítulo I.

Antes de describir cómo sería cada una de las etapas del modelo basado en Razonamiento Basado en Casos, es necesario precisar qué se considera un caso. Un caso es la definición completa, clara y precisa de las características de un análisis eléctrico particular que incluye criterios que lo distinguen de otros análisis eléctricos, y las

acciones que se deben tomar para su corrección. En relación con lo anterior, un caso debe contar con:

- Descripción de escenarios: generación, demanda y topología por áreas.
- Causa: contingencias críticas.
- Efecto: tipo de problema ocasionado (sobrecargas, inestabilidad, nivel de cortocircuito copado)
- Solución: recomendación eléctrica asociada.

Algunos ejemplos son:

- ✓ Un caso de una restricción que activa un corte:

ESCENARIOS: Altas generaciones en la cadena Paraíso-Guaca, la planta Chivor y la planta Guavio y Baja demanda en el área Oriental.

CAUSA: Contingencia Línea Paraíso-Guaca

EFEECTO: Sobrecarga Transformador de Guaca

SOLUCIÓN: Limitar 500 MW en Circuitos 1 y 2 Guaca – Mesa 220 kV.

- ✓ Un caso de una restricción que activa una Generación de Seguridad y cortes:

ESCENARIOS: Demanda máxima y Exportación a Ecuador menor o igual a 280 MW

CAUSA: Contingencia Betania-San Berna 1 y 2

EFEECTO: Oscilaciones no amortiguadas en Mirolindo-Ibagué

SOLUCIÓN:

* Corte San Marcos - Yumbo + San Marcos - Juanchito 230 kV (430 MW)

* Corte Yumbo - San Bernardino + Juanchito - Paez (570 MW)

* Programar Unidad de seguridad en Betania y fijar dos unidades adicionales en sur a 230 kV

4.3.8 Recuperar

La recuperación de casos es la selección, en la base de conocimiento, de aquellos casos de análisis eléctricos anteriores, cuya descripción más se ajusta a la información presentada en el nuevo caso.

Una de las técnicas más comúnmente utilizada para la recuperación de casos es la de vecinos más cercanos. La técnica de "Vecino más cercano" [8] consiste en determinar la distancia que existe entre las características del nuevo caso y las de los casos ya existentes, localizando el caso que esté más cerca.

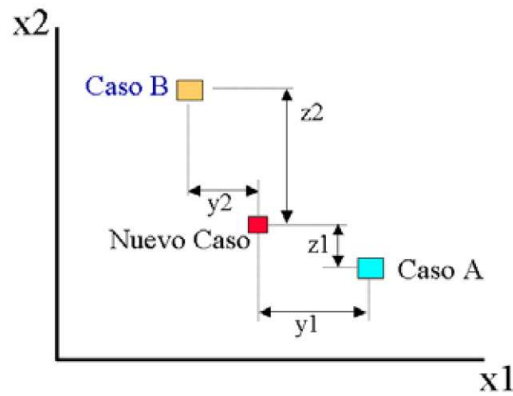


Figura 36 Representación de la técnica de "vecino más cercano"

La figura anterior muestra la distancia entre el nuevo caso y dos casos A y B. X_1 y x_2 son las características que definen a los casos. Para este modelo se definirán $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$, como las características de cada caso, que será la diferencia entre la demanda y la generación del Area 1, Area 2, Area 3, ... Area N, respectivamente. Esto es:

- Vector Generación por áreas:

$\vec{G} = (GA_1, GA_2, GA_3, \dots, GA_n)$, conocida la generación por máquinas, y cada máquina debe estar asociada a un área, la generación en cada área simplemente será la suma de la generación de las máquinas asociadas al área.

- Vector Demanda por áreas:

$\vec{D} = (DA_1, DA_2, DA_3, \dots, DA_n)$, conocida la generación por barras, y cada barra debe estar asociada a un área, la Demanda en cada área simplemente será la suma de las demandas de las barras asociadas al área.

- Vector Balance por áreas:

$$\vec{X} = \vec{G} - \vec{D} = (GA_1 - DA_1, GA_2 - DA_2, GA_3 - DA_3, \dots, GA_n - DA_n)$$

$\vec{X} = (X_1, X_2, X_3, \dots, X_n)$, donde $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ son los respectivos balances por área.

Cada vez que se haga un análisis eléctrico se almacenará un vector \vec{X} , que será un caso pasado. Cuando se necesite hacer el análisis eléctrico de un nuevo caso se creará un vector \vec{X}_0 que será el vector de referencia para hacer la comparación. Esto significa que como resultado de este paso, definiendo un rango de error, se tendrá un conjunto de casos anteriores cuyo balance Demanda-Generación por áreas se acerca mucho al nuevo caso.

Sin embargo, se sabe que si aún no se tiene definido completamente un punto de operación de un sistema eléctrico de potencia, es necesario tener en cuenta la topología de la red. Para esto, se utilizará otra técnica ampliamente utilizada en la recuperación de casos, "Recuperación Inductiva" [8]. Esta técnica requiere de la preparación previa de un árbol de decisiones, a partir del cual, se encuentre el caso más parecido a la información dada. La figura 37 ilustra la manera en que se desarrolla un diagrama de árbol.

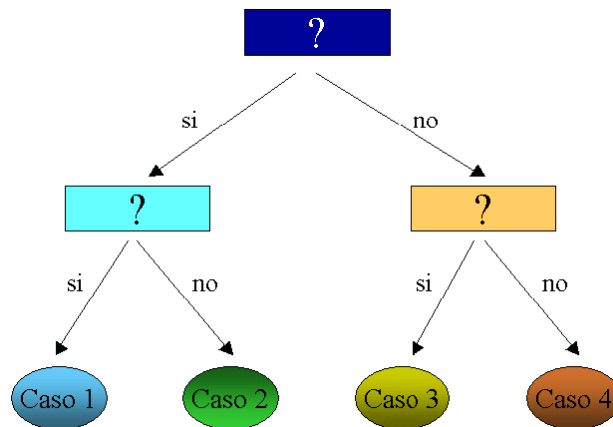


Figura 37 Representación de un diagrama de árbol

Teniendo en cuenta que los elementos que interconectan áreas tienen efectos significativos en las áreas que interconectan; para detectar una restricción en determinada área operativa, la eliminación del conjunto de casos encontrado en el paso anterior, se hace por medio de preguntas acerca de la disponibilidad de las líneas que interconectan áreas. Por ejemplo, en el pequeño sistema eléctrico de potencia representado en la figura 38, donde las líneas 1, 2 y 7 son las que interconectan áreas, supóngase un caso nuevo en el que de éstas, está indisponible la línea 2. Los casos pasados que asociarían una recomendación eléctrica a una restricción en el área 2, serían aquellos que justamente tuvieran las líneas 1 y 7 disponibles y la línea 2 indisponible.

