

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA SOLUCION DE COMPATIBILIDAD
ENTRE DISPOSITIVOS INTERCONECTADOS BAJO PROTOCOLO MODBUS**

ISRAEL RONCANCIO REYES

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

2007

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA SOLUCION DE COMPATIBILIDAD
ENTRE DISPOSITIVOS INTERCONECTADOS BAJO PROTOCOLO MODBUS**

ISRAEL RONCANCIO REYES

**Trabajo para optar al título de:
Ingeniero Electrónico**

**Director:
JOSE ALEJANDRO AMAYA PALACIO**

**Codirector:
WILSON MORENO
Coordinador de Diseño PTD-M SIEMENS S.A.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
2007**

DEDICATORIA

A Mi Padre, porque me enseñó el camino a seguir en esta oportunidad, pero me reservó un reto: descifrar cómo.

A Mi Madre, porque se ha quedado a terminar lo que su cónyuge inició. En su seno aún protege lo que algún día emergió de sí misma.

A Gabriel, porque me deja sin excusas para caer en la pusilanimidad.

A Rathziel, porque me compromete a entregar más de lo que recibo.

A Sandra, porque me ha enseñado lo que los hombres no sabemos por nuestra naturaleza inherente. Mi complemento en esta ocasión.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo es la conspiración conjunta de las acciones de muchas personas. El Autor expresa sus más sinceros agradecimientos a aquellas personas que consciente o inconscientemente colaboraron para tal fin:

A las personas que se ha dedicado este trabajo, por sus aportes más allá de lo tangible. Es quizás la aproximación más cercana de lo esencial.

Al profesor Jose Amaya Palacio, por su guía a lo largo de la ejecución de este trabajo. Su entusiasmo académico es su mejor herramienta en la ingeniería.

A los demás profesores de la Escuela, por las enseñanzas compartidas durante los últimos cuatro años de mi vida.

Al ingeniero Wilson Moreno, por su colaboración durante el desarrollo del proyecto.

A mis compañeros y amigos, por su valiosa retroalimentación. Son la visión en perspectiva del mundo que yo vivo.

A SIEMENS S.A. le agradezco la oportunidad de demostrar lo que he aprendido a hacer y los recursos que dispuso para tal objeto. A los ingenieros de PTD-M que me han enseñado la diferencia entre la Academia y el mundo real. Y en general agradezco a todas las personas que he conocido desde mi instancia en la universidad.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	16
1. PROTOCOLO MODBUS	18
1.1 INTRODUCCIÓN: MODELO OSI	18
1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROTOCOLO, CAPA DE APLICACIÓN: MODBUS APPLICATION PROTOCOL SPECIFICATION	22
1.3 CAPA DE ENLACE DE DATOS	27
1.4 CAPA FÍSICA	35
2. CONTROLADORES PROGRAMABLES	42
2.1 INTRODUCCIÓN: CONTROLADORES SIMATIC	42
2.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS CONTROLADORES SIMATIC	44
2.3 FAMILIA SIMATIC S7-300	49
2.4 MÓDULOS IMPLEMENTADOS EN EL PROYECTO	56
3. RELÉS MULTIFUNCIÓN	63
3.1 INTRODUCCIÓN	63
3.2 FAMILIA MULTILIN SR	64
3.3 SISTEMA DE COMUNICACIÓN	70
4. ESTÁNDAR ANSI/EIA/TIA 485	76
4.1 INTRODUCCIÓN: rs422 VS rs485	76
4.2 GENERALIDADES	77
4.3 CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS	79

5. SOFTWARE: STEP7 – ENERVISTA	84
5.1 INTRODUCCIÓN	84
5.2 COMPONENTES DE STEP7	85
5.3 COMPONENTES DEL PROGRAMA DE USUARIO	94
5.4 ENERVISTA LAUNCHPAD	94
6. DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN	104
6.1 INTRODUCCIÓN	104
6.2 CONFIGURACIÓN DE HARDWARE	104
6.3 DESCRIPCION DE LA SOLUCIÓN	108
6.4 PROGRAMA DE USUARIO	112
7. MONTAJE Y PRUEBA	134
7.1 MONTAJE GENERAL	134
7.2 DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS	137
7.3 RESULTADOS Y ANÁLISIS	141
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	141
BIBLIOGRAFÍA	144
ANEXOS	147

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Trama general Modbus	22
Figura 2. Transacción MODBUS libre de errores (arriba), con errores (abajo)	23
Figura 3. Definición del código de funciones público.	26
Figura 4. Diagrama de tiempos maestro / esclavo	28
Figura 5. Trama de mensaje Modbus modo RTU	29
Figura 6. Diagrama de tiempos Modbus modo RTU	30
Figura 7. Diagrama de flujo algoritmo generador de CRC	31
Figura 8. Trama de mensaje Modbus modo ASCII	33
Figura 9. Infraestructura de bus serial	36
Figura 10. Topología general y definición de señales configuración a dos hilos (2W)	37
Figura 11. Topología general y definición de señales configuración a cuatro hilos (4W)	38
Figura 12. Transferencia de datos estándar y de seguridad con PROFIsafe a través del mismo cable de bus.	47
Figura 13. Ejemplo de un sistema S7-300, compuesto por fuente, CPU y 3 módulos I/O	49
Figura 14. Sistema S7-300 montado sobre un riel DIN, detalle de conexión del bus posterior	50
Figura 15. Esquema comparativo de CPUs S7-300 estándar	51
Figura 16. Esquema de ampliación de un sistema S7-300 a través de módulos de interconexión de pasarela usando las referencias IM365 (izquierda) e IM360/361 (derecha).	55

Figura 17. Fuente de alimentación PS307 2A y CPU 315-2DP empleados en el proyecto.	58
Figura 18. Procesador de comunicaciones CP341	60
Figura 19. Módulo simulador SM374	62
Figura 20. Familia de relés GE Multilin	64
Figura 21. Relé GE Multilin SR 745	68
Figura 22. Topología general de red 485	77
Figura 23. Circuito de prueba de UL y curva I/V característica	78
Figura 24. Circuito de prueba de circuito abierto. $1.5V < V_{OD} < 6V$ y $ V_{OA} , V_{OB} < 6V$	80
Figura 25. Circuito de prueba de corriente de salida de cortocircuito. $ I_{OS} $ a tierra $< 250Ma$	80
Figura 26. Circuito de prueba para voltaje diferencial y de offset. $1.5V < V_{OD} < 5$ y $-1V < V_{OS} < 3V$	80
Figura 27. Circuito de prueba para voltaje diferencial con carga en modo común. $1.5V < V_{OD} < 5$	81
Figura 28. Circuito de prueba y forma de onda de la señal de salida con t_r =tiempo de subida o bajada, t_{ui} =tiempo de duración de un intervalo unitario. $ V_{OD} < 5V$.	82
Figura 29. Circuito de prueba de sensibilidad de entrada de un receptor 485	83
Figura 30. Componentes de la suite Enervista (software General Electric).	84
Figura 31. Ejemplo de programa en KOP	87
Figura 32. Ejemplo de programa en AWL	87
Figura 33. Ejemplo de programa en FUP	88
Figura 34. Ventana principal de la aplicación STEP7 HW Config.	89
Figura 35. Aplicación STEP7 NetPro. Redes configuradas: Industrial Ethernet, MPI y PROFIBUS	90

Figura 36. Administrador SIMATIC STEP7	93
Figura 37. Esquemas de programación lineal, dividida y estructurada en STEP7	94
Figura 38. Ciclo de trabajo de la CPU	97
Figura 39. Ventana de inicio Energista Launchpad	101
Figura 40. Ventana del Energista 469 Setup	102
Figura 41. Ventana auxiliar de HWconfig para configurar el protocolo Modbus en el CP 341	107
Figura 42. Diagrama unificar de la subestación	110
Figura 43. Rutina de la función FC32	116
Figura 44. Rutina del bloque de organización OB10	117
Figura 45. Diagramas en lenguaje KOP de los bloques de función FB7 y FB8	119
Figura 46. Rutina abreviada de la función FC13, los segmentos 4 a 17 son copias sucesivas del segmento 3 (no aparecen en la gráfica)	123
Figura 47. Rutina abreviada de habilitadores, dentro de FC21	125
Figura 48. Vista posterior del montaje de prueba	129
Figura 49. Vista frontal del montaje de prueba	129
Figura 50. Vistas de la unidad de prueba OMICRON	131
Figura 51. Procedimiento para configurar los puertos RS485 en un relé SR469.	132
Figura 52. Captura de pantalla con datos online de Energista y STEP7 simultáneamente	135
Figura 53. Distribución del error relativo para el esclavo 2	141
Figura 54. Distribución del error relativo para el esclavo 11	141

LISTA DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 1. Tablas principales del modelo de datos Modbus	24
Cuadro 2. Requerimientos de diagnóstico visual	40
Cuadro 3. Código de colores sugeridos para RS485	41
Cuadro 4. Especificaciones técnicas de la CPU 315-2DP	59
Cuadro 5. Especificaciones técnicas del CP 341	61
Cuadro 6. Ejemplo de mensaje con la función Modbus 03	71
Cuadro 7. Ejemplo de mensaje con la función Modbus 05	73
Cuadro 8. Operaciones a ejecutar disponibles con la función Modbus 05	73
Cuadro 9. Sensibilidad de entrada y voltajes resultantes en un receptor 485.	83
Cuadro 10. Tipos de lenguaje según IEC 61131-3 y su correspondencia en el entorno STEP7	85
Cuadro 11. Bloques de organización generales para CPUs S7-300	95
Cuadro 12. Áreas de memoria de la CPU	99
Cuadro 13. Configuración de hardware exportada desde STEP7	105
Cuadro 14. Tabla de símbolos del programa de usuario	112
Cuadro 15. Direcciones de registro almacenada en el bloque de datos DB22	117
Cuadro 16. Parámetros de operación del bloque de función FB8	120
Cuadro 17. Parámetros de operación del bloque de función FB7	120
Cuadro 18. Especificaciones técnicas cable de bus	127

Cuadro 19. Especificaciones técnicas del circuito de medida del relé SR469	133
Cuadro 20. Especificaciones técnicas del circuito de medida del relé SR760	133
Cuadro 21. Especificaciones técnicas del circuito de medida del relé SR745	134
Cuadro 22. Resultados de las pruebas a los Esclavos #2 y #11 con señales de tensión constantes (14.4kV) y variaciones en las señales de corriente.	136
Cuadro 23. Resultados de las pruebas a los Esclavos #2 y #11 con señales de corriente constantes (1200A) y variaciones en las señales de tensión.	139

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Resultados de las pruebas	148
Anexo B. Código Fuente Programa PLC	167

RESUMEN

1. TITULO

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA SOLUCION DE COMPATIBILIDAD ENTRE DISPOSITIVOS INTERCONECTADOS BAJO PROTOCOLO MODBUS*

2. AUTOR

ISRAEL RONCANCIO REYES**

3. PALABRAS CLAVES

Controlador programable (PLC), Modbus, Protocolo, Red, Relé multifunción.

4. DESCRIPCIÓN DEL CONTENIDO

Este documento ilustra brevemente el procedimiento mediante el cual se logra dar solución a un problema presentado durante la implementación de redes industriales. Se propone mostrar los pasos a seguir para interconectar un controlador programable (PLC) marca Siemens con relés multifunción marca General Electric a través de una red operando bajo protocolo Modbus, a pesar de ser Siemens un fabricante cuyos productos tradicionalmente se han enfocado en el uso de protocolo Profibus. Se hace uso de accesorios proveídos por el fabricante alemán y el desarrollo de cierta ingeniería local para establecer una interconexión lógica entre los equipos.

El problema planteado se aborda desde una perspectiva del modelo de referencia de interconexión de sistemas abiertos (modelo OSI) cuyo fin es dar orden al proceso de desarrollo de una red. De este modo, la solución se centra en la creación del programa de usuario que corre en el controlador y en la correcta configuración de las interfaces físicas de todos los dispositivos involucrados en el proyecto, haciendo uso de software propietario de los fabricantes citados.

Tras la elaboración de la solución se procedió a realizar el montaje y puesta en servicio de los equipos relacionados. Para verificar el correcto funcionamiento en las comunicaciones se comparó las lecturas ofrecidas por los relés con las lecturas transferidas al PLC a través de la red Modbus y se calculó el error relativo entre las lecturas. A partir de entonces, con base en las estadísticas arrojadas por las pruebas se concluyó que el enlace implementado constituye una fuente confiable de información para realizar las labores de supervisión remota desde el PLC.

* Proyecto de Grado

** **Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de ingenierías eléctrica, electrónica y telecomunicaciones.** Director: José Alejandro Amaya Palacio

ABSTRACT

1. TITLE

DESIGN AND INSTALLATION OF A COMPATIBILITY SOLUTION BETWEEN DEVICES NETWORKING UNDER MODBUS PROTOCOL*

2. AUTHOR

ISRAEL RONCANCIO REYES**

3. KEYWORDS

Programmable controller (PLC), Modbus, Protocol, Network, Multifunction relay.

4. CONTENT DESCRIPTION

This document provides basic guidelines needed to solve communications problems during industrial networks installation. Its main purpose is to show the steps which might be followed in order to link a Siemens programmable controller (PLC) with some General Electric multifunction relays using a Modbus protocol, despite being Siemens a manufacturer focused on making equipment using Profibus protocol. To communicate the devices, there were employed some accessories provided by Siemens and some local engineering developments were required.

The problem showed was treated under an open system interconnection model (OSI model) perspective for the purpose of having a reference during the network design process. Thus, the project was focused on developing the user program which runs the controller and it was demanded that all devices were correctly configured. This aim was accomplished by using Siemens and GE copyrighted software.

Once the user program was finished, it was transmitted to PLC's CPU and installation and commissioning were carried out. To verify communications operation, relays registers and PLC's Modbus inputs were compared and relative error between variables was calculated. Based on the statistics collected by these tests it was concluded that the link installed between Modbus devices was a trusted source for remote supervision tasks.

* Project of Degree

** Faculty of Mechanical Engineerings Physical. Electrical, electronic school of engineerings and telecommunications. Director: Jose Alexander Amaya Palace

INTRODUCCIÓN

La automatización de procesos ha tenido una gran acogida y expansión desde el advenimiento de la microelectrónica –que redujo el costo de los dispositivos electrónicos- pues permite que se aumente la productividad de las grandes industrias mientras se disminuyen los gastos operacionales, a partir de inversiones de rápido retorno y relativo bajo costo, en equipos que suelen ser actualizables y de larga vida útil.

Dentro de este contexto, SIEMENS AG y General Electric Inc. son empresas multinacionales que proveen gran cantidad de productos en el ámbito de la ingeniería eléctrica y electrónica dentro de los cuales se incluyen los controladores lógicos programables (PLC, por sus siglas en inglés) y los relés de protección, dispositivos ampliamente utilizados en la automatización de subestaciones eléctricas.