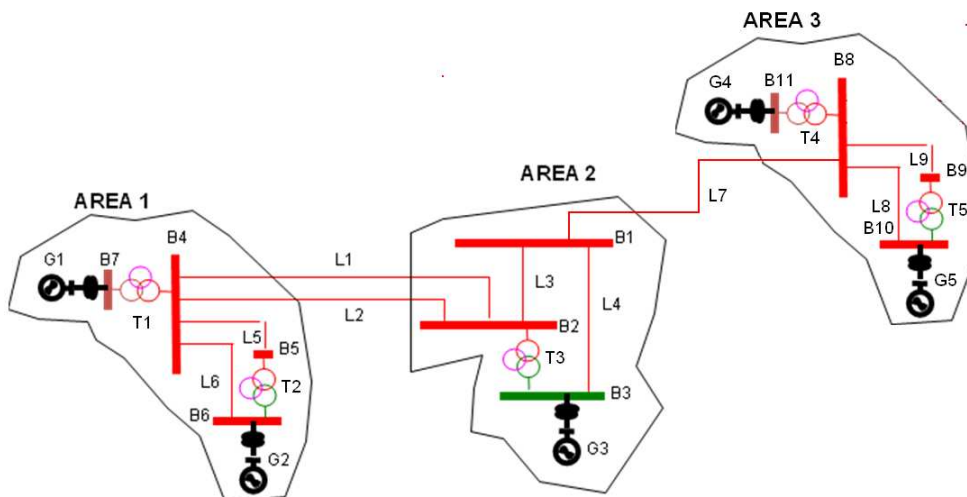


Figura 38 Ejemplo de un Sistema Eléctrico de Potencia

De este nuevo conjunto de casos, si ahora se tiene en cuenta que la indisponibilidad de un elemento que está dentro de un área operativa tiene efectos significativos sobre su propia área y poco significativos en otras, las preguntas ahora serían asociadas a la disponibilidad de los elementos del área en cuestión. Es decir, si el área 2, tiene disponibles B1, B2, B3, L3 y T3, e indisponible L4, el caso a seleccionar será el que tenga justamente este conjunto de disponibilidades.

En efecto, puede haber varios casos para los que se cumplan estas condiciones, por lo tanto, se tomará el que tenga un valor más cercano de Balance Demanda Generación para el área respectiva; en caso que no se registre un caso lo suficientemente parecido, el sistema deberá responder que no lo ha encontrado, situación ante la cual se debe proceder a el análisis completo y documentarlo como un nuevo caso.

4.3.9 Reutilizar

El objetivo de “reutilizar” es usar una solución de un caso anterior en la solución de un nuevo problema, a veces, involucrando algún tipo de modificación adoptada en la solución pasada.

La adaptación consiste en adecuar la solución del caso que se encontró como más parecido a las condiciones del nuevo caso. En la realidad, es casi imposible encontrar un estado del sistema eléctrico de potencia, que represente en sentido riguroso un caso nuevo, con valores de generación, demanda y topología. Sin embargo, con las aproximaciones realizadas se puede considerar que una recomendación eléctrica puede ser bastante acertada, dado que para obtener un grado más elevado de exactitud y en ese caso se documentaría todo el nuevo caso.

Como un caso describe los escenarios de generación, demanda y topología de todo el sistema eléctrico, y, el análisis de las restricciones se ha realizado por áreas, significa que como resultado, puede haber varios casos del pasado que dan recomendaciones eléctricas

al nuevo caso, en cada una de las áreas donde se haya hecho las comparaciones acertadas, en otras palabras, como resultado de la recuperación de casos se pueden tener varias recomendaciones eléctricas provenientes de diferentes casos del pasado para cada una de las áreas donde se hayan ocasionado restricciones.

Por ejemplo, para el caso que se describió de la figura, donde está indisponible la L2 y L4, en un escenario donde el Area 1 esté recibiendo MWs del Area 2 y el Area 2 esté recibiendo MWs del Area 3, se podría tener:

>>**Contingencias crítica:** L3

>>**Problema ocasionado:** Sobrecarga en T3 y L1

>>**Recomendación Eléctrica:** Subir Generación en G1 o G2 y bajar en G3

4.3.10 Retener

El objetivo de “Retener” es capturar la experiencia de un problema apenas resuelto por el analista eléctrico, construyendo un nuevo caso. Existen técnicas de almacenamiento de datos muy apropiadas, como es el Data Warehousing. Según [5], El “Data Warehousing” provee arquitecturas y herramientas para organizar, entender y usar sistemáticamente los datos. Este soporta procesamiento de información proveyendo una plataforma sólida de datos históricos consolidados para el análisis.

Capítulo V

5. DESCRIPCIÓN DE LA PLATAFORMA

5.1 Estructura del Sistema Inteligente

Como se detalló en las secciones anteriores, el Administrador Inteligente Integrado del Análisis Eléctrico de un Sistema Eléctrico de Potencia, se estructuró como se presenta en la figura 39. El objetivo es encontrar los problemas que ocasionan restricciones eléctricas, y proponer estrategias de solución.

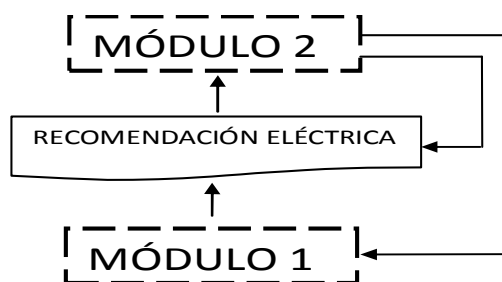


Figura 39 Estructura del Administrador Inteligente Integrado del Análisis Eléctrico de un Sistema Eléctrico de Potencia

El Módulo 1 (ver figura 40) aborda el problema desde la perspectiva del analista para encontrar una solución, y se podría enmarcar en un sistema experto. El Módulo 2 (ver figura 41), encuentra soluciones de casos similares que se adapten al de entrada, como lo hace un sistema con Razonamiento Basado en Casos.

Un analista utilizaría primero el Módulo 2, para acercarse a la solución a través de un caso histórico, y después utilizaría el Módulo 1, si es necesario, para cerciorarse de que la solución ha sido adecuada, o si no se ha encontrado un caso lo suficientemente parecido.

El diagrama del Módulo 1 muestra la arquitectura básica del Sistema Experto Guía del Análisis Eléctrico, que está constituida por una Base de Conocimientos, un subsistema de

Adquisición de la información y un Motor de Inferencia. Las flechas gruesas indican la interrelación entre estos bloques, las flechas delgadas indican el flujo de datos.