Dada la importancia de estos dispositivos dentro de los procesos de control y supervisión es necesario que establezcan comunicaciones con otras entidades externas. Sin embargo, esta conexión se realiza a través de diversos protocolos que resultan incompatibles entre sí generando problemas de interconexión.

Hasta la fecha, siempre que SIEMENS S.A. (específicamente la división de PTD-M) ha realizado grandes proyectos que requieren en algún momento la instalación y puesta en marcha de pequeñas redes de gestión de información operadas bajo protocolo Modbus, se encuentra con fallos en las interfaces de comunicación entre dispositivos teóricamente “compatibles” de marcas diferentes. La razón de estas fallas puede referirse a una configuración no adecuada de los dispositivos que conforman la red, a problemas con las interfaces eléctricas involucradas en la misma, a implementaciones arbitrarias del protocolo o a interpretaciones erróneas de la información que se transmite.

El objetivo de este proyecto es precisamente diseñar e implementar una solución a la incompatibilidad en la comunicación Modbus entre PLCs SIMATIC S7-300 fabricados por SIEMENS y relés de protección GE Multilin SR fabricados por General Electric, evidenciada durante la puesta en servicio de los sistemas de automatización de subestaciones eléctricas.

Este documento describe la referencia teórica sobre la que se apoya el proyecto -abordada y organizada teniendo como base el modelo de referencia de interconexión de sistemas abiertos postulado por ISO-, junto con el desarrollo propio de la solución que se planteó a nivel de programación y configuración de los equipos involucrados. También se expone el proceso de implementación de esta solución, los resultados exhibidos por los dispositivos y el respectivo análisis que surge a partir de los mismos.

1. PROTOCOLO MODBUS¹

1.1 INTRODUCCIÓN: MODELO OSI

Según los más recientes documentos publicados por Modbus-IDA, la implementación del protocolo en equipos industriales tales como PLCs, relés y demás se puede analizar desde dos perspectivas relacionadas pero mutuamente excluyentes; esta separación tiene sus bases en el Modelo de referencia de Interconexión de Sistemas abiertos (Modelo OSI: Open Systems Interconnection, creado por ISO) que pretende dar un orden determinado a la manera en que se desarrollan redes.

Por una parte, Modbus-IDA es un grupo independiente de proveedores y usuarios de dispositivos de automatización industrial que busca la promoción de la utilización del protocolo Modbus así como la evolución del mismo hacia arquitecturas más complejas para sistemas de automatización distribuidos dentro de múltiples segmentos del mercado actual. También provee la infraestructura para obtener y compartir información relevante acerca del protocolo, sus aplicaciones y certificación a fin de simplificar la implementación del usuario final, consiguiendo una reducción apreciable en los costos asociados.

Por otro lado, el modelo OSI establece el marco de referencia a seguir cada vez que se estructura una red, así, designa una jerarquía e inherentemente un orden definidos para los protocolos y tecnologías de red usados durante el establecimiento y mantenimiento de un enlace de comunicación.

De este modo existen 7 capas (jerarquías) diferentes sobre las que se clasifican estos protocolos y tecnologías; cada una realiza un subconjunto de las funciones necesarias para la comunicación confiando en la ejecución de las labores de la capa inferior y ofreciendo servicios a la capa superior subsiguiente, logrando una independencia total de cada una de las capas.

Es decir, los cambios o modificaciones que sufra una capa no alteran ni inducen cambios en las demás; ésta característica es una ventaja a la hora de implementar Modbus pues ofrece libertad total al área de ingeniería para que configure

¹ Manuales de referencia Modbus-IDA.org

adecuadamente cada capa (excepto la capa de aplicación) según sea necesario para cada desarrollo diferente. Las capas del modelo OSI sobre las que se despliega Modbus son las siguientes:

Capa Física (Capa 1)

Se encarga de las conexiones físicas de los dispositivos hacia la red, tanto en lo que se refiere al medio físico (medios guiados: cable coaxial, cable de par trenzado, fibra óptica y otros tipos de cables; medios no guiado: radio, infrarrojos, microondas, láser y otras redes inalámbricas); características del medio (p.e. tipo de cable o calidad del mismo; tipo de conectores normalizados o en su caso tipo de antena; etc.) y la forma en la que se transmite la información (codificación de señal, niveles de tensión/intensidad de corriente eléctrica, modulación, tasa binaria, etc.)

Su objetivo se centra en la transmisión de los bits de información a través del medio utilizado para la interconexión; se ocupa de las propiedades físicas y características eléctricas de los diversos componentes, de la velocidad de transmisión, de la direccionalidad del enlace (simplex, dúplex o full-duplex) y también de aspectos mecánicos de las conexiones y terminales, incluyendo la interpretación de las señales eléctricas. En algunos casos en que es necesario, contempla también los equipos repetidores dentro la red (por ejemplo, un concentrador en una red de computadores), ya que no involucran procesamiento de información de ningún tipo solamente proporcionan una elevación de niveles de tensión para combatir las interferencias y el desvanecimiento de la señal.

La función principal de esta capa consiste en transformar una trama de datos proveniente del nivel de enlace en una señal adecuada al medio físico utilizado en la transmisión, o viceversa (convertir señales en tramas de datos). Por ende, define el medio o medios físicos por los que va a viajar la comunicación, define las características materiales y eléctricas que se van a usar en la transmisión de los datos por los medios físicos y garantiza la conexión (aunque no la fiabilidad de ésta).

Capa de enlace de datos (Capa 2)

Se ocupa del direccionamiento físico, de la topología física y lógica de la red (bus, estrella, anillo), del acceso a la red, de la notificación de errores, de la distribución ordenada de tramas y del control del flujo. Proporciona una transmisión sin errores, es decir, un tránsito de datos fiable a través de un enlace físico, además,

crea y reconoce los límites de las tramas y resuelve los problemas derivados del deterioro, pérdida o duplicidad de las mismas. También puede incluir algún mecanismo de regulación del tráfico que evite la saturación de un esclavo (receptor) que sea más lento que el emisor, o viceversa.

El objetivo del nivel de enlace es conseguir que la información fluya, libre de errores, entre dos máquinas que estén conectadas directamente (servicio orientado a conexión). Para lograr este objetivo tiene que montar bloques de información (llamados tramas en esta capa, bits en la capa 1), dotarles de una dirección de nivel de enlace, gestionar la detección o corrección de errores, y ocuparse del control de flujo entre equipos (para evitar que un equipo más rápido desborde a uno más lento).

Cuando el medio de comunicación está compartido por más de dos equipos es necesario arbitrar el uso del mismo; es la situación de los buses de campo en donde toda la información se transmite a través de un grupo de conductores comunes a todos los dispositivos.

Esta tarea se realiza en el subnivel de acceso al medio en las redes de mayores prestaciones, no obstante, para el caso de Modbus no existe tal subdivisión pues no hay protocolo específico asociado al nivel de enlace de datos: el direccionamiento, las verificaciones, el control de acceso y demás se definen implícitamente en la implementación del protocolo durante la configuración de los equipos. Cuando los aparatos tienen capacidades de procesamiento y memoria, se implementan algoritmos de control definidos por el usuario con prestaciones bastante elementales.

En la capa de enlace, los datos se organizan en unidades llamadas tramas. Cada trama tiene una cabecera que incluye una dirección e información de control y una cola que se usa para la detección de errores.

Capa de aplicación (Capa 7)

Establece la plataforma común mediante el cual los programas se comunican con otros a través de la red. Los procesos que acontecen en este nivel son aplicaciones específicas capaces de proveer información útil para los programas desarrollados a nivel de usuario por medio de formato interno propio codificado de acuerdo a un protocolo preestablecido. Aunque normalmente el usuario final no tiene contacto directo con la capa de aplicación debido a la complejidad que este

hecho acarrea, sí interactúa con programas que a su vez interaccionan con la capa de aplicación.

En el caso específico que atañe al presente proyecto la capa de aplicación está definida por el *“Modbus application protocol specification”* publicado por Modbus-IDA, sin embargo como ya se dijo anteriormente el usuario no tiene acceso directo a la información generada por esta capa, para este acceso es necesaria la instalación de una HMI específica (Human Machine Interface, proveída por SIEMENS) o de un computador personal a través de STEP7 (software para el manejo de PLCs SIMATIC.)

Cuando no se cuenta con algunas de estas dos herramientas (HMI o PC), se podría acceder a cierta información por medio de una adecuada programación del controlador en donde refleje en sus salidas analógicas o digitales (y sus LEDs respectivos) algunos valores de tipo binario o byte almacenados en su memoria – en muchos casos estos datos provienen de otra entidad a través del puerto de comunicación.

No obstante por medio de ésta metodología no se tiene acceso a datos importantes como lo son fechas y horas de disparo de alarma de relés remotos e históricos de variables debido a que son almacenados en registros extensas (del orden de decenas de bytes) imposibles de visualizar correctamente con LEDs.

Las demás capas del modelo OSI son: Capa de red (Capa 3), Capa de transporte (Capa 4), Capa de sesión (Capa 5) y Capa de presentación (Capa 6), pero ninguna de ellas es implementada por el bus de campo tratado en el proyecto. Algunos avances desarrollados recientemente han logrado integrar redes bajo protocolos de más alto nivel y prestaciones tales como TCP/IP o HDLC con la capa de aplicación propia de Modbus que data de comienzos de los años 80.

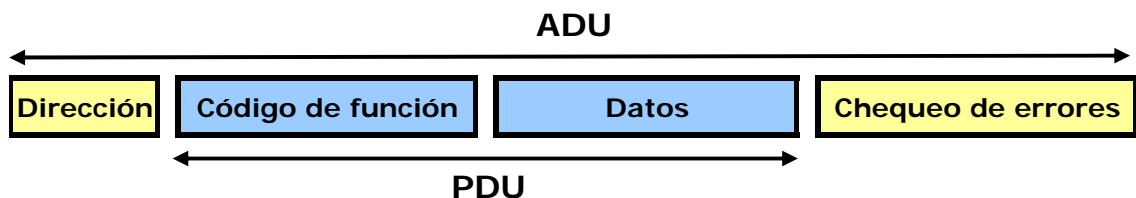
Como ya se había dicho previamente a esta ligera introducción al modelo OSI, actualmente Modbus-IDA es la entidad reguladora de Modbus a pesar de haber sido inicialmente Modicon quien lo desarrolló y sacó al mercado. Por eso, entre Junio de 2004 y Diciembre de 2006 publicó dos documentos que son considerados la guía de referencia actual que los proveedores y clientes deben seguir a la hora de implementar Modbus en productos y/o servicios; el primero de ellos titulado: *“Modbus application protocol specification”* define la capa de aplicación del protocolo y el segundo: *“Modbus over serial line”* define las capas física y de enlace de datos.

A continuación se describen brevemente las temáticas tratadas por los dos documentos a fin de establecer una base sobre la que se discutirán las implementaciones a que haya lugar durante el desarrollo del proyecto. Debe tenerse en cuenta que a lo largo de la historia del protocolo se han publicado diversas guías de referencia y por ende ha incorporado algunas modificaciones con respecto a la versión original.

1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROTOCOLO, CAPA DE APLICACIÓN: MODBUS APPLICATION PROTOCOL SPECIFICATION

La capa de aplicación Modbus define una unidad de datos de protocolo (PDU) independiente de las capas del modelo OSI que yacen por debajo del séptimo nivel, que a su vez es complementada por la información necesaria para correr Modbus sobre la capa física y de enlace inferiores que se estén utilizando; de este modo se crea la unidad de datos de la aplicación (ADU) en donde se consignan los datos necesarios para establecer comunicación a nivel de aplicación. Esta ADU es generada por el maestro que inicie una transacción y está conformada por la dirección, el chequeo de errores y el código de función y los datos (PDU). El protocolo Modbus establece el formato de petición hecha por el maestro.

Figura 1. Trama general Modbus

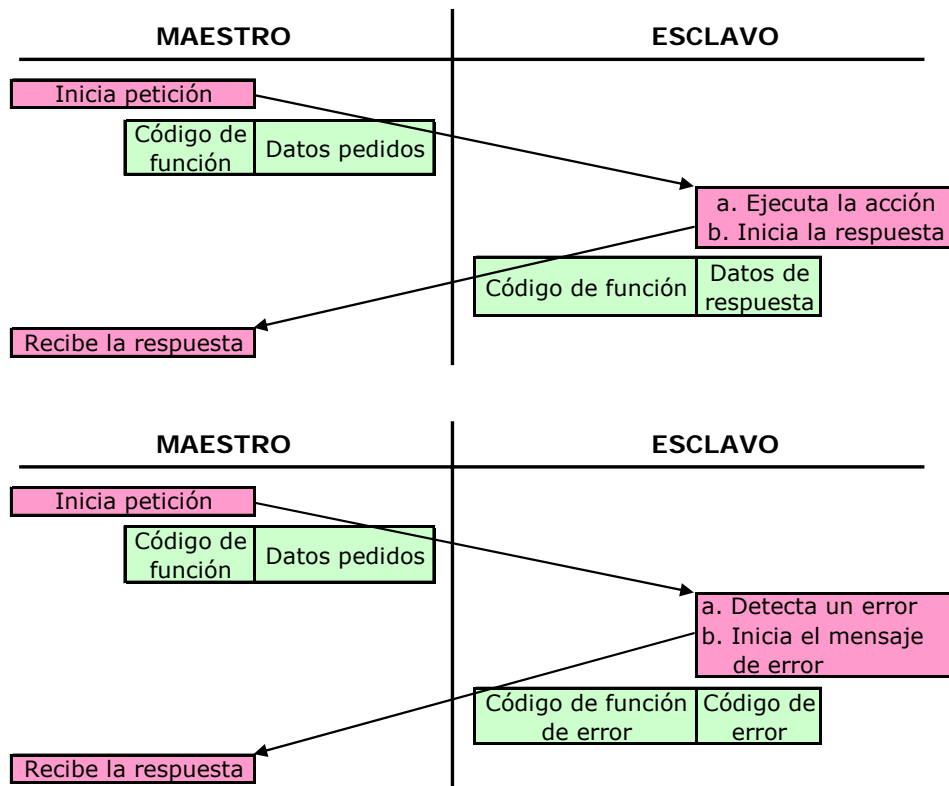


El campo de código de función se encuentra codificado en un byte (8 bits) en donde los valores admitidos pertenecen al rango de números decimales entre 1-255, cuando se inicia una petición por parte de una entidad maestro se utilizan los valores comprendidos por 1-127 para identificar la función a realizar, mientras que por su parte los números 128-255 se usan para notar los errores asociados a cada uno de los códigos de función permitidos. En este orden de ideas, cada vez que un maestro establece comunicación con un esclavo remoto, el campo de función le indica el tipo de acción a realizar y es posible inclusive la adición de un código de sub-función para definir múltiples acciones simultáneas. El valor "0" no es válido. El campo de datos de los mensajes enviados desde un maestro a un esclavo contiene información adicional que el esclavo utiliza para ejecutar la acción determinada por el código de función; puede incluir entre otros: direcciones

discretas o de registro, la cantidad de bytes a manejar o el conteo de bytes de datos en el campo actual. Este campo puede ser vacío o de longitud cero dependiendo del tipo de petición, en cuyo caso el valor del código de función especifica por sí solo las medidas que el dispositivo esclavo debe tomar. Cuando no hay errores durante la transmisión, se espera que el esclavo envíe la información pedida a través del bus, no obstante, cuando se producen el esclavo envía un código de función característico de modo que el maestro determine la acción a tomar.

Dado que sólo existen 127 códigos de función diferentes, el mensaje que lleva la petición tiene el bit más significativo del código de función en 0; para poder identificar errores se cambia el valor de este bit a 1 cada vez que ocurre uno. Por ende cada vez que hay una transmisión libre de errores, el esclavo siempre refleja el valor del código de función y cuando hay errores altera el bit citado. A modo de ejemplo se tendría entonces que 128d (1000 0000) no es valor válido y 136d (1000 1000) es el indicador de error cuando se intenta ejecutar fallidamente la función 8d.

Figura 2. Transacción MODBUS libre de errores (arriba), con errores (abajo)



Se debe aclarar en este punto que la longitud de la PDU no es ilimitada y por el contrario está forzada a tener el tamaño que ha sido heredado por la primera implementación de Modbus sobre pares seriales. Así, el tamaño máximo de la PDU es de 253 bytes si se tiene en cuenta que la longitud del código de función es 1 byte, la del código de redundancia cíclica es 2 bytes y el tamaño límite de la ADU es 256 bytes.

Otra característica heredada desde la primera revisión de la guía de referencia Modbus es la codificación de datos tipo *big endian* para cantidades numéricas mayores a 1 byte que consiste en el envío de los bytes de acuerdo a su nivel de "significancia"; es decir, el byte más significativo se envía (acción ejecutada por el maestro) y se almacena (acción ejecutada por el esclavo) primero y el menos significativo se envía y almacena de último.

Modelo de datos

El modelo de datos corresponde al esquema general de la organización interna de la información que maneja el protocolo, tiene como base una serie de tablas en donde reposan los datos necesarios para ejecutar las acciones de comunicación y el envío y recepción de los mismos. Estas tablas se fijan sobre el mapa de memoria de los dispositivos sobre los que se implementa el protocolo, en las direcciones que para tal fin se hayan designado. Las cuatro tablas principales se resumen en el siguiente cuadro.

Cuadro 1. Tablas principales del modelo de datos Modbus

Tablas principales	Tipo de objeto	Propiedades	Comentarios
Entradas Discretas	Bit	Sólo lectura	Este tipo de datos puede ser suministrado por un sistema de entrada/salida
Bobinas	Bit	Lectura - Escritura	Este tipo de datos puede ser modificado por un programa de aplicación
Registros de entrada	Palabra de 16 bits	Sólo lectura	Este tipo de datos puede ser suministrado por un sistema de entrada/salida
Registros de memoria	Palabra de 16 bits	Lectura - Escritura	Este tipo de datos puede ser modificado por un programa de aplicación

Las distinciones hechas entre entradas y salidas así como entre tipos de datos binarios (direcciones a 1 bit) y registros (direcciones a 16 bits) es una manera de

organización propia del protocolo y no obedece a ninguna orientación específica a una aplicación determinada.

Para cada una de las tablas indicadas el protocolo permite acceder y trabajar con hasta 65536 datos de cada tipo, mientras las operaciones de lectura y escritura están diseñadas para manipular múltiples datos consecutivos sin que su tamaño excedan el límite impuesto por el algoritmo que cada función implementa.

En este punto se debe aclarar que pese a que existe un límite para la cantidad de información que contiene la ADU (256 bytes), este valor es diferente a la cantidad de información que puede manipular una función durante la ejecución de una orden de petición (maestro) - respuesta (esclavo). Así, es posible que la información pedida por el maestro no exceda los 253 bytes de la PDU pero si la capacidad de procesamiento de la función, en cuyo caso se producirá un error y el subsiguiente mensaje por parte del esclavo.

El modelo de datos establece también que cada elemento dentro de los bloques está numerado desde 1 hasta n de acuerdo a la capacidad de memoria del equipo físico ($n \leq 65536$) a pesar de que la PDU direcciona los datos desde 0 hasta 65536. A modo ejemplo, si en la PDU de Modbus declaro que quiero escribir sobre el registro 27 del equipo remoto, este corresponde al registro 28 del bloque *holding registers* en el modelo de datos, que a su vez hará referencia a un registro en una dirección fija dentro del mapa de memoria del equipo.

Categorías de los códigos de función

Existen tres categorías diferentes de códigos de función: públicas, definidas por usuario y reservadas. Las primeras están caracterizadas porque están definidas y validadas por la comunidad Modbus-IDA que garantiza la unicidad de la función. Además, los textos que las documentan son de libre acceso y existen pruebas de conformidad realizadas por diversos fabricantes disponibles para consulta pública.

Por otra parte la segunda categoría hace referencia a aquellas funciones cuyas implementaciones son autoría y/o responsabilidad del usuario, de esta manera no se garantiza que sean únicas ni compatibles con otros equipos. Las funciones reservadas son aquellas que actualmente están siendo utilizadas por empresas desarrolladoras y no están disponibles para uso público. Cada categoría tiene su propio rango de numeración y en el caso de las funciones públicas están definidas y sub-categorizadas tal como la indica la tabla que se muestra a continuación.

Figura 3. Definición del código de funciones público

				Código de función		
				Código	Sub-código	Hex
Acceso a datos	Acceso a bits	Entradas físicas discretas, Bits internos o Bobinas físicas	Leer entradas discretas	02		02
			Leer múltiples bobinas	01		01
			Escribir bobina sencilla	05		05
			Escribir múltiples bobinas	15		0F
	Acceso a 16 bits	Entradas físicas de registros, registros internos o salidas físicas de registros	Leer registro de entrada	04		04
			Leer registros en memoria	03		03
			Escribir registro sencillo	06		06
			Escribir múltiples registros	16		10
			Leer/Escribir múltiples registros	23		17
			Enmascarar registros escritos	22		16
			Leer cola FIFO (First input First output)	24		18
	Acceso a archivos guardados		Leer archivo guardado	20	6	14
			Escribir archivo guardado	21	6	15
	Diagnóstico		Leer estado de error	07		07
			Diagnóstico	08	00-18 20	08
			Obtener contador de eventos de comunicación	11		0B
			Obtener registros de eventos de comunicación	12		0C
			Reportar identificación de esclavo	17		11
			Reportar identificación de dispositivo	43	14	2B
	Otras		Interfase de transporte encapsulada	43	13, 14	2B
Referencia general CANopen			43	13	2B	

1.3 CAPA DE ENLACE DE DATOS

Modbus es un protocolo serial Maestro-esclavo en el cual solamente un maestro puede estar conectado al mismo tiempo al bus de campo, mientras que puede haber uno o más (máximo 247) esclavos conectados simultáneamente; así, una comunicación bajo el protocolo siempre es iniciada por el maestro el cual hace una petición y el (los) esclavos(s) involucrados en ella responden con la información o con la acción requerida. Los nodos esclavos nunca comenzarán una transmisión, así como no nunca enviarán información sin antes haber recibido una petición del maestro de la red; cabe aclarar que el nodo maestro sólo puede iniciar una operación Modbus al tiempo.

Este nodo maestro puede iniciar una petición Modbus en dos modos: unicast y broadcast. El primer modo comprende la comunicación entre el maestro y un solo esclavo, de este modo la transacción Modbus consistiría en dos mensajes: el maestro inicia la transmisión con una petición, seguida por la respuesta del esclavo. Cada nodo esclavo debe tener una única dirección (de 1 a 247) dentro de la red con el fin de puedan ser llamados individualmente por el dispositivo maestro.

En modo broadcast el maestro hace un llamado a todos los esclavos del bus de campo. En este caso la transacción Modbus está compuesta exclusivamente por la petición del maestro, quien utiliza la dirección 0 que está reservada para intercambios de este tipo; implícitamente involucra la ejecución de una acción por parte de todos los esclavos y por esta razón el modo broadcast está disponible únicamente en las operaciones de escritura de variables de tipo binario o registros. Para este modo, todos los esclavos tienen que aceptar la función de escritura por el dispositivo remoto. Véase la Figura 1.4

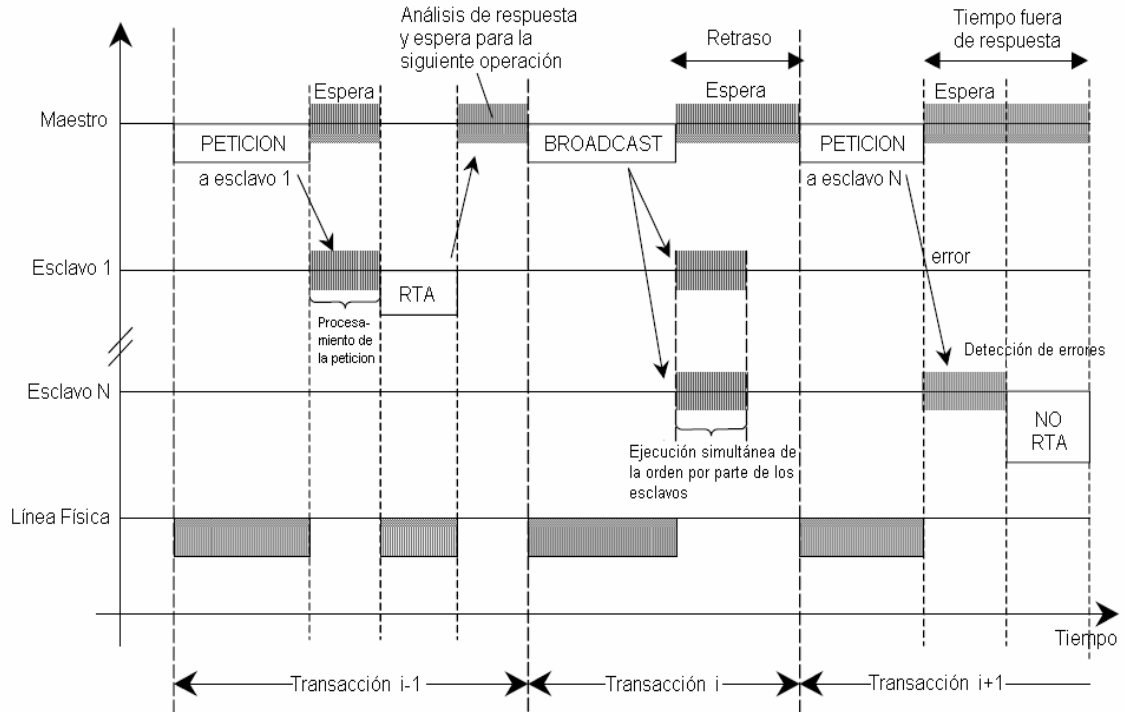
Modos de transmisión serial

Dado que estamos hablando de un protocolo de comunicación serial se debe definir el contenido de las tramas que serán transmitidos a través del par(es) de conductores, esto lo determina el modo de transmisión utilizado, para Modbus puede ser RTU o ASCII.

Para establecer una correcta comunicación todos los dispositivos conectados al bus deben estar configurados para trabajar bajo el mismo modo y puertos e

interconexiones seriales (capa 1). Aunque algunas aplicaciones y funciones específicas suelen requerir modo ASCII, éste debe ser tenido como una opción y los fabricantes deben garantizar que por defecto se use RTU, por ende es el modo más comercial implementado en ingeniería.

Figura 4. Diagrama de tiempos maestro / esclavo



Modo RTU

En modo RTU cada byte del mensaje contiene dos caracteres hexadecimales de 4 bits, su mayor ventaja estriba en tener una mayor densidad de caracteres lo que permite un mayor rendimiento que el modo ASCII utilizando la misma tasa de transmisión; la comprensión de esta característica será evidente cuando se traten los detalles del modo ASCII en el siguiente aparte.

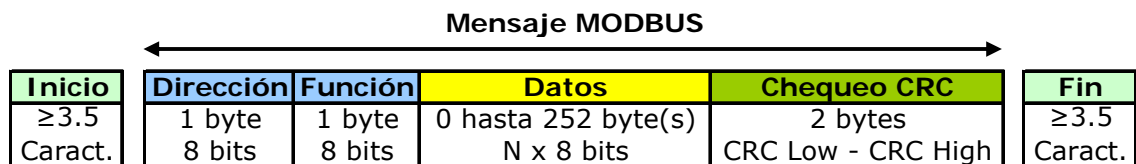
El formato de 11 bits para cada carácter transmitido consiste en 1 bit de inicio, 8 bits de datos (el bit menos significativo se envía primero), 1 bit de paridad y 1 bit de parada; cada uno de los byte de datos se codifica en bits binarios. Existen tres opciones para el bit de paridad: impar, par o ninguna, no obstante de acuerdo a las guías de referencia del protocolo todo equipo Modbus compatible tiene que

implementar al menos la opción par y tenerlo por defecto en su configuración inicial, además, por recomendación de los fabricantes y desarrolladores se debe contar también con la posibilidad de no paridad a fin de asegurar mayor compatibilidad entre marcas, en este caso se dispone de dos bits de parada.

Es importante aclarar que gracias al sistema de codificación (binario de 8 bits), cada byte de datos necesita exactamente de un carácter para ser transmitido (11 bits).

En RTU la trama está definida por la dirección de esclavo (1 byte), el código de función (1 byte), los datos (0-252 bytes) y el chequeo de redundancia cíclica CRC (2 bytes), tal como lo muestra la figura.