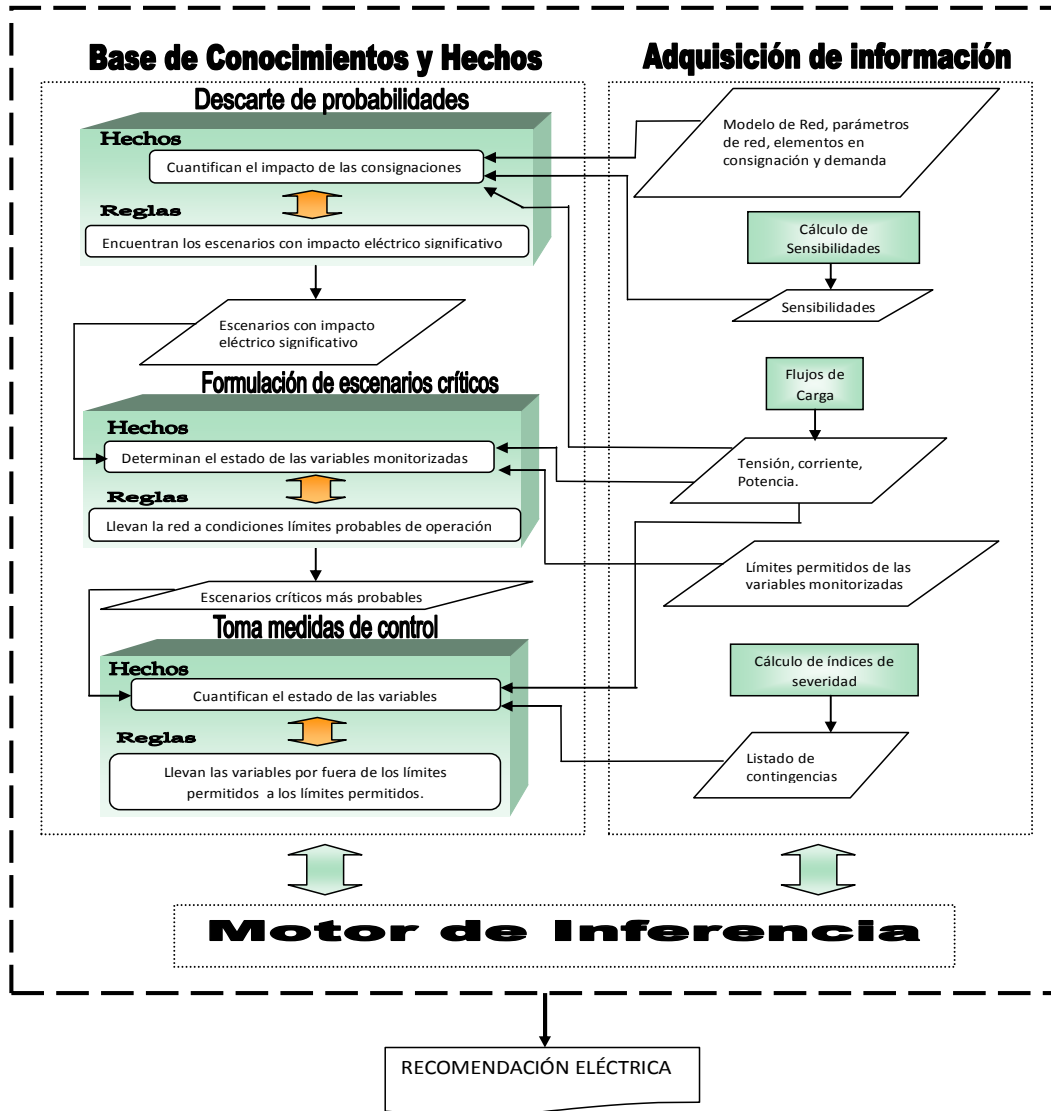


Figura 40 Arquitectura del Módulo 1 - Sistema Experto Guía del Análisis Eléctrico

La Base de Conocimientos caracteriza el comportamiento del experto mediante reglas. Estas reglas se pueden reagrupar en tres bloques básicos secuenciales; el primero representa el conocimiento que el analista utiliza para seleccionar el escenario de análisis dentro de un numeroso conjunto de posibilidades (mencionados en el planteamiento del problema). El seguimiento de las reglas da como resultado un conjunto de escenarios o

configuraciones de la red con impacto eléctrico significativo y sus respectivos períodos a analizar.

El segundo bloque de reglas representa el conocimiento que utiliza el analista para formular los escenarios de generación críticos, estos es, aquellos que llevan la red a condiciones límites de operación.

El tercer bloque de reglas, representa el conocimiento utilizado para encontrar las medidas de control necesarias o recomendaciones eléctricas que garantizarán la operación segura y confiable del sistema eléctrico.

La base de hechos contiene los hechos de un problema que se ha descubierto durante el análisis. El subsistema de adquisición de información alimenta a la base de hechos y, en caso necesario, incorpora nuevos conocimientos.

Por su parte, el motor de inferencias, es el encargado de desencadenar el proceso de razonamiento, recorriendo la base de conocimientos a partir de los datos almacenados en la base de hechos (en función del mecanismo de inferencia almacenado). Para este caso la construcción del motor de inferencia se deja como propuesta para desarrollar en una etapa posterior.

La figura 41 ilustra las tres etapas que utiliza el Módulo 2 para llegar a una recomendación eléctrica: retener, recuperar y reutilizar. La retención es una base de datos que tiene estructuradamente almacenada la información sobre la demanda, la generación, la topología, y las respectivas restricciones y recomendaciones eléctricas asociadas a cada caso.

La etapa de recuperación de casos se divide en dos sub-etapas: la primera, utiliza la técnica de vecinos más cercanos que hace uso de los datos de demanda y generación para acercarse a los casos más parecidos; la segunda utiliza la técnica de recuperación inductiva y hace uso de la información topológica, para encontrar el caso más parecido.

La etapa de reutilización está implícita al utilizar estas dos técnicas, sin embargo, es necesario visualizar individualmente este paso ya que relaciona los escenarios de generación, demanda y topología con los datos almacenados de las restricciones eléctricas

asociadas. Este bloque enviará al usuario al Módulo 1, sino logra encontrar casos lo suficientemente parecidos para dar una recomendación eléctrica, y a su vez el Módulo 1, estará llevando los casos analizados para que sean almacenados en la base de datos.