Figura 5. Trama de mensaje Modbus modo RTU



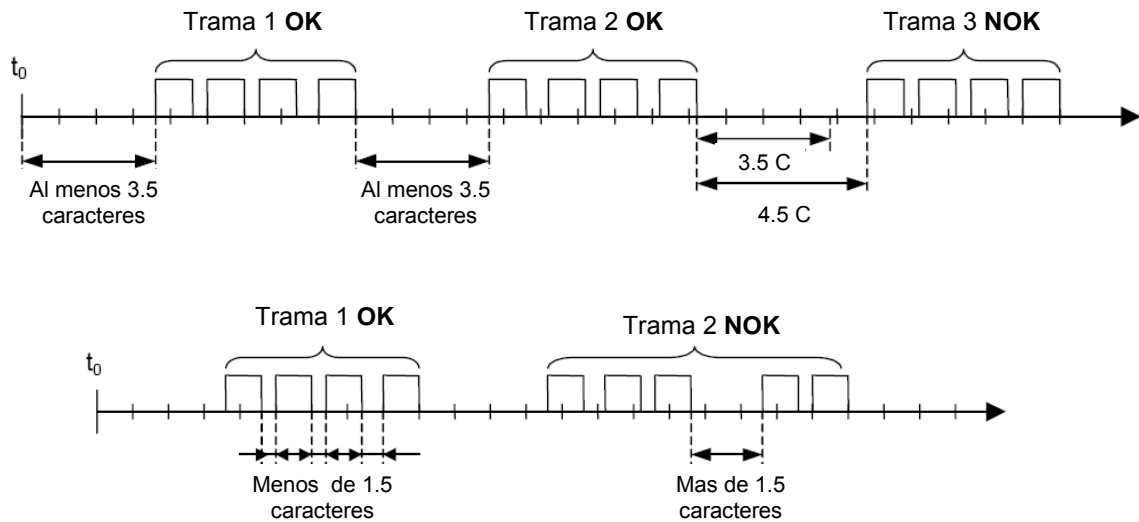
Se observa que existen indicadores de inicio y final conocidos que en este caso son intervalos de silencio (no transmisión) de al menos una longitud equivalente a 3.5 caracteres que permiten a todos los dispositivos reconocer cuando se ha iniciado una transmisión y cuando se puede dar por terminada la misma. Asimismo, cada equipo tiene que poseer la capacidad de detectar el envío parcial de mensajes y elaborar un mensaje de error como respuesta.

Cada mensaje dentro del protocolo se debe enviar como una cadena ininterrumpida de caracteres separados a lo sumo por un tiempo equivalente al empleado en la transmisión de 1.5 caracteres, cuando se supera este límite el mensaje es declarado incompleto y tiene que ser descartado por el receptor.

Debido al uso de temporizadores de 1.5 y 3.5 caracteres, la implementación del modo RTU acarrea consigo el manejo de gran cantidad de interrupciones que implican alta carga de procesamiento para la CPU cuando se transmite bajo de ratas de baudios elevadas.

Por consiguiente, para tasas iguales o inferiores a 19200bps se implementan temporizadores estrictos que regulen las interrupciones, pero cuando se excede este valor se recomienda el manejo de tiempos pre-establecidos; el valor fijado para el tiempo entre caracteres sería 750us y para el tiempo entre tramas sería 1.750ms.

Figura 6. Diagrama de tiempos Modbus modo RTU



Con respecto al chequeo de errores de trama, como se dijo anteriormente, en modo RTU se ejecuta un algoritmo CRC que genera un campo de 2 bytes agregado al final de la trama. El valor del CRC se basa en los bytes que componen los datos sin importar el tipo de paridad que se este utilizando -no se tienen en cuenta los demás campos de caracteres (dirección, función).

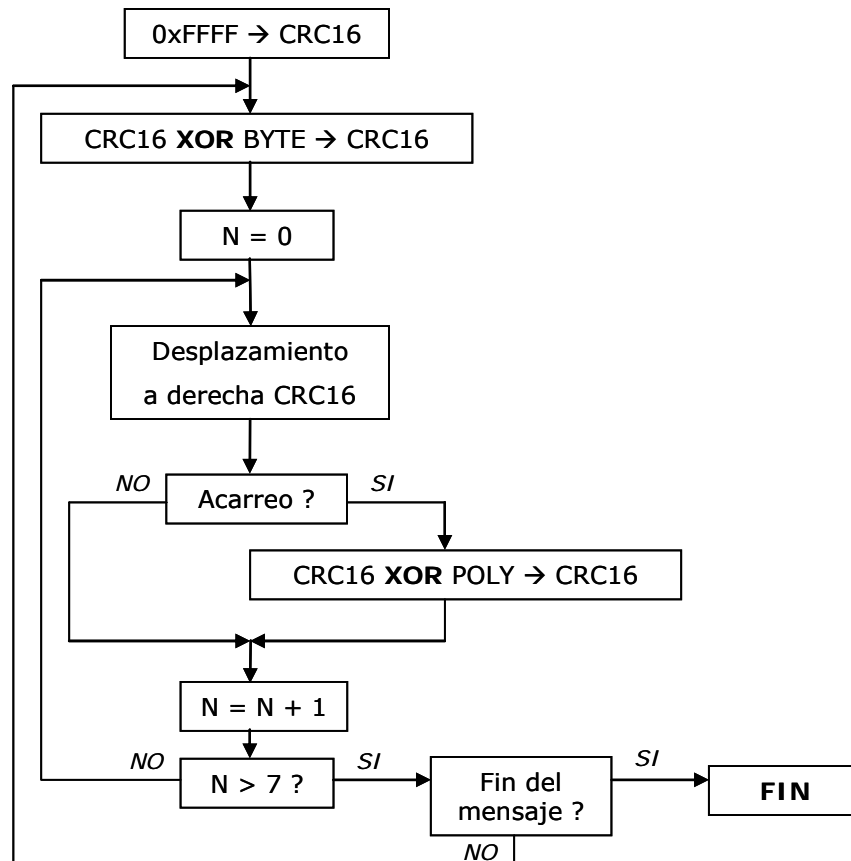
Una vez calculado por el dispositivo que realiza la transmisión el byte menos significativo del CRC se envía primero seguido del más significativo, completando el mensaje; una vez lo recibe otro dispositivo, se recalcula el CRC en el destino y se compara con el valor que viene adherido en la trama. Si los valores no concuerdan se descarta la trama y se envía un mensaje de error.

El cálculo del CRC comienza cargando un registro de memoria de 16 bits con 1's, seguido por la comparación sucesiva del registro con los datos de 8 bits (bytes) del mensaje, tal como se describe los párrafos siguientes.

En primera instancia se aplica una operación lógica OR exclusiva entre el registro y el byte, luego, el resultado se desplaza un bit en dirección al menos significativo (LSB) llenando con cero el más significativo (MSB). A continuación se analiza el valor del bit menos significativo (LSB) y no se ejecuta acción alguna si el valor es 0, en caso de obtener el valor 1 se realiza una segunda operación OR exclusiva entre el resultado y un valor fijado previamente (polinomio específico, $0xA001 = 1010\ 0000\ 0000\ 0001$). En ambos casos el último valor obtenido se guarda en el registro inicial.

Este proceso será repetido hasta que se alcancen ocho desplazamientos a la derecha (hacia LSB); después del último desplazamiento se inicia un nuevo proceso utilizando en esta ocasión el siguiente byte. El valor que quede en el registro de 16 bits luego de aplicar sucesivamente el algoritmo con todos los bytes de datos corresponde al CRC. Este proceso se puede resumir en el siguiente diagrama de flujo.

Figura 7. Diagrama de flujo algoritmo generador de CRC



Modo ASCII

En el modo ASCII cada byte del mensaje es transmitido como dos caracteres ASCII, su principal ventaja estriba en que permite que existen grandes intervalos de tiempo entre caracteres (hasta un segundo) sin que por esto hayan errores de transmisión. Este modo se utiliza cuando el enlace físico de comunicación o las características técnicas de los equipos no son aptas para las altas exigencias que el manejo de temporizadores e interrupciones que el modo RTU requiere.

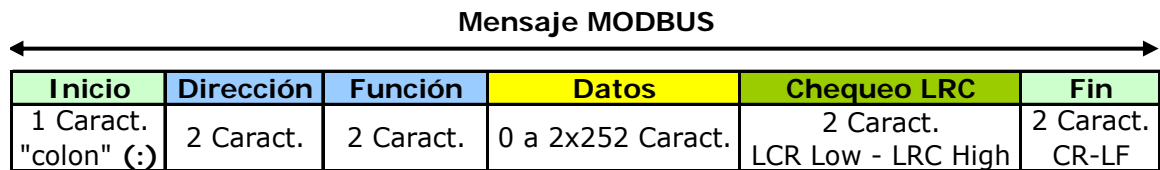
El formato de 10 bits para cada carácter transmitido consiste en 1 bit de inicio, 7 bits de datos (el bit menos significativo se envía primero), 1 bit de paridad y 1 bit de parada; cada uno de los byte de datos se codifica hexadecimalmente para luego ser convertido a ASCII. También existen tres opciones para el bit de paridad: impar, par o ninguna, no obstante de acuerdo a las guías de referencia del protocolo todo equipo “*Modbus compatible*” tiene que implementar al menos la opción par y tenerlo por defecto en su configuración inicial, además, por recomendación de los fabricantes y desarrolladores se debe contar también con la posibilidad de no paridad a fin de asegurar mayor compatibilidad entre marcas, en este caso se dispone de dos bits de parada.

A fin de explicar la mayor efectividad del modo RTU se debe aclarar que debido al sistema de codificación (hexadecimal-ASCII), cada byte de datos necesita de 2 caracteres para ser transmitido (14 bits, más los de inicio, paridad y parada).

De este modo ya no se habla en términos de bytes sino en términos de caracteres teniendo en cuenta que cada nibble (4 bits) de datos (información útil para el usuario final) implica la transmisión de un carácter (7 bits), el efectivo uso del canal físico se ve entonces diezmado pues ahora se requieren de dos caracteres para enviar 8 bits de datos mientras que con el modo RTU bastaba con sólo uno: se podría decir que el modo ASCII es aproximadamente la mitad de eficiente en comparación con el RTU para tasas de transmisión iguales.

En este caso la trama está compuesta por un campo de inicio (1 carácter), la dirección de esclavo (2 caracteres), el código de función (2 caracteres), los datos (2x252=504 caracteres), el chequeo de redundancia longitudinal (2 caracteres) y un campo de finalización (2 caracteres). En este caso se cuentan con indicadores de inicio y final de la trama que son bastantes explícitos y facilitan las tareas de procesamiento de la CPU.

Figura 8. Trama de mensaje Modbus modo ASCII



El chequeo de errores en la trama en este caso se ejecuta por medio de un algoritmo de redundancia longitudinal, en donde se tienen en cuenta el contenido del mensaje excluyendo los indicadores de inicio y final, sin importar el tipo de paridad determinado. En este modo si se incluyen los campos de dirección y función en el chequeo de trama, a diferencia del caso RTU.

El LRC consiste en un campo binario de 8 bits agregado por el dispositivo emisor justo después del último carácter de información e inmediatamente antes del indicador de final de trama. Se calcula sumando sucesivamente todos los bytes que conforman el mensaje antes de codificados por medio del código ASCII (14 bits por byte de información), sin tener en cuenta el acarreo generado y complementando a 2 el resultado final.

Luego, este byte es codificado a sus correspondientes dos caracteres ASCII (uno por cada nibble de 4 bits) y agregado en la trama. En el dispositivo de destino, se hace la decodificación ASCII-hexa y después se compara el valor actual con el valor recibido a través de la interfaz serial, en caso de discordancia se descarta la información recibida y se informa al origen sobre el error ocurrido.

En modo ASCII, los tiempos de proceso no son de relevancia y solo se debe cuidar que no transcurra más de un segundo entre la transmisión de dos caracteres consecutivos; si se tienen en cuenta que las más bajas tasas de transmisión seriales usadas en Modbus oscilan por el orden de los cientos de baudios se observa que puede transcurrir un tiempo equivalente al necesario para transmitir hasta 10 caracteres sin que se reporte un error en la conexión, ésta es la mayor fortaleza de este modo.

Chequeo de errores

La seguridad de los datos que se transportan bajo el protocolo Modbus se basa en dos tipos de chequeo: paridad (par o impar) que debe ser aplicada a cada

carácter, y chequeo de trama (LCR o CRC) que es aplicada al mensaje completo. Ambos chequeos son ejecutados por el dispositivo que emite los datos mientras el que responde verifica. En el caso de LCR y CRC, ya se explicó el principio de funcionamiento y el presente aparte no hará mención de los mismos.

Al maestro le es también configurado un *tiempo fuera* (del inglés time out) antes de abortar cualquier transacción iniciada, este tiempo debe ser seleccionado de modo que el intervalo le permita a un esclavo llevar a cabo el procesamiento de una orden del maestro (modo unicast). Luego, si un esclavo detecta un error en la transmisión, el mensaje es descartado y el esclavo no realiza acción alguna (no genera una respuesta al maestro); por ende, una vez expira el tiempo fuera el maestro entiende que existió un error y toma las medidas necesarias para solucionarlo, de este modo se garantiza que un llamado a una dirección de esclavo no existente puede ser detectada.

El usuario puede configurar los equipos para trabajar con paridad impar, par o ninguna y así determinar el valor del bit destinado para tal fin. Cuando se selecciona par o impar, se cuenta la cantidad de 1's lógicos presentes en cada carácter (7 bits para ASCII y 8 para RTU) y se asigna un valor al bit de paridad de tal suerte que el número de 1's presentes corresponda al tipo de paridad. En caso de manipularse los equipos con no paridad seleccionado, no se podrá realizar el chequeo de caracteres y se tendrá un bit de parada adicional en la posición del bit de paridad (2 bits de parada en total).

Por ejemplo, si se tienen los siguientes 8 bits correspondientes a un carácter en modo RTU: 1100 0101 X, cuando se elige operar con paridad par el valor que el esclavo selecciona para X es 0 pues así se mantiene un número par (4) de 1's; si por el contrario se procede con paridad impar el valor seleccionado será 1 porque permite alcanzar un número impar (5) de 1's.

La seguridad ofrecida por este método de chequeo de errores es reducida si se percibe que sólo permite detectar errores cuando un número impar de bits (1, 3, 5, 7) cambia de valor durante la transmisión.

Siguiendo con el ejemplo citado, supongamos que el maestro envía el carácter utilizando un chequeo de paridad impar (bits enviados: 1100 0101 1); si se experimentan interferencias o daños en la línea de transmisión que modifican el estado de los dos primeros bits y el esclavo recibe la siguiente secuencia: 0000 0101 1, el bit de paridad continúa teniendo un valor adecuado a pesar del cambio. En este caso no se lograría la detección del error.

1.4 CAPA FÍSICA

Cada nueva solución Modbus debe implementar una interfase eléctrica de acuerdo con el estándar EIA/TIA 485 (también conocido como RS485) a fin de establecer enlaces punto a punto y multipunto en una configuración de dos cables. Asimismo se puede contar con la posibilidad de implementar una configuración de cuatro cables por medio de la interfaz RS422, o una comunicación serial común con RS232.