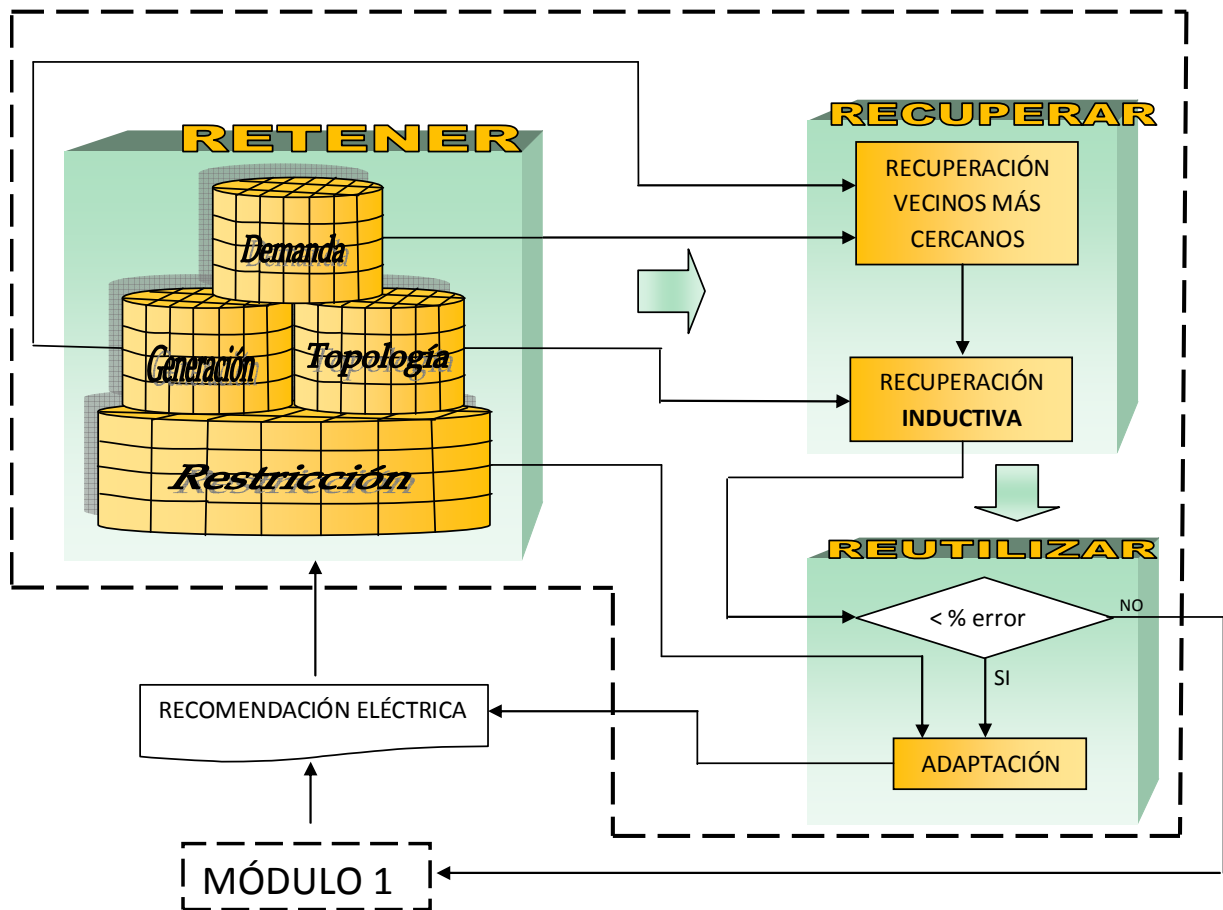


Figura 41 Arquitectura del Módulo 2 - Sistema con Razonamiento Basado en Casos Históricos del Análisis Eléctrico

5.2 Datos

Como se habló en el primer capítulo, un dato es una representación simbólica (numérica, alfabética, etc.) de un atributo o característica de una entidad. El dato no tiene valor semántico (sentido) en sí mismo, pero convenientemente tratado (procesado) se puede utilizar en la realización de cálculos o toma de decisiones. Los datos pueden ser variables

o parámetros. Una variable es una magnitud que puede tener un valor cualquiera. Un parámetro es un valor numérico o dato fijo. Así mismo, las variables y los parámetros pueden ser representados por valores correspondientes a los números reales (continuos) o pueden representar un estado o posición (discretos). En la tabla 1 se clasifican los datos del Administrador Integrado del Análisis Eléctrico como de entrada o de salida, como parámetro o variable, y como discreta o continua, además si es continua se enuncia a qué elemento, variable o área operativa está asignado dicho dato, y si es discreta qué tipo de estado se le asigna.

DATO	ENTRADA / SALIDA	PARÁMETRO / VARIABLE	DISCRETA / CONTINUA	ASIGNACIÓN
TENSIÓN	Entrada	Variable	Continua	A un barraje
CORRIENTE	Entrada	Variable	Continua	A una línea o transformador
POTENCIA	Entrada	Variable	Continua	A una máquina, línea, transformador o elemento de compensación
SENSIBILIDADES	Entrada	Variable	Continua	A otra variable
DEMANDA	Entrada	Variable	Continua	A un área operativa
GENERACIÓN	Entrada	Variable	Continua	A un área operativa
TOPOLOGÍA	Entrada	Variable	Discreta	Estado de disponibilidad
ELEMENTOS EN CONSIGNACIÓN	Entrada	Variable	Discreta	Estado de no disponibilidad
LÍMITES PERMITIDOS DE LAS VARIABLES MONITORIZADAS	Entrada	Parámetro	Continua	A una variable
PARÁMETROS DE LA RED	Entrada	Parámetro	Continua	A un elemento de red
CORTE	Salida	Variable	Continua	A una línea y/o transformador y/o conjunto de líneas
GENERACIÓN DE SEGURIDAD	Salida	Variable	Continua	A una máquina
TENSIÓN OBJETIVO	Salida	Variable	Continua	A un barraje
CONTINGENCIAS CRÍTICAS	Salida	Variable	Continua	Estado de alerta

Tabla 1 Clasificación de los datos

5.3 Información

Información es cualquier estímulo capaz de cambiar el estado o de alterar la conducta de un sistema; es un conjunto de datos organizados de tal forma que presentan un mensaje.

5.3.1 Información de entrada

La información de entrada se recibe de un agente externo, ésta corresponde a:

- Modelo de red: Son todos los elementos existentes, su configuración y su clasificación en un área o sub-área operativa.
- Listado de contingencias críticas con índices de severidad: Son un conjunto de valores reales que se asignan a un conjunto de elementos (líneas o transformadores) y están organizados de mayor a menor grado.

5.3.2 Información de salida

Las recomendaciones eléctricas que son dadas mediante enunciados representan información y no datos. Entre éstas se tienen:

- Ajustar Reactivos con M_1 , M_2 y/o M_3 ... máquinas
- Máxima demanda atendible en área A o sub-área SA o Barra B.
- Programación de Reserva Rodante
- Cambio topológico o reconfiguración
- Activación del esquema de desconexión de carga
- Traslado de carga
- Reprogramación de un mantenimiento
- Programación de Racionamiento

5.4 Conocimiento

Conocimiento es una apreciación de la posesión de múltiples datos interrelacionados que por sí solos poseen menor valor cualitativo. Para el Administrador Inteligente Integrado del Análisis Eléctrico, el conocimiento está representado por las reglas que conforman la base de conocimientos del Módulo 1 y, por las técnicas formuladas para la recuperación y reutilización de casos en el Módulo 2.

5.5 Manejo de la información

El Módulo 1 toma la información obtenida a partir de los flujos de cargas, del cálculo de sensibilidades, del análisis de contingencias por medio de índices de severidad, el modelo de red, los parámetros de la red, los elementos en consignación, los pronósticos de demanda y los límites permitidos de las variables monitorizadas y la organiza y procesa para obtener una recomendación eléctrica. El Módulo 2 por su parte, toma un caso de entrada definido por sus características de generación, demanda y topología y sus restricciones y recomendación eléctricas asociadas y hace una búsqueda dentro de un almacén de casos para obtener una recomendación eléctrica.

En cuanto al Módulo 2, un caso de entrada, deberá contener la información necesaria para describirlo completamente, y debe estar organizado de forma tal, que sea posible realizar las operaciones necesarias para la recuperación de casos. Un esquema de recolección de información se encuentra en la tabla 2. Allí la información de generación, demanda y topología se asocia a las áreas operativas, y las restricciones y recomendaciones eléctricas a los elementos.

AREA	GEN (MWs)	DEM (MWs)	TOPOLOGÍA		CONTING. CRÍTICA	PROBLEMAS OCASIONADOS	RECOMEND. ELÉCTRICAS
			ELEMENTO	DISP.			
Area 1	GA1	DA1	Elemento 1	Si	No	No	
			Elemento 2	Si	Si	Sobrecarga en Elemento x	Limitar MWs en circuitos
			...	Si	
Area 2	GA2	DA2	Elemento ...	Si	No	No	
			Elemento ...	No	No	No	
			...	Si	
Area ...	GA...	96DA...	Elemento ...	Si	Si	Inestabilidad de Tensión	Tensión objetivo en barra...
			Elemento ...	No	No	No	
			...	Si	
Area n	GAN	Dan	Elemento ...	No	No	No	
			...	Si	
			Elemento k	Si	Si	Inestabilidad de ángulo	Generación de seguridad en planta

Tabla 2 Organización de la información de un caso de entrada

5.6 Especificaciones de tamaño

El Administrador Inteligente debe estar en capacidad, como mínimo, de soportar la dimensión del Sistema Eléctrico de Potencia Colombiano, éste cuenta con:

- 610 Subestaciones (barrajes) del STN
- 250 Líneas del STN
- 105 Generadores
- 150 Transformadores
- 30 Areas y subáreas operativas

Lo anterior propone para el Administrador Inteligente al menos 50 áreas, cada una con al menos 20 subestaciones, 10 líneas, 5 generadores y 5 transformadores, que se puedan integrar como una sola para algunos casos específicos y que se pueda declarar si el elemento se encuentra activo o no en caso determinado.

Además, el Administrador Inteligente debe ser capaz de manejar al menos 500 reglas de funcionamiento y debe permitir relacionar el Módulo 1 de análisis con el Módulo 2.

Capítulo VI

6. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Los resultados del diagnóstico de la operación del Sistema Eléctrico de Potencia Colombiano, muestran que es necesaria la recopilación del conocimiento requerido para hacer los análisis eléctricos y la recuperación de la memoria perdida del pasado, mediante algún sistema de información que sea capaz de asimilarlo, almacenarlo y procesarlo de forma eficiente.

La propuesta de esta tesis, consiste en la posibilidad de implementar un sistema inteligente que tome la información del sistema eléctrico y mediante inferencia presente las acciones requeridas. El sistema por su estructura se plantea en dos módulos: el primero, desarrolla un modelo que representa una guía para la operación de un Sistema Eléctrico de Potencia, allí mediante un conjunto de reglas empíricas y de estudio formal del análisis eléctrico, se pueden identificar las restricciones y las medidas de control necesarias para la planeación a largo, mediano, corto y muy corto plazo. El segundo, plantea la recuperación de la historia de los análisis eléctricos pasados. En este modelo se pueden inferir acciones del Sistema Eléctrico de Potencia, teniendo en cuenta su dinamismo. Allí, analizando ciertas características unificadoras mediante Razonamiento Basado en Casos, se infieren las acciones a tomar sobre el sistema.

La recomendación para el operador de mercado, XM S.A. E.S.P., que se basa en la dificultad encontrada en la proposición de un modelo guía para un análisis eléctrico, sería incrementar la rigurosidad de sus analistas, fortalecer los conceptos de análisis eléctrico y formalizar el conocimiento empírico.

Sin embargo, la mayor dificultad fue la propuesta del modelo para recuperar la historia de los análisis eléctricos pasados, específicamente en encontrar alguna medida de semejanza que acotara el problema de dinamismo del Sistema Eléctrico y, que a su vez, pudiera dar un resultado lo suficientemente certero. A lo anterior se dio solución usando una combinación de dos técnicas de inteligencia artificial (vecino más cercano y recuperación inductiva) y un tratamiento de la red por áreas operativas. Al tratar el modelo con áreas operativas, no se elimina por completo el inconveniente de considerar que el sistema eléctrico se puede expandir, pero si se atenúa, ya que en cuanto un nuevo proyecto de expansión entra, solo se afectará un área, es decir, las recomendaciones asociadas a esta área habrá que ajustarlas, mas no las del sistema completo.

En el desarrollo del módulo guía del análisis eléctrico, se considera fundamental la realización de estudios formales sobre análisis de sensibilidades de un sistema eléctrico de potencia y cálculo de índices de severidad para la construcción de un listado de contingencias, con el fin de efectuar los análisis eléctricos a partir del modelo propuesto para el sistema inteligente.

En cuanto a las observaciones efectuadas en el período de práctica en XM S.A. E.S.P., se podría decir que, en general, todos los analistas tienden a pensar de la misma manera, y esto se da porque cuando se incursiona a la empresa, la metodología de capacitación es a través de la transmisión de conocimiento de un analista experimentado a uno nuevo, sin un conocimiento previo del análisis eléctrico; es entonces difícil esperar que un novato tenga a futuro, un proceso de razonamiento diferente.