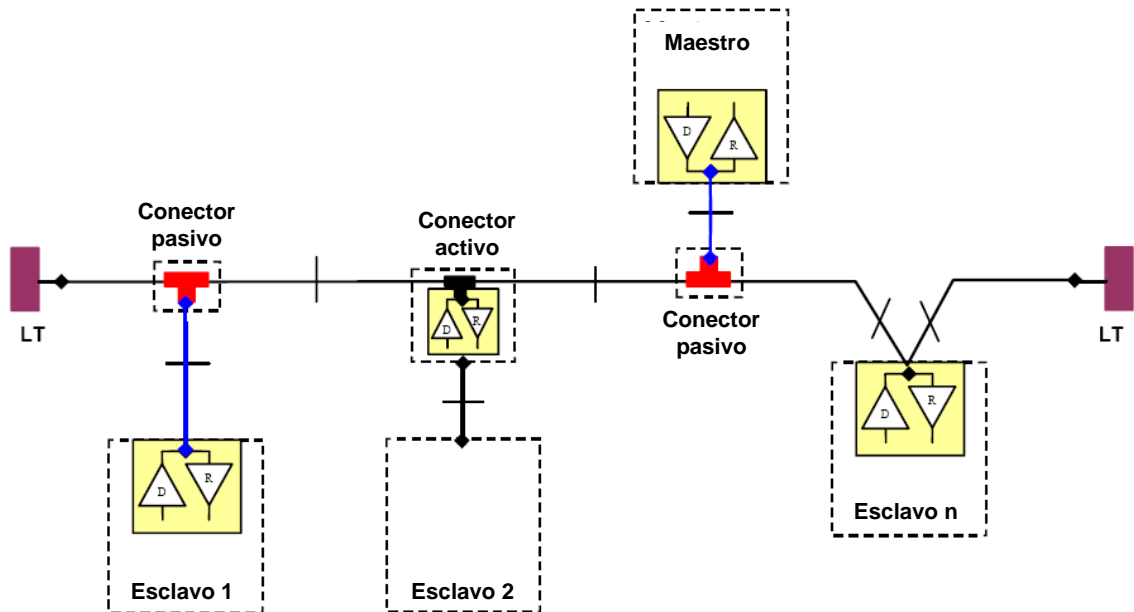
En la red Modbus el dispositivo y el (los) esclavo(s) se comunican siempre por medio de una línea serial pasiva, es decir, el conjunto de implementos que componen físicamente la red no ejecutan labores más allá del transporte de señales eléctricas sin ningún tipo de interacción o procesamiento adicional.

En este orden de ideas, todos los dispositivos se encuentran conectados a un cable principal constituido por 3 conductores de los cuales 2 forman un par trenzado (configuración de 2 hilos) por el cual son transmitidos los datos en ambas direcciones (ida y venida) regularmente a una velocidad de 9600 baudios. Cada equipo se puede conectar de tres formas distintas:

- Directamente, con un grupo de conductores de entrada y otro grupo de salida.
- Con conector pasivo, se enlaza en un punto del cable principal y forma una derivación al esclavo o maestro.
- Con conector activo, se enlaza en un punto del cable, ejecuta las labores de un transceiver y deriva hacia el equipo las señales ya procesadas.

Aunque se pueden establecer diferentes tasas de transmisión serial: 1200, 2400, 4800... 38400bps, 56Kbps, 115Kbps, por citar algunas, es obligatorio para todos los fabricantes permitir transmisiones a 9600 y 19200 baudios siendo la última el valor por defecto. Quien transmite debe respetar la tasa de baudios con un error máximo de +/-1% y quien recibe debe tolerar a lo sumo errores de +/-2%.

Figura 9. Infraestructura de bus serial



La figura precedente ilustra una visión general de la infraestructura de una red Modbus y las diferentes formas de conectar cada dispositivo al cable principal que constituye el bus de campo.

Se observan en cada extremo del cable principal los resistores de terminación de línea (LT) que son de carácter obligatorio. Éstos tienen un valor de resistencia equivalente al de los conductores que forman el cable y tienen como fin alcanzar la máxima transmisión de potencia de y hacia cada equipo conectado al bus. Además, dado que la reflexión en una línea de transmisión es el resultado de la discontinuidad en la impedancia de línea que una onda percibe conforme se propaga a través de los conductores, las terminaciones consiguen minimizar este efecto en ambas direcciones.

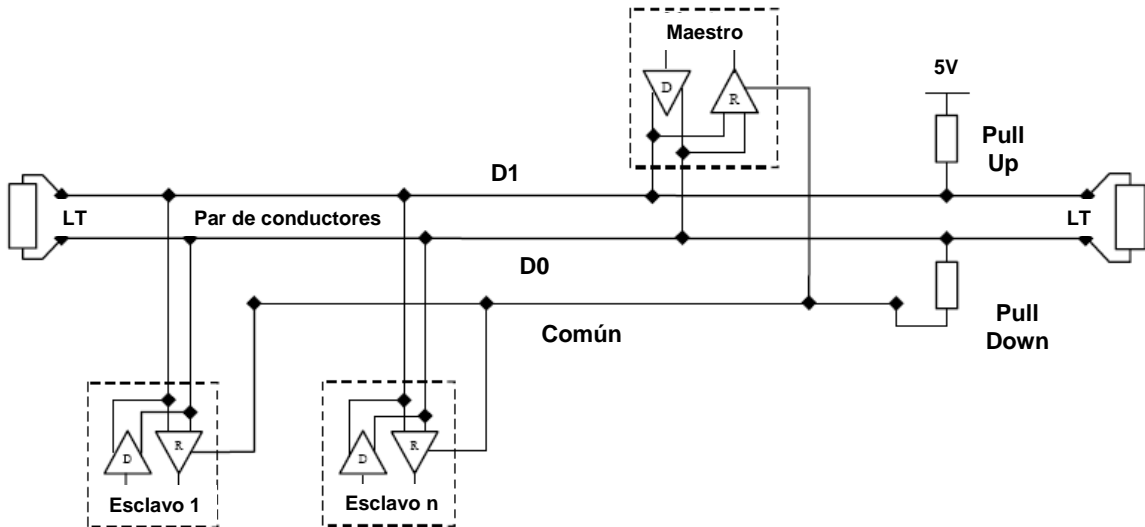
Configuración de dos hilos (2W)

Como se dijo anteriormente es recomendable que toda red Modbus se implemente en configuración de dos conductores siguiendo el estándar EIA/TIA 485.

En un bus 2W (2 wires) de este tipo existe siempre un tercer conductor que interconecta todos los equipos y establece una referencia eléctrica, de allí su

nombre *común*. En el bus sólo un dispositivo a la vez tiene derecho de transmitir y los demás le respetan.

Figura 10. Topología general y definición de señales configuración a dos hilos (2W)



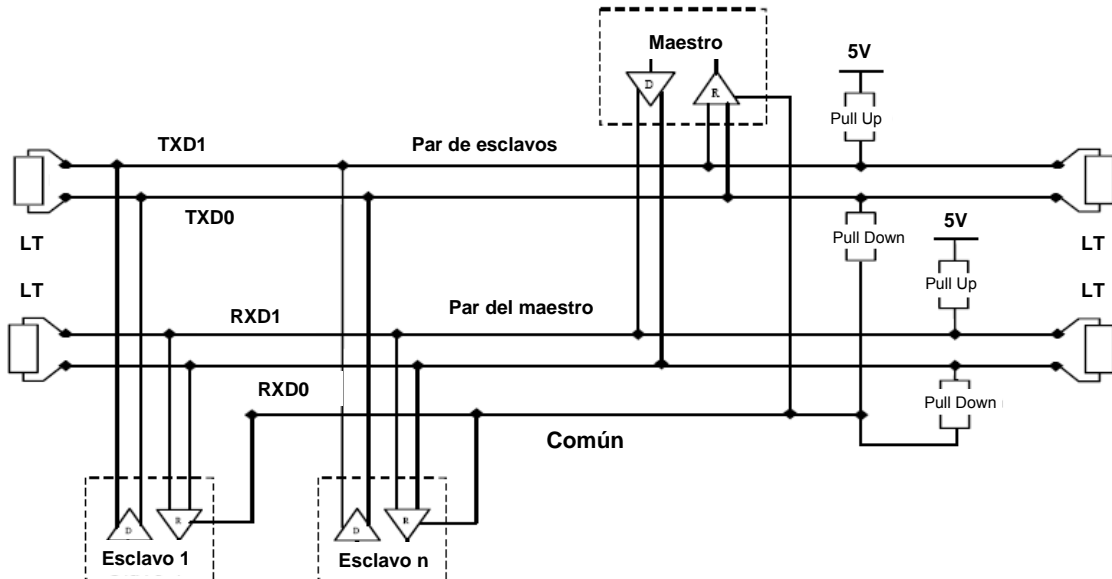
Señales necesarias		Uso	Nombre EIA/TIA 485	Descripción
Cable principal	Cable de derivación			
D1	D1	In/Out	B/B'	Terminal 1 del transceiver, Voltaje V1 (V1 > V0 para estado binario 1 [OFF])
D0	D0	In/Out	A/A'	Terminal 0 del transceiver, Voltaje V0 (V0 > V1 para estado binario 0 [ON])
Común	Común	-	C/C'	Señal común y opcional para alimentación

Configuración de 4 hilos (4W)

Opcionalmente Modbus se puede implementar a través de un bus de 2 pares (4 hilos) en donde cada par transporta información en un solo sentido. Existe así un par de conductores del maestro (RXD1-RXD0) por el cual se envían exclusivamente peticiones a los esclavos y otro par de conductores de esclavos (TXD1-TXD0) por donde son enviadas las respuestas al maestro. De este modo hay un bus dedicado para transmisión (sólo envía el maestro) y uno para recepción (sólo envían los esclavos). En esta configuración se cuenta también con un conductor adicional de referencia eléctrica, el *común*. Para operar a 4 hilos, los dispositivos deben tener instalado un receptor y un transmisor para cada par correspondiente (bus de maestro y bus de esclavos, respectivamente). Aunque este modo es comúnmente conocido como RS422, estrictamente hablando es

incorrecto el uso de este apelativo ya que el estándar RS422 no soporta la conexión de más un transmisor en un bus así que lo correcto es incluir la conexión a 4 hilos como parte de EIA485).

Figura 11. Topología general y definición de señales configuración a cuatro hilos (4W)



Señales necesarias		Uso	Nombre EIA/TIA 485	Descripción
Cable principal	Cable de derivación			
TXD1	TXD1	Out	B	Terminal 1 del emisor, Voltaje Vb (Vb > Va para estado binario 1 [OFF])
TXD0	TXD0	Out	A	Terminal 0 del emisor, Voltaje Va (Va > Vb para estado binario 0 [ON])
RXD1	RXD1	In	B'	Terminal 1 del receptor, Voltaje Vb' (Vb' > Va' para estado binario 1 [OFF])
RXD0	RXD0	In	A'	Terminal 0 del receptor, Voltaje Va' (Va' > Vb' para estado binario 0 [ON])
Común	Común	-	C/C'	Señal común y opcional para alimentación

Normativa general para configuraciones RS485 (RS232 opcional)

De acuerdo al estándar y las recomendaciones e instructivos señalados en la guía de referencia Modbus más reciente, se ha establecido ciertas normas que deben seguir las implementaciones Modbus en el aspecto de interfaz física (Capa 1 del

modelo OSI) cuando implementan configuraciones RS485 (la normativa no aplica siempre para RS232), estas comprenden:

- A. Siempre es posible conectar por lo menos 32 dispositivos en una red Modbus sin la utilización de un repetidor. De igual modo es posible el uso de los mismos para evitar la atenuación de la señal en redes grandes.
- B. Dependiendo de la capacidad de direccionamiento, la polarización utilizada en línea y en general condiciones técnicas es posible conectar más de 32 equipos, en cuyo caso es obligación de los fabricantes indicar esta posibilidad, el número máximo de equipos soportados y las condiciones bajo las cuales se logra este modo operativo.
- C. Una red Modbus sin repetidor está compuesta por un cable principal a lo largo del cual se conectan los dispositivos directamente o por medio de conectores que generan derivaciones cortas.
- D. La longitud de extremo a extremo del cable principal tiene que ser limitada y su valor máximo está determinado por la tasa de transmisión, el cable (calibre, capacitancia e impedancia característica), el número de dispositivos conectados y la configuración seleccionada (2 o 4 hilos). Por ejemplo, para una rata máxima de 9600 baudios con cable AWG26 (o más grueso) se puede llegar hasta 1000m.
- E. Las derivaciones hechas desde los conectores deben ser cortas y nunca superar los 20m de longitud. Si el conector es múltiple y soporta n derivaciones, cada una debe respetar una longitud máxima de $\frac{40}{n}$ metros.
- F. El cable común tiene que ser conectado directamente a una tierra de protección preferiblemente en un único punto para el bus entero. Generalmente este punto se ubica en el maestro o su conector.
- G. Las terminaciones de línea son siempre obligatorias entre los dos conductores D0-D1 en cada extremo, pero nunca se deben instalar más dos en un mismo bus (una en cada extremo), así como tampoco en las terminaciones de las derivaciones. Se sugiera como LT usar una resistencia de 150ohm (0.5W) o un condensador (1nF, 10V) en serie con una resistencia de 120ohm cuando hay polarización de línea.
- H. Cuando se utilizan interconexiones de tipo RS232 no se deben instalar terminaciones de línea, es sólo obligatorio con RS485 a 2 o 4 hilos.

- I. Cuando no hay actividad en la línea de transmisión serial, los conductores son susceptibles ruido externo o interferencia; para asegurar que el receptor se mantenga en un estado constante cuando no hay señales presentes, algunos equipos pueden requerir la polarización de la red.
- J. Todos los fabricantes tienen que informar si el dispositivo requiere de polarización en la red y si puede soportarla.
- K. En caso de que uno o más dispositivos requieran de polarización de línea, un par de resistencias debe conectarse en el grupo de conductores RS485:
 - 1 resistencia de *Pull Up* hacia una fuente de 5V en el circuito de D1.
 - 1 resistencia de *Pull Down* hacia común en el circuito de D0.
- L. El valor de las resistencias nombradas anteriormente tiene que oscilar entre 450 y 650ohm, siendo mayor el número de equipos conectados al bus entre mayor sea el valor de resistencia y viceversa.
- M. La polarización de los conductores tiene que ser implementada en una única ubicación a lo largo de todo el bus, regularmente se ubica en el maestro o su conector.
- N. El número máximo de dispositivos permitidos que se pueden conectar al bus de la red cuando se polariza la línea es 4 veces menor con respecto a una red Modbus sin polarización.
- O. Para efectos de diagnóstico visual, el estado de las comunicaciones y el estado del dispositivo tiene que ser indicado por medio de LEDs tal como lo muestra la tabla.