También se podría decir que, para aprender a efectuar análisis eléctrico, lo ideal sería que los analistas incursionaran desde la perspectiva de planeación y fluyeran a través del proceso de análisis eléctrico hasta la operación en tiempo real. Lo anterior debido a que, gran parte de los analistas no tienen una conciencia suficientemente clara del análisis eléctrico en las dependencias ajenas a ellos, y por esto, predecir con precisión las necesidades de las otras dependencias es una tarea que se hace difícil.

Uno de los mayores aprendizajes en todo el proceso de elaboración de esta tesis es que el uso de códigos lingüísticos comunes que correspondan a conceptos técnicos

estandarizados es muy importante para una transmisión óptima y precisa del conocimiento, esto es, es necesaria la apropiación y la universalización de los mismos en el lenguaje cotidiano.

En cuanto a inteligencia artificial, una de las cosas más importantes, antes de entrar a modelar un problema, es que primero se deben entender muy bien las primitivas de conocimiento. Las primitivas de conocimiento son aquellas nociones que se espera que no cambien en el tiempo debido a la naturaleza del problema a solucionar, pueden interpretarse como conocimientos esenciales de la ingeniería que resuelven el problema de análisis eléctrico. Para lograrlas se debe actuar como niños, observarlo todo, preguntarlo todo, experimentarlo todo. Existe gran cantidad de conocimiento que parece obvio y no lo es realmente, por tanto conviene explorar y especificar cada paso de un proceso y tenerlo muy claro.

Sin embargo, lo primordial para dar solución a un problema y hacer una propuesta, es estimular la imaginación, la creatividad y el pensamiento complejo y divergente. Este aspecto, fue el que, con toda certeza, consumió la mayor cantidad de tiempo utilizado en la elaboración del presente proyecto, ya que se puede tener claro el conocimiento, pero para producir ideas es necesaria la apertura de la mente y la rotura de ciertos esquemas, es necesario verlo todo y reorganizarlo todo de nuevo. Para lograrlo, es fundamental estar completamente convencido de que es posible.

En cuanto a lo personal, se aprendieron dos cosas que vale la pena destacar: la primera, que el trabajo en equipo es muy importante y se puede lograr cuando todos tengan ánimo y disposición de aprender; y la segunda, que se debe aprender a escuchar y valorar el conocimiento, por sencillo que parezca, puede ahorrar incluso meses de trabajo.

El trabajo futuro debe ser realizado en conjunto entre la empresa y la academia, ya que la primera aporta la experiencia de los analistas y la segunda personas con amplia capacidad para la formalización de conocimiento existente y creación de nuevo conocimiento.

Las próximas etapas de este proyecto son la validación numérica del modelo mediante la construcción de un prototipo y el estudio de viabilidad económica y financiera. El

prototipo debe cumplir con las características estipuladas y permitir cuantificar su funcionalidad para su implementación definitiva. En cuanto al módulo I, para la construcción del motor de inferencias, se pueden utilizar “software” de uso libre como clips o prolog y probar diferentes métodos de encadenamiento de reglas. En cuanto al módulo II, se pueden usar los paquetes de “business intelligence” adquiridos por la empresa.

A futuro se debe trabajar sobre la ampliación de las reglas propuestas para todas las perspectivas del análisis eléctrico, e introducir reglas que tengan en cuenta el comportamiento del mercado eléctrico colombiano y el factor económico.

Como recomendación, se piensa que es más fácil que un ingeniero electricista y un ingeniero de sistemas con bases sobre inteligencia artificial continúen con el proyecto para lograr aquello que el sistema requiere, formalizando y estructurando adecuadamente la estrategia de programación.

También se recomienda para trabajos futuros, solicitar apoyo de los analistas de ISA que desarrollaron el sistema inteligente de diagnóstico de fallas para aprovechar su experiencia en la construcción del sistema.

Para cerrar, esta etapa se centraba en el análisis de la operación y en la propuesta de una alternativa de solución, por tanto, las primeras acciones de continuidad se deben tomar hacia la validación numérica del modelo para determinar la factibilidad de implementar un sistema inteligente de análisis eléctrico en XM S.A. E.S.P.

7. BIBLIOGRAFÍA

[1] [CALDERÓN SERNA, Jhon Albeiro]. Modelo Adaptativo de Inteligencia artificial para el diagnóstico automático de fallas a partir de registros de osciloperturbografía. Medellín, 2007. Trabajo de Investigación (Postgrado Ingeniería de Sistemas). Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Facultad Nacional de Minas.

[2] [CARRILLO CAICEDO, Gilberto]. Explotación óptima de un Sistema de Distribución de Energía Eléctrica. Madrid, 1995. Tesis doctoral. Universidad Pontificia de Comillas. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales (ICAI). Departamento de Electrotecnia y Sistemas.

[3] [CORREDOR MONTAGUTH, Marta Vitalia] Principios de Inteligencia Artificial y Sistemas Expertos. Universidad Industrial de Santander. Departamento de Ingenierías Físico-Mecánicas. 1992.

[4] [GALLEGO, Luis Alfonso y ESCOBAR, Antonio] Análisis Estático de contingencias de potencia activa en sistemas eléctricos de potencia. Universidad Tecnológica de Pereira. Agosto 2004. Colombia.

[5] [JIAWEL, Han y KAMBER, Micheline] Data Mining: Concepts and techniques. Simon Fraser University. Morgan Kaufmann publishers. 2001.

[6] [LLANO ZULETA, Luis Everley] Diagnóstico Automático de Eventos en tiempo real en un sistema de Transporte de energía a través del SOE y SCADA, usando técnicas de Inteligencia Artificial. Trabajo de Investigación (Postgrado Ingeniería de Sistemas). Medellín, 2007. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Facultad Nacional de Minas.

[7] [LOBATO M., Enrique]. Gestión Centralizada de Restricciones técnicas en mercados de energía eléctrica. Aplicación al caso español. Tesis para la obtención del grado de doctor. Madrid, 2002. Universidad Pontificia Comillas de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI).

[8] [LOPEZ A, Ernesto; CAMPUNAZO M, Roberto; GARCIA T., Arturo y DE LA TORRE VEGA, Octavio]. Razonamiento Basado en casos aplicado al diagnóstico de generadores eléctricos. México. <http://www.ii.org.mx/gee/arti/21.pdf>

[9] [LOZANO, Laura y FERNÁNDEZ, Javier]. Razonamiento Basado en casos: Una visión general. Universidad de Valladolid. España.

[10] [RICH, Elaine y KNIGHT, Kevin] Inteligencia Artificial. Segunda Edición. McGraw-Hill. España. 1994.

[11] [RUSELL, Stuart. y NORVING, Peter] Inteligencia Artificial: Un Enfoque Moderno. Segunda Edición. Pearson Prentice Hall. España. 2004.

[12] [SAMPER MARQUEZ, Juan José]. Cuando las máquinas aprenden. <http://www.redcientifica.com/doc/doc199909170005.html>.

[13] [VILLENA ROMAN, Julio] Inteligencia en Redes de Comunicaciones. Sistemas Basados en Conocimiento. jvillena@it.uc3m.es

[14] [WOOD, F.F. Wollengberg]. Power Generation, Operation and Control. John Wiley and Sons. New York. 1984.

8. ANEXOS

ANEXO 1.

ALGORITMO HEURÍSTICO DE DESPACHO PREVENTIVO DE POTENCIA ACTIVA

El algoritmo que se describe a continuación forma parte del Sistema de Análisis de Restricciones a la Operación de Red Eléctrica de España.

Las contingencias que provocan sobrecargas en las ramas se registran y se ordenan por índice de severidad. El índice de severidad representa una medida de la gravedad de las sobrecargas que una contingencia provoca. La lista de contingencias organizadas en orden decreciente a su índice de severidad en el módulo de análisis de contingencias se envía al módulo de despacho preventivo. El objetivo del despacho preventivo de potencia activa es modificar la programación de los generadores, de tal manera que se solucionen las sobrecargas que las contingencias analizadas provocan.

La solución de cada contingencia responde a un proceso iterativo. En cada iteración se selecciona un grupo generador que reduce su producción y un grupo generador que aumenta su producción. La selección de los generadores se fundamenta en las sensibilidades de los flujos por las ramas en relación a las potencias generadas. El factor de **sensibilidad** del flujo por una rama, entre los nudos j y k , con relación a la potencia suministrada por un nudo i se calcula como

$$a_{ij} = \frac{\Delta F_{jk}}{\Delta P_i} = \frac{1}{x_{jk}} \left(\frac{\Delta \theta_j}{\Delta P_i} - \frac{\Delta \theta_k}{\Delta P_i} \right)$$

Con ayuda de las sensibilidades a_{ij} se define el factor de sobrecarga reduciendo generación en el nudo i CR_i y el factor de sobrecarga incrementando la generación en el nudo i CI_i :

$$CR_i = C_i + \sum_{l \in H_1} a_{il} \cdot \text{signo}(F_l) \qquad CI_i = C_i + \sum_{l \in H_2} a_{il} \cdot \text{signo}(F_l)$$

siendo,

$$C_i = \sum_{l \in S} a_{il} \cdot \text{signo}(F_l)$$

El factor de sobrecarga CR_i / CI_i mide la eficiencia de la reducción / aumento de generación en el nudo i para el alivio de sobrecargas. El criterio económico se introduce mediante la ponderación de los factores de sobrecarga con los costes de subida y bajada:

$$CRP_i = \frac{CR_i}{c_{subida}} \qquad CIP_i = \frac{CI_i}{c_{bajada}}$$

Los generadores seleccionados en cada iteración para aumentar y reducir la producción son: (1) aquel cuyo factor de sobrecarga ponderado al incrementar su potencia suministrada es mínimo y su potencia generada es inferior a su potencia máxima (generador r) y (2) aquel cuyo factor de sobrecarga ponderado al reducir su potencia suministrada es máximo y su potencia generada es superior a su potencia mínima (generador s). La potencia de intercambio entre los generadores seleccionados se calcula:

$$P_I = \min\{\Delta P_r, \Delta P_s, \Delta P\}$$

$$\Delta P_r = P_{\max,r} - P_r \qquad \Delta P_s = P_s - P_{\min,s} \qquad \Delta P = \min\left\{\frac{\Delta F_l}{a_{lr} - a_{ls}}\right\}$$

TECNICAS DE SELECCIÓN AUTOMÁTICA DE CONTINGENCIAS [2]

El objetivo de la técnica de selección automática de contingencias es determinar, cuales contingencias producirán mayores problemas en el funcionamiento del sistema. Normalmente estos métodos definen una función llamada **índice de severidad**, que es una medida del esfuerzo a que se ve sometido el sistema. Dicha función cambia cuando se produce la contingencia y es fácil y rápida para evaluar este cambio, con lo que al final se dispone de una lista de contingencias ordenadas según la magnitud del cambio a que han dado lugar. Existen diferentes alternativas a la hora de definir el índice de severidad dependiendo si se desea estudiar problemas de sobrecarga o tensión.

Las técnicas de selección automática de contingencias se dividen en dos categorías dependiendo del tipo falla en el sistema: sobrecarga o problemas de tensión. La selección automática de contingencias se divide en dos pasos:

- a. Se define una función escalar llamada índice de severidad (PI) definida como una medida del “stress” del sistema en una situación determinada.
- b. Se desarrolla un método para predecir el cambio en PI cuando se produce la sacada del servicio de una línea del sistema, este cambio se utiliza como índice de severidad según su magnitud.

ALGORITMO HEURÍSTICO PARA EL AJUSTE DEL PERFIL DE TENSIONES

El algoritmo heurístico para el ajuste del perfil de tensiones se basa en las sensibilidades obtenidas a partir de las ecuaciones del flujo de cargas desacoplado rápido. Consta de los siguientes pasos [Gómez Expósito, et al., 1993; Gómez San Román, 1989; Toral, et al., 1997]:

- 1) Determinación de la violación de mayor severidad de los límites de tensión en nudos y de los límites de potencias reactivas de los grupos generadores. La corrección de las violaciones de potencia reactiva tiene prioridad respecto a la corrección de las violaciones de límites de tensión de los nodos.
- 2) Cálculo de las sensibilidades de la variable con mayor violación con relación a las acciones de control.
- 3) Selección de las acciones de control más efectivas para corregir el problema de la variable con mayor violación seleccionada.
- 4) Cálculo de la magnitud de la variación de las acciones de control.
- 5) Actualización del nuevo punto de funcionamiento a través del flujo de cargas desacoplado rápido.

ANEXO 2.

Los lineamientos del código de operación que a veces “parecen” no cumplirse con rigor son los del siguiente numeral :

5-7- Control de voltaje.

- Los voltajes objetivo en los nodos de generación se determinarán de acuerdo con los resultados de las metodologías del Planeamiento Operativo Eléctrico.

- Los movimientos de taps en los transformadores con cambio bajo carga, se hacen de acuerdo a los resultados del Planeamiento Operativo Eléctrico de Corto y muy Corto Plazo.

- La disminución de voltaje se hace siguiendo las instrucciones del CND o del CRD, de acuerdo al siguiente orden de prioridades:

1) Ajuste de voltajes objetivo de generadores.