Cuadro 2. Requerimientos de diagnóstico visual

LED	Nivel de obligatoriedad	Estado	Color recomendado
Comunicación	Obligatorio	Encendido (ON) durante recepción o envío de tramas.	Amarillo
		(2 LEDs para recepción y envío de tramas, o 1 LED para ambos casos)	
Error	Recomendado	Encendido (ON): Falla interna	Rojo
		Parpadeo: Otras fallas (Fallas de comunicación o Error de configuración)	
Estado del dispositivo	Opcional	Encendido (ON): Equipo energizado	Verde

P. Para minimizar errores en el cableado se recomienda la utilización del siguiente código de colores en configuraciones RS485.

Cuadro 3. Código de colores sugeridos para RS485

Configuración	Nombre de la señal	Color recomendado
2W-4W	D1- <i>TXD1</i>	Amarillo
2W-4W	D0- <i>TXD0</i>	Café
2W-4W	Común	Gris
4W	<i>RXD0</i>	Blanco
4w	<i>RXD1</i>	Azul

- Q. Los cables utilizados en una red Modbus tienen que ser apantallados de tal suerte que el apantallamiento se conecte a tierra de protección en uno de los extremos del mismo, o en su defecto a la carcasa de un conector cuando se presente el caso.
- R. El calibre del cable debe ser escogido de modo que maximice el número de dispositivos permitidos en la red. Para redes Modbus es siempre suficiente un calibre AWG24. Por otro lado, los cables categoría 5 pueden operar redes Modbus siempre y cuando su longitud no exceda los 600m.
- S. La impedancia característica de los pares de conductores se sugiere, debe ser mayor a 100ohm especialmente para operación a ratas superiores o iguales a 19200 baudios.

2. CONTROLADORES PROGRAMABLES²

2.1 INTRODUCCIÓN: CONTROLADORES SIMATIC

Para poder automatizar máquinas e instalaciones de forma rentable y flexible, se requieren soluciones óptimas para cada ámbito de aplicación. Esto ocurre tanto en el sector de construcción de maquinaria o instalaciones como en la tecnología de fabricación o de procesos y en la fabricación en serie o de piezas únicas. Como respuesta a la creciente presión de la competencia internacional, en estos momentos es importante que las empresas se concentren y optimicen sus actividades centrales, así la adopción de una estrategia a medio y largo plazo centrada en la integración de proyectos de automatización es un factor clave para lograr una posición de ventaja en el mercado.

Los mercados hoy en día son más dinámicos, y los ciclos de vida de los productos son cada vez más cortos por consiguiente. Esto impone a los constructores de maquinaria e instalaciones y a los fabricantes de dispositivos en general unos requisitos siempre crecientes (como el aumento del rendimiento de la producción, el cumplimiento de las normas de seguridad y calidad, la optimización del diagnóstico y la facilidad de uso y mantenimiento) para todos los tamaños y variantes de máquinas y/o equipos. Para aumentar el rendimiento productivo de las máquinas, hay que reducir sus tiempos de ciclo (hacerlas más rápidas) o equiparlas con nuevas funciones; por otro lado, para seguir siendo competitivo, hay que minimizar los costos de diseño y producción, así como los tiempos de desarrollo y entrega.

Dentro de este contexto es claro que la industria en general requiere de una solución que cubra las necesidades y falencias presentes y que, es la implementación de sistemas de automatización la salida a esta problemática. He aquí la razón de la creciente oferta de nuevos dispositivos y sistemas, así como la elevada demanda de productos y servicios dentro de ésta área de la ingeniería electrónica (aunque en realidad es una rama interdisciplinaria con las demás ingenierías).

² Manuales de referencia SIEMENS AG

Como líder y proveedor mundial de equipos eléctricos, Siemens AG tiene una vasta línea de productos y servicios para satisfacer las necesidades de los clientes en todos los aspectos y para todas las aplicaciones de la industria, desde la entrada de insumos hasta la salida de mercancía. El paquete de soluciones se enmarca bajo el concepto de TIA Automatización Totalmente Integrada (del inglés, Totally Integrated Automation) y comprende sensores, medidores, aparatos de maniobra, controladores y hasta software y sistemas de supervisión y control, con una compatibilidad única en su género que otorga a los clientes una interacción sin problemas entre todos los productos y sistemas –incluso a medida que vayan apareciendo nuevas generaciones. De tal suerte que la inversión en automatización de procesos está protegida (por medio de soporte y mantenimiento) y además siempre existirá la posibilidad de incorporar adelantos futuros.

El objetivo del presente capítulo es familiarizar al lector con el equipo a fin de que se comprendan las altas prestaciones que puede otorgar en la industria no sólo en el ámbito de comunicaciones industriales (tema central del proyecto) sino también de su papel protagonista en los sistemas de automatización de procesos.

Así que se discutirá a grosso modo las características principales de los controladores SIMATIC (marca registrada de Siemens) y las ventajas que tienen sobre otras alternativas de automatización disponibles en el mercado. Las siguientes son algunas particularidades destacables de los controladores SIMATIC:

- Mayor capacidad de producción gracias a las CPU de alta velocidad incorporada, con capacidad de ejecución de tareas de comunicación y funciones aritméticas complejas.
- Fácil implementación de otras funciones, como por ejemplo funciones tecnológicas para control de posición, captura y almacenamiento intermedio de datos de calidad o conexión a un sistema de ejecución de manufacturas MES (en inglés Manufacturing Execution System).
- Mayor flexibilidad gracias a la automatización abierta en PC industriales robustos. Existen ciertos controladores que corren sobre un plataforma Windows XP embedded a fin de ofrecer las prestaciones del sistema operativo de Microsoft mientras garantizan alta inmunidad al ruido electromagnético y la

operabilidad en condiciones industriales (altas temperaturas y humedad, polvo y atmósferas contaminadas) ya que no poseen partes móviles.

- Máquinas más compactas gracias a las reducidas dimensiones de los circuitos (integración a muy alta escala), a las numerosas funciones integradas y al funcionamiento sin necesidad de armario eléctrico (se montan sobre riel metálico).
- Ahorro de tiempo y dinero en el montaje y la puesta en marcha gracias a la automatización descentralizada.
- Cumplimiento de exigentes requisitos de seguridad con un único sistema para aplicaciones estándar y de seguridad. En general, SIEMENS procura obtener certificaciones DIN, EN, IEC y ANSI para todos sus productos.
- Mayor disponibilidad de la instalación y las máquinas gracias a las configuraciones tolerantes a fallos y a las potentes funciones de diagnóstico. Por lo general, siempre se puede programar los PLCs con rutinas de excepción a fin de que sepan las medidas a tomar en caso de operación indeseada.

El presente proyecto incorpora un controlador lógico programable (PLC) marca Siemens AG que lleva a cabo el rol de maestro dentro de la red bus Modbus y es además el dispositivo que lleva a cabo las labores de control, supervisión o monitorización dada su mayor capacidad de procesamiento. El PLC hace parte de la familia S7-300 y es el equipo modular más pequeño que ofrece el fabricante.

2.2 CARACTERISTICAS DE LOS CONTROLADORES SIMATIC

En general la gama completa de controladores SIMATIC está dotada de ciertas propiedades comunes que determinan las ventajas y el punto fuerte de la marca frente a la competencia del mercado. Se compone de controladores modulares, sistemas de automatización embebida y controladores desde PC; los primeros hacen referencia a los dispositivos comúnmente llamados PLCs, manejan firmware y software propio y su funcionamiento está orientado a la interacción con las variables del proceso en planta. Son la elección más común en el mercado ya que su diseño y funcionalidad están desarrollados para aplicaciones industriales específicamente, no obstante se citaran las demás opciones a implementar.

Los sistemas de automatización embebida son controladores basados en PC, tienen instalado la versión *embedded* de Windows XP permitiendo al usuario contar con un equipo que haga las tareas de un PLC pero que adapte las funcionalidades de un computador personal: almacenamiento masivo –del orden Megabytes, procesamiento de datos de alta velocidad –más de 400Mhz, sistema operativo y puertos universales de comunicación serial –USB. Las numerosas ventajas que tiene esta alternativa son castigadas con el elevado costo de adquisición, por eso, existe la posibilidad de implementar controladores desde PC, opción que permite la utilización de computador personal corriente en un proceso industrial por medio de la adaptación de hardware a través de una tarjeta PCI o usando los puertos de comunicación seriales estándar (RS232C). Actualmente el mercado de automatización y control distribuye productos similares a los SIMATIC de bajo costo y calidad no garantizada, hecho que tiende a castigar la participación de Siemens AG en el mercado. No obstante, las prestaciones que los productos proporcionan al usuario final entre las que se destacan: alta disponibilidad, diagnóstico, funciones de seguridad y CPU en modo isócrono, permiten a la marca mantener una posición de liderazgo en la región Andina.

Diagnóstico.

El objetivo principal de la implementación de sistemas de automatización recae en el deseo de la reducción de costos de producción y en el aumento de la productividad de las industrias. Para lograr tal fin, se requiere que la maquinaria utilizada permanezca en condiciones tales que pueda ofrecer a la planta su máximo de rendimiento y por ende las labores de mantenimiento son imprescindibles. Se procura prevenir y/o solucionar cuanto antes las anomalías para evitar costosos tiempos de parada, con el menor gasto posible en personal.

Se precisa entonces mantener información verídica y actualizada acerca del estado del proceso para actuar en caso de alguna irregularidad, siendo de vital importancia para esta acción la consecución de un diagnóstico inequívoco de averías y errores.

El diagnóstico de sistema SIMATIC comprende funciones de detección de averías de hardware y errores de programación, que se utilizan durante el montaje y la puesta en marcha de la instalación. Durante el funcionamiento es posible realizar análisis detallados de fallos y errores utilizando la programadora (PG) o el PC. Para el diagnóstico de averías de hardware, están disponibles las siguientes funciones:

- Diagnóstico general: Permite el acceso rápido al estado (On-Off-Falla) de cada uno de los módulos que componen el sistema.
- Diagnóstico de detalle: Ofrece información específica de las condiciones de operación de los módulos cuando están activos o acerca de los errores cuando se encuentran en falla. Existen errores generales que pueden exhibir todos los módulos (falla programación, dirección incorrecta) y errores específicos relacionados con sus módulos correspondientes (falla en dispositivo remoto → CPs, valor fuera de rango establecido → Als, cable pasarela desconectado → IMs)
- Estado/forzado: Monitoriza el estado de variables de entrada/salida o fuerza sus estados a valores preestablecidos para efectos de mantenimiento o puesta en marcha. No se hace necesario, por ejemplo, que un operario llene un tanque de insumos para observar la reacción del PLC ante el disparo de ese evento –usando un transmisor o cualquier medidor de nivel.

Se debe aclarar que todos los errores se registran en el búfer de diagnóstico contenido en la CPU y su visualización es posible a través del software de manejo de PLCs STEP 7. En caso de errores críticos se pasa a STOP la CPU y se desactivan todas las señales de salida de la periferia.

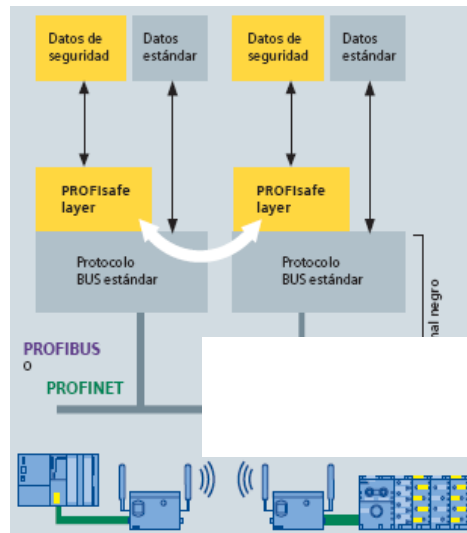
Seguridad

Los accidentes y daños derivados de fallos en máquinas o instalaciones deben evitarse en la medida de lo posible, por ello se hace cada vez más rigurosa la normativa legal sobre seguridad en el puesto de trabajo y sobre la protección medio ambiental. Hoy en día se aplican para ello con frecuencia productos y sistemas diferentes para las funciones de seguridad (componentes electromecánicos) y las tareas estándar del proceso (controladores). Durante la instalación de los sistemas de seguridad se utiliza cableado convencional o buses de seguridad especiales, incrementando por un lado los gastos de cableado y por otro los trabajos de ingeniería. Así el resultado es un diagnóstico de fallos y errores más lento y la disminución de la disponibilidad.

Por ello los fabricantes de máquinas y los operadores de instalaciones y plantas transfieren a los componentes de automatización cada vez más tareas de seguridad. Es decir, la ausencia de daños para personas, máquinas y medioambiente depende del funcionamiento perfecto de los sistemas de

automatización. Por esta razón, a los sistemas electrónicos de seguridad se imponen los mismos altos requisitos que a componentes de seguridad. Deben estar en condiciones de dominar tanto fallos sistemáticos como aleatorios.

Figura 12. Transferencia de datos estándar y de seguridad con PROFIsafe a través del mismo cable de bus.



Existen así las versiones *SIMATIC Safety Integrated* de seguridad positiva que actúan cuando aparece un error o fallo llevando el proceso de forma flexible a un estado seguro y lo mantienen en el mismo. Tanto PROFIBUS como PROFINET cuentan con la posibilidad de expansión con el perfil PROFIsafe para la comunicación de seguridad.

De este modo, la comunicación estándar y la comunicación de seguridad se pueden realizar a través de un solo cable de bus estándar (Ver figura, "Canal negro" significa que la comunicación de seguridad es independiente del sistema de bus y de los componentes de red subordinados). Con PROFINET también queda garantizada la comunicación de seguridad para redes inalámbricas.

Los controladores *Safety Integrated* cuentan con todas las normas internacionales importantes: IEC 61508 (hasta SIL 3), IEC 61511, EN 954-1 (hasta categoría 4), NFPA 79-2002 y NFPA 85.

Alta disponibilidad

Los fallos o averías de los sistemas de automatización provocan, por un lado, tiempos de parada improductivos y costosos y, por otro, elevados costos de re arranque. Gracias a una estructura redundante, es posible instalar sistemas de automatización de alta disponibilidad con el objeto de continuar con el proceso de producción incluso si se produce un fallo. El principio de operación se basa en la conmutación del sistema principal al de reserva ante un imprevisto o emergencia.

La solución se puede implementar por medio de software o hardware, en ambos casos se necesitan dos CPU similares. El primer caso es el más sencillo (disponible para la familia S7-300) ya que consiste en la programación idéntica de las CPUs acompañada de un procedimiento de conmutación. El segundo caso (disponible sólo para la familia S7-400) es más complejo pero más efectivo debido a que ejecuta una sincronización en tiempo real de la información que poseen las CPUs logrando una operación sin pérdida de información ni retrasos –es ideal para procesos de tiempos críticos. Cuando la estación maestro sale de operación, la reserva retoma el proceso exactamente en el mismo punto en que abandono la maestro y prosigue sin causar demoras.

CPU en modo isócrono

Al igual que un microcontrolador, un PLC es un dispositivo basado en microprocesador y por ende poseen un ciclo de trabajo determinado. Durante este ciclo se generan las imágenes de proceso, se ejecutan los comandos de control propios del sistema operativo y se corren las rutinas programadas por el usuario.

Por modo isócrono se entiende el acoplamiento síncrono de la adquisición y emisión de señales por parte de la periferia y la transferencia de señales a través de interfaces de comunicación. Con ello se obtiene un sistema que capta y procesa sus señales de entrada y emite las señales de salida a intervalos de tiempo constantes. De este modo, se garantizan unos tiempos de reacción del proceso definidos y reproducibles con precisión, así como el procesamiento equidistante y síncrono de señales en la periferia. El procesamiento es equidistante en la medida en que opera en lapsos iguales y síncrono porque se generan imágenes de proceso coherentes debido a la actualización simultánea de las entradas o las salidas del sistema.

Servidor WEB integrado para diagnósticos remotos

Todas las CPU con interfaz integrada PROFINET ofrecen la funcionalidad de servidor Web y permiten efectuar diagnósticos desde cualquier lugar a través de la red Industrial Ethernet. A través de un navegador de Internet estándar cualquier cliente Web puede acceder en modo lectura a los datos de diagnóstico de una CPU que opera como servidor para las páginas Web. Para ello sólo hace falta que un cliente Web esté conectado con una CPU través de Industrial Ethernet. De este modo el acceso a las CPU ya no está restringido a STEP 7.

A través de la red se puede conocer la identificación de módulos de la CPU (nombre de la estación, nombre del módulo), el estado operativo de la CPU, el búfer de diagnóstico de la CPU con registros en texto explícito y los parámetros y estadísticas Ethernet (Dirección IP, dirección MAC, paquetes enviados). Por motivos de seguridad el acceso a los datos de esta manera está restringido a lectura, no es posible alterar datos en la CPU a través de la Web.

2.3 FAMILIA SIMATIC S7-300

A pesar de ser solamente un equipo, un PLC puede llegar a ser considerado un sistema si se analizan sus prestaciones y capacidades como es el caso de los PLC SIMATIC S7-300. Según la Real Academia de la lengua Española un sistema es un “*Conjunto de cosas que relacionadas entre sí ordenadamente contribuyen a determinado objeto*”, un grupo de objetos, enlazados entre sí con un objetivo común.

Figura 13. Ejemplo de un sistema S7-300, compuesto por fuente, CPU y 3 módulos I/O

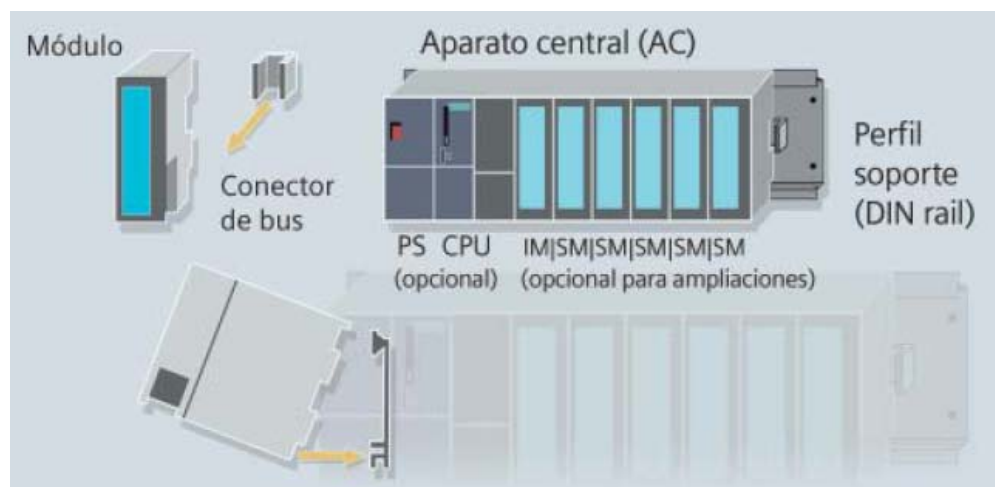


Entonces, se tiene por una parte que se requieren los objetos y en el presente caso se cuenta con los módulos que conforman el PLC, cada uno con una función específica sin la cual el todo no se puede ejecutar; además se cuenta con un módulo principal, una CPU, quien ordena y relaciona lógicamente toda la información que los demás módulos le suministran y conforme esos datos, ejecuta acciones y toma decisiones que le permitan llevar a buen término el objetivo planteado: labores de monitorización, supervisión, control, y en general lo que el usuario desee. Se deduce pues que para efectos del presente también se hará referencia al PLC como un sistema.

Debido a sus características modulares cada sistema-PLC de la familia S7-300 está compuesto por diversas y variadas partes de tal suerte que cada aplicación implica una configuración diferente, un objetivo específico. Prácticamente lo que ingeniería de diseño de una planta industrial hace es armar el equipo de acuerdo a sus necesidades, a partir de módulos para alimentación, CPU, entradas y/o salidas digitales, entradas y/o salidas analógicas, funciones tecnológicas, interconexión de pasarela, procesadores de comunicaciones, y otros.

Además de los módulos, sólo se requiere montar un perfil soporte (riel DIN) para enganchar y atornillar los componentes. De este modo se obtiene un equipo robusto con alta compatibilidad electromagnética, grandes capacidades y pequeñas dimensiones. El bus de fondo –que cumple tareas de comunicación interna y/o alimentación-, va autoinstalándose al ir añadiendo módulos que se entrelazan por conectores de bus posteriores en forma de U.

Figura 14. Sistema S7-300 montado sobre un riel DIN, detalle de conexión del bus posterior



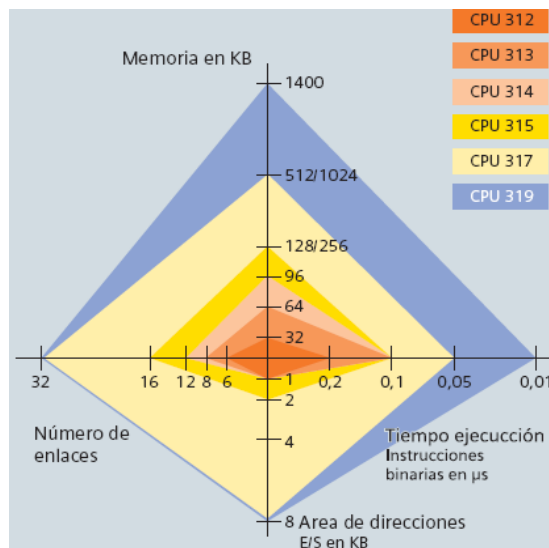
A modo general, se describen a continuación la funcionalidad de cada tipo de módulos componentes del S7-300.

Módulos de alimentación

Constituyen la fuente de energía de todo el sistema pues a través suyo se energizan la CPU, cada uno de los demás módulos y el bus trasero de comunicación entre la CPU y los demás módulos. Actualmente existen dos tipos de PS (del inglés Power Supply) disponibles: *indoor* (tipo interior) o *outdoor* (tipo exterior), para operar con corrientes nominales iguales o inferiores a 2, 5 o 10A. Las primeras se deben conectar a fuentes de DC (24/48/72/96/110VDC) que regularmente están disponibles en campo abierto, mientras que las segundas funcionan con alimentación AC monofásica de 120 o 230V.

Unidad central de proceso CPU

Figura 15. Esquema comparativo de CPUs S7-300 estándar



Es el componente principal del PLC pues se encarga de las labores de procesamiento de datos. Controla el bus posterior por medio del cual se comunican entre sí los módulos y en algunos casos hasta reciben alimentación eléctrica a través del mismo. Existen diferentes clases de CPUs de acuerdo a las necesidades de cada aplicación como lo son por ejemplo: Conteo/medición rápido con acceso directo a los contadores de hardware, posicionamiento simple con

control directo de los convertidores de frecuencia y regulación PID con bloque de función integrado.

Actualmente hay disponible una gama escalonada de CPU con un amplio abanico de prestaciones (ver figura), con firmwares actualizados constantemente a través de la red. Todas las unidades permiten tiempos de ciclo de máquina cortos gracias a su gran velocidad de procesamiento. El ancho reducido de los módulos garantiza un conjunto compacto, lo que redundará en armarios eléctricos pequeños y ahorro de espacio y dinero. Las CPU están disponibles a partir de un ancho de tan sólo 40mm y para las aplicaciones de seguridad hay disponibles CPU de seguridad positiva.

Las CPU compactas de 80 o 120mm de ancho ofrecen, además, periferia integrada y funciones tecnológicas integradas. Esta periferia integrada está compuesta por módulos de entrada/salida digitales y entrada/salida analógicos (en número configurable) y junto con las funciones tecnológicas permiten ahorrarse inversiones adicionales en módulos que no se necesitan.

Micro Memory Card (MMC)

La micro memory card es un soporte de memoria compacto que cumple los requisitos industriales más exigentes, en particular, la protección contra descargas electroestáticas y la robustez mecánica. Además ofrece remanencia de datos con lo cual se garantiza la permanencia del programa en memoria a pesar de fallas en la alimentación del PLC.

La micro memory card probada en sistema permite más ciclos de escritura que las memory cards convencionales, y ofrece además protección de know-how, ya que puede leerse el número de serie. Como utilidad adicional pueden resetear todos los ajustes, programación y parametrización configurados a los valores de fábrica mediante interruptor de hardware (Reset to factory).

Módulos de entradas y/o salidas digitales (DI, DO, DI/DO)

Permiten la conexión de contactos o actuadores (entre 8 y 32 por módulo) que operen en dos estados (On-Off, Activo-Inactivo) a fin de que sea posible a la CPU operarlos lógicamente por medio de operaciones con variables booleanas, son

ideales para acoplar conmutadores, detectores de proximidad, electroválvulas, contactores de DC, lámparas de señalización y relés en general.

Los módulos trabajan con tensiones de corriente continua en el rango 24-48V o de corriente alterna en el rango 24-48V, 120V, 230V, asignando el estado lógico 1 o 0 a la presencia o ausencia de tensión (y por ende corriente) entre los bornes de los dispositivos (estados: energizado/des-energizado). Existen también algunas versiones con salida de relé diseñadas especialmente para bobinas, electroválvulas arrancadores de motor y pequeños motores de AC o DC.

Módulos de entradas y/o salidas analógicas (AI, AO, AI/AO)

Permiten la conexión de instrumentación electrónica con señales de salida de corriente, tensión o resistencia (entre 2 y 8 instrumentos por módulo); poseen también la capacidad de adaptar los canales de entrada para la lectura de la señal de salida de termopares de todos los tipos. Normalmente vienen equipados con entradas (canales) individuales asociadas en grupos configurables de modo que todos operan con los mismos parámetros y así un mismo módulo puede leer señales de RTDs (resistencias), transmisores de presión (corrientes) y termopares al mismo tiempo y de ese modo se permite a la CPU llevar a cabo tareas de supervisión de todo el proceso.

Módulos de funciones tecnológicas (FM)

Los módulos funcionales son módulos inteligentes que ejecutan tareas especiales de gran complejidad de manera autónoma, simplificando de este modo el trabajo de la CPU. Se utilizan cuando hay que hacer frente a grandes exigencias en lo que respecta a exactitud y dinámica.

Entre las funciones tecnológicas se encuentran:

- a. Conteo/medición
 - Conteo de impulsos de hasta 500 kHz
 - Medición de recorridos, velocidades, frecuencias y períodos
 - Dosificación

b. Regulación

- Regulación de temperatura, presión o caudal
- Regulación paso a paso, a impulsos y continua
- Regulación de consigna fija, servorregulación, regulación en cascada, regulación de relación y regulación mixta
- Estructuras de regulación preconfiguradas, parametrizables o de programación flexible
- Optimización de reguladores

c. Control por levas

- Conmutación en función del recorrido
- Conmutación en función del tiempo
- Acción anticipativa dinámica

d. Control de movimiento

- Lectura de recorrido con encoders incrementales o absolutos
- Posicionamiento con dos velocidades o con regulación de posición
- Reductor electrónico
- Perfil de leva
- Interpolación multieje
- Control de ejes hidráulicos

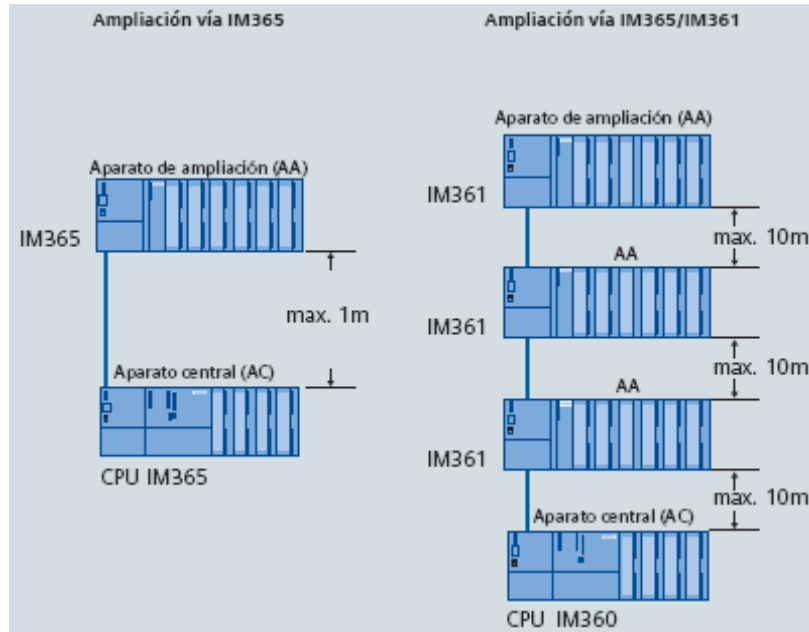
Módulos de interconexión de pasarela (IM)

Comunican dos rieles (aparatos de ampliación, AA) de módulos diferentes mediante el establecimiento de un enlace lógico controlado por la CPU, se utilizan cuando se alcanza el tope máximo de módulos conectados en un estante (8, aparte de la PS, la CPU y el mismo IM) y se desea aumentar las prestaciones del sistema de automatización; se instalan entonces este tipo de módulo en cada estante remoto (conjunto de módulos) y se configura y programa la CPU para que puede reconocer los módulos que se encuentren sobre ellos -los slots se pueden direccionar libremente, es decir, no existe ninguna regla de asignación de slots.