2) Cambio de posición de los taps de transformadores.

3) Desconexión de condensadores.

4) Conexión de reactores.

5) Desconexión de líneas de transmisión o distribución en horas de baja carga.

- El aumento de voltaje se hace siguiendo las instrucciones del CND o del CRD, de acuerdo al siguiente orden de prioridades:

1) Conexión de líneas de transmisión o distribución.

2) Desconexión de reactores.

- 3) Conexión de condensadores.
- 4) Cambio de posición de los taps de transformadores.
- 5) Ajuste de voltajes objetivo de generadores.

ANEXO 3.

Network Analysis

El sistema SINAUT Spectrum de Siemens permite, por medio de programas de software de análisis de sistemas eléctricos en tiempo real (*on line*) y en modo de estudio (*off line*), mejorar la toma de decisiones en cuanto a operación y supervisión se refiere. Este conjunto de paquetes de software es llamado Analizador de Redes (*Network Analysis - NA*) y consta de los siguientes programas.

1. Analizador de topología de la red (*Network Status Processor - NSP*)
2. Programador de barras (*Bus Scheduler - BS*)
3. Estimador de estado (*State Estimator - SE*)
4. Flujo de carga (*Dispatcher Power Flow - DPF*)
5. Analizador de contingencias (*Contingency Evaluation - CE*)
6. Corto Circuito (*On Line short circuit - OSC*)
7. Flujo de carga óptimo (*Optimal Power Flow - OPF*)

PROCESADOR DE ESTADOS DE RED (NSP)

La función NSP tiene por objeto analizar la conectividad de la red y la determinación de la topología del sistema de potencia, la cual es usada por las demás aplicaciones del NA. En este sentido, el NSP detecta cualquier cambio en la topología del sistema y se ejecuta automáticamente o a pedido del operador. Esta aplicación es necesaria para las demás

aplicaciones tanto en modo tiempo real como en modo de estudios. Las pantallas a las que el operador puede acceder son:

- Reducción de red y exportación de datos del NA
- Equipos desenergizados para el NA
- Asignación de subestaciones a las sub redes en el NA
- Posibles conexiones de las sub redes en el NA

ESTIMADOR DE ESTADO (SE)

Basado en un gran número de medidas redundantes de valores análogos provenientes de la red, el SE calcula las magnitudes y ángulos de voltajes así como las posiciones de los taps de los transformadores seleccionados, de tal forma que mejor cumplan con el real estado de la red.

- Computa y verifica límites incluyendo aquellos valores que no son medidos
- Detecta valores análogos críticos
- Mejora la calidad del monitoreo de la red
- Detecta, identifica y elimina datos erróneos

PROGRAMADOR DE BARRAS (BS)

La función de BS es proveer valores programados de potencia activa y reactiva para cargas, generadores e inyecciones, así como magnitudes de voltaje para generadores. Estos valores son usados por los programas de NA. Estos valores son basados en BDF (*Bus Distribution Factors* - Factores de distribución de Barras), modelos (*patterns*) de carga/generación así como programación de generación e intercambios. Los factores y los modelos son guardados para cada hora y para cada tipo de día. Los factores son actualizados usando los resultados del SE y aplicándoles técnicas de suavización exponencial. En tiempo real, los valores derivados del BS son necesarios para aquellas porciones de red que no son observables. En modo de estudio, los valores derivados del

BS pueden ser usados para estudiar situaciones especiales y poder correr el DPF, el CE y el OPF.

PRONOSTICADOR DE CARGA

Está basado en un análisis de regresión múltiple, estimación de los cuadrados de menor peso ("*Weighted Least Squares*") y el análisis de regresión adaptada basado en la teoría del filtro Kalman, que estima la carga total del sistema para un horizonte de estudio, de un día a una **semana**, en pasos de **cuartos de hora**.

DISPATCHER POWER FLOW

El despachador de flujo de potencia DPF es una utilidad de Modo de Estudio, que sólo puede ser ejecutada directamente por el operador. Sirve para examinar condiciones de flujo de potencia en estado estacionario, bajo una amplia variedad de condiciones hipotéticas, previamente definidas por el operador. En la operación de la situación de estudio, el operador puede utilizar una copia instantánea de la condición actual de la red; puede continuar con un caso de estudio existente, o extraer una copia a otro caso de estudio, o recuperar un caso salvado. Además, el operador puede superponer datos de tiempo real sobre históricos, en casos específicos. Finalmente, el usuario puede utilizar la función *Bus Schedule* (BS), para ajustar las condiciones de carga y/o realizar entradas manuales de equipos de suicheo o cambio de valores para inyecciones. Los resultados del flujo de potencia son visualizados por el operador en los diagramas unificares, resúmenes y máscaras. El flujo de potencia chequea la violación de límites, de modo, que alerta al operador de alguna violación.

EVALUACIÓN DE CONTINGENCIAS

El propósito de evaluación de contingencias CE, es determinar la seguridad del sistema de potencia bajo eventualidades específicas. Para cada contingencia, el CE simula la solución de un flujo de potencia de estado estacionario y chequea la red para aquellas condiciones fuera de rango. La evaluación de contingencias es aproximada a dos pasos:

- Selección de contingencias (*Contingencia Screening* – CS)

Entrega una clasificación de eventos a partir de la lista de contingencias. El CS permite clasificar las contingencias de acuerdo a las violaciones de los límites, debidas a las respectivas salidas de equipos operacionales. Para ese propósito, es llevado a cabo un flujo de potencia rápido (aproximado). Para redes pequeñas (p.e. menores a 200 barras) el CS puede ser obviado, ya que fácilmente todas las contingencias pueden ser analizadas por CA.

- Análisis de contingencias (*Contingency Análisis - CA*)

El CA chequea las contingencias de una lista clasificada, producida por el CS para las violaciones de límites (sobrecargas y condiciones anormales de voltaje). Las contingencias son chequeadas comenzando con la más crítica. Para cada una de ellas se lleva a cabo un flujo de potencia a.c. completo.

CALCULO DE CORTOCIRCUITO (OSC)

Calcula los valores de cortocircuito de cada uno de los elementos fallados y para cada punto de la red. Estos valores son comparados contra los valores de corriente de corto circuito en los interruptores conectados a la barra fallada. En tiempo real la función OSC provee de valores y reportes, que permiten al operador evaluar los posibles sobre esfuerzos actuales en interruptores, a los cuales podrían estar enfrentados. Mientras que en modo estudio, la función permite evaluar para diferentes casos, las corrientes de corto circuitos y hacer un análisis completo, que permite el ajuste de los diferentes equipos de protección.