En total se puede utilizar un máximo de 32 módulos de forma centralizada: hasta 4 rieles diferentes o aparatos de ampliación en donde la conexión se realiza a través de un cable 368 (específico SIMATIC) con una longitud inferior a 10 metros usando un protocolo de comunicación propio de los PLC S7-300 (es el mismo protocolo usado por el bus que comunica todos los módulos).

De este modo, en una instalación en una fila se obtiene una configuración máxima de 256 E/S (8 módulos con 32 E/S), y en una configuración de varias filas, hasta 1024 E/S (4 rieles con 256E/S). En una configuración descentralizada con PROFIBUS DP son posibles 65536 conexiones de E/S (hasta 125 estaciones).

Figura 16. Esquema de ampliación de un sistema S7-300 a través de módulos de interconexión de pasarela usando las referencias IM365 (izquierda) e IM360/361 (derecha).



Procesadores de comunicación (CP)

Sirven para conectar el S7-300 a los diversos sistemas de bus/redes de comunicación y para el acoplamiento punto a punto o multipunto (MPI). El acoplamiento punto a punto a través de módulos de comunicación representa una alternativa muy eficaz y rentable a diferencia de los sistemas de bus; la ventaja del acoplamiento punto a punto con respecto a éstos últimos es especialmente pronunciada cuando sólo hay que acoplar unos pocos equipos al controlador SIMATIC S7, por ejemplo a través de RS485.

Además, permiten una conexión rentable de sistemas de terceros al PLC y gracias a la gran flexibilidad de los CP, se pueden poner en práctica diversas técnicas y velocidades de transmisión o protocolos de transferencia totalmente personalizados.

En cuanto a protocolos estándar se pueden implementar enlaces bajo PROFIBUS DP, PROFIBUS FMS, PROFINET/Industrial Ethernet, ASI (maestro) y RK512, ASCII o 3964 en acoplamiento punto a punto. Para comunicaciones multipunto se utiliza el protocolo MPI propio de SIEMENS si se necesita interconectar dos o más elementos SIMATIC, o, se descargan drivers Modbus (maestro/esclavo) sobre el firmware de los procesadores de comunicación.

La amplia gama de módulos del S7-300 se puede utilizar para ampliaciones centralizadas o para configurar estructuras descentralizadas con ET 200M (módulo pasivo perteneciente al sistema de periferia descentralizada ET200 patentado por Siemens AG).

Como se aprecia claramente en la sección de IMs, siempre existe una longitud máxima menor a 10m para los aparatos de ampliación del estante de la CPU y esta limitante trae como consecuencia la instalación de todo el sistema en un mismo cuarto de control. Con ET200 las distancias se pueden ampliar porque implementa comunicaciones remotas a través de PROFIBUS DP (Decentralised Periphery), permitiendo distribuir las labores de procesamiento e interacción PLC/sensor-actuador a través de la planta de proceso. Por lo tanto, con esta configuración la gestión de repuestos resulta muy económica.

2.4 MÓDULOS IMPLEMENTADOS EN EL PROYECTO

Aunque la descripción global de los dispositivos SIMATIC caracteriza parcialmente todos los PLCs, el propósito de este aparte es detallar minuciosamente cada uno de los módulos que conforman el sistema sobre el cual se desarrolla el proyecto con el fin de comprender las causas de los problemas de compatibilidad con los relés Multilin SR de General Electric y el procedimiento llevado a cabo para ponerle fin a la dificultad en la comunicación.

Se cuenta entonces con cuatro módulos:

- Módulo de alimentación PS 307 2A, provee la alimentación a los otros tres módulos. Se trabaja con una PS de amperaje reducido porque el consumo de los módulos conectados es bajo, sin embargo, para implementaciones reales con módulos de entradas/salidas digitales/analógicas se requiere por lo menos una con capacidad de 5A.

- Módulo CPU 315-2 DP, con 2 puertos de comunicación incorporados y capacidades PROFIBUS integradas.
- Módulo CP 341, procesador de comunicaciones con capacidad de comunicación bajo protocolo Modbus a través de software descargable.
- Módulo de simulación SM 374, con 16 selectores manuales con indicadores de LED para configurar como 16 entradas, 16 salidas o 8 entradas y 8 salidas. Permite representar entradas de sensores y/o salidas a actuadores a fin de cargar un poco el ciclo de trabajo de la CPU, además valida información para exportar e importar hacia los relés.

A pesar de que en campo las exigencias de la CPU y en general de los módulos van a ser diferentes a las planteadas para efectos de este proyecto, la solución desarrollada se puede implementar en cualquier CPU S7-300 teniendo como limitante las condiciones de trabajo a las que se van a exponer pues necesario que el ciclo de trabajo del procesador alcance a ejecutar la rutina de control del proceso y establecer comunicación. Si se configuran demasiadas funciones en la CPU es posible que no se alcance a correr la rutina del módulo de comunicación y el sistema en general pasa a estado de falla si no hay contingentes programados.

Características de la CPU 315-2 DP

- Es una CPU con una capacidad de procesamiento y memoria de programa de gama media a alta, se utiliza conjuntamente con otras herramientas de ingeniería SIMATIC.
- Tiene un rendimiento optimizado para el procesamiento rápido de aritmética binaria y de coma flotante.
- Su diseño está orientado a la implementación de ampliaciones de periferia, regularmente se configuran estructuras periféricas descentralizadas.
- Requiere Micro Memory Card para el almacenamiento de áreas de registros correspondientes a memoria de carga dinámica y memoria de carga

remanente, es decir, el programa y los comentarios de usuario. Los 128Kb de la CPU sólo se cargan con memoria de trabajo.

- Referencia de pedido internacional a través de Siemens AG: 6ES7315-2AG10-0AB0.

Para las necesidades del presente proyecto no se requiere una CPU muy potente ya que las labores de la CPU están limitadas a la comunicación interna (dentro del sistema S7-300) con el CP341 y luego es éste quién establece el enlace lógico con el dispositivo remoto. No obstante, se seleccionó esta CPU para dar lugar a la implementación de otras funciones del control en caso de ser necesarias pues en condiciones de campo la labor principal del PLC es controlar y las tareas de comunicación son accesorias.

El anexo 2DP en la referencia indica que posee dos puertos de comunicación y al menos uno de ellos se puede operar bajo PROFIBUS DP, en el caso actual se utilizará solamente uno para enlazar el PC programador y el otro queda libre.

Figura 17. Fuente de alimentación PS307 2A y CPU 315-2DP empleados en el proyecto.



A continuación se observa un resumen de las especificaciones técnicas que rigen al equipo utilizado, para mayores detalles se puede consultar la bibliografía consignada al final del libro.

Cuadro 4. Especificaciones técnicas de la CPU 315-2DP

CPU	315-2DP
Dimensiones físicas	40 x 125 x 130 mm
Peso	270 g
Referencia	6ES7315-2AG10-0AB0
Memoria	
Memoria de trabajo	128KB
Instrucciones	42K
Tiempos de ejecución	
Operaciones de bits	0,1u
Operaciones de palabras	0,2u
CPU	315-2DP
Operaciones de coma fija	2u
Operaciones de coma flotante	3u
Marcas/Temporizadores/Contadores	
Marcas	2048 bytes
Temporizadores en formato S7	256
Margen de temporización	10ms - 9,990s
Contadores en formato S7	256
Margen de conteo	0 - 999
Temporizadores/Contadores en formato IEC	Disponibles: bloques funciones de sistema
Áreas de direccionamiento	
Periferia de entradas	2048 bytes
Periferia de salidas	2048 bytes
Memoria de proceso de entradas	128 bytes
Memoria de proceso de salidas	128 bytes
Canales digitales	1024
Canales analógicos	256
Hardware admisible	
Módulos de funciones FMs	8 máximo
Módulos de procesadores de comunicaciones, enlaces punto - punto	8 máximo
Módulos de procesadores de comunicaciones, enlaces LAN	10 máximo

Características del módulo de comunicaciones CP 341

- Diseñado exclusivamente para intercambio rápido de datos a través de una línea serial en enlaces punto-punto o punto-multipunto.

- Posee 3 variantes diferentes para interfases de transmisión físicas: RS232C (V.24), 20mA (TTY) y RS422/RS485 (X.27).
- Permite implementar protocolos de gama baja tales como ASCII, 3964 y RK512, así como protocolos de mayores prestaciones (Modbus RTU Maestro, Modbus RTU Esclavo) por medio de drivers adaptados al firmware del equipo.
- Se configura y parametriza de forma sencilla pues se realiza desde la aplicación de usuario con la que se programan las rutinas de la CPU.
- Requiere alimentación externa (no desde el bus de comunicación).
- Referencia de pedido internacional a través de Siemens AG: 6ES7341-1CH01-0AE0.

Figura 18. Procesador de comunicaciones CP341



Durante la ejecución del proyecto se utilizó un módulo procesador de comunicaciones con interfaz física RS485 debido a las limitadas posibilidades de comunicación con las que cuentan los relés GE Multilin ya que sólo poseen un

puerto frontal RS232 para configuración desde PC y 2 puertos posteriores RS485 para enlaces con entes remotos. La alimentación del CP se realizó por medio de la CPU.

La siguiente tabla resume las características técnicas principales del módulo, para mayor información se puede consultar el catálogo del procesador emitido por el fabricante (ver bibliografía).

Cuadro 5. Especificaciones técnicas del CP 341

CP	341
Dimensiones físicas	40 x 125 x 120 mm
Peso	300 g
Referencia	6ES7341-1CH01-0AE0
Tensiones y corrientes	
Valor nominal alimentación	24V DC
Consumo de corriente del bus posterior	70mA
Consumo de corriente máxima de alimentación	200mA
Potencia de pérdidas	5,8W
Interfase	
Interfaz física de comunicación	RS 485 con separación galvánica
Velocidad de transmisión máxima	76,8 Kbits/s
Velocidad de transmisión mínima	0,3 Kbits/s
Tipos de conexiones	
Conector físico de alimentación	3 bornes de tornillo: L+, M, GND
Conector físico de comunicación	Sub-D de 15 polos
Longitud máxima de cable	1200m

Características del módulo de simulación SM374

- Es un módulo especial cuyo empleo típico está asociado a la elaboración de pruebas de programas y verificación de variables durante puesta en servicio. También se puede usar para labores de mantenimiento sin paro del proceso.
- Permite simular hasta 16 señales digitales de entradas provenientes de sensores a través de interruptores ON-OFF.

- Permite simular hasta 16 señales digitales de salida dirigidas hacia actuadores por medio de LEDs.
- Se configura para funcionar como simulador de entradas (16) o salidas (16), o como simulador de 8 entradas y 8 salidas.
- Referencia de pedido internacional a través de Siemens AG: 6ES7374-2XH01-0AA0.

Figura 19. Módulo simulador SM374



Con unas dimensiones de 40 x 125 x 120 mm y un peso aproximado de 190 g el módulo simulador es uno de los más sencillos de la familia S7-300. Se alimenta a través del bus posterior del sistema (5V DC) consumiendo 80mA generando unas pérdidas típicas del orden de 0.35W; no posee separaciones galvánicas para las entradas o salidas y además de los 16 interruptores y 16 LEDs dispone de un tornillo selector del modo de operación: 16In, 16Out o 8In/8Out.

3. RELÉS MULTIFUNCIÓN³

3.1 INTRODUCCIÓN

En los sistemas de distribución de energía se utilizan celdas de media tensión para la administración adecuada de la energía eléctrica proveniente de la red de transmisión. Cada celda suele ser un cubículo metálico que aloja elementos de maniobra eléctrica para tensiones superiores a 1kV entre los cuales se encuentran: seccionadores, cuchillas de puesta a tierra, interruptores de potencia, etc.

Existen una diversa clasificación para las celdas de acuerdo a la función que cumplen: entrada, salida, entrada-salida, acople. Las celdas de entrada son aquellas que permiten el flujo de energía eléctrico hacia el interior del barraje del tablero, las celdas de salida son aquellas que transportan energía eléctrica fuera del sistema de distribución para alimentar circuitos finales que poseen ya sea equipos de alto consumo o sub-circuitos de distribución, las celdas de entrada-salida ejecutan ambas funciones y las celdas de acople se utilizan para seccionar sistemas de distribución en dos o más partes autónomas. Regularmente todas cuentan con un interruptor de potencia que permite controlar el flujo de corriente en caso de fallas o mantenimiento.

Los relés multifunción son equipos electrónicos especialmente diseñados para controlar el accionamiento del interruptor y en general para ejecutar diversas funciones de protección (de allí su nombre) de los dispositivos conectados aguas abajo del interruptor.

Durante la ejecución del presente proyecto se utilizará la familia de relés de protección SR (Super Relay) marca General Electric, caracterizados por la presencia de un microprocesador y la capacidad de operar de modo multifunción. Ya que proveen protección, control, monitoreo, medición e interfases locales y/o remotas de usuario, estos productos han tenido gran difusión pues conforman un sistema de bajo costo con componentes discretos.

³ Manuales de referencia General Electric

El conjunto de dispositivos lo componen un sistema de protección de motores (GE SR 469), un relé multifunción para generadores (GE SR 489), un relé de protección de transformador (GE SR 745) y un relé de protección de alimentadores (GE SR 750/760). Los tres primeros están orientados a realizar labores de protección sobre equipos particulares mientras que el 750/760 permite la protección de una línea sin tener especificado el/los equipo(s) alimentados por la celda de salida sobre la que se instala el relé. En las secciones siguientes se explica a grosso modo las características principales de cada uno de los relés teniendo en cuenta su funcionalidad y sus interfaces de entrada o salida con entidades externas como sensores, actuadores, PLCs y otros. También se describe el sistema de comunicación serial que poseen y que les permite establecer un enlace lógico con dispositivos que soporten protocolo Modbus.

3.2 FAMILIA MULTILIN SR

La designación Multilin es utilizada dentro del catálogo de productos General Electric para denotar todos los equipos y sistemas diseñados para proveer soluciones de control, protección, medición y comunicación de equipos industriales. Dentro de éste contexto existe la familia de dispositivos SR (super relay) que corresponde a una de las más antiguas de la marca americana y está constituida por los equipos que se listan en las páginas siguientes junto con una breve descripción. Debe agregarse que las referencias 735/737 no se tuvieron en cuenta porque no se contaba con esos equipos para elaborar pruebas durante la ejecución del proyecto.

Figura 20. Familia de relés GE Multilin



Como interfases de interacción local cuentan con un teclado, una pantalla LCD de 2x20 caracteres y un puerto de comunicación serial RS232 para parametrizar y

configurar el equipo vía PC a través del software Enervista. Para comunicación remota cuenta con dos puertos RS485 (dos bornes por puerto) o con un puerto RS 422 que utiliza los cuatro bornes disponibles. Debido a que los equipos son elaborados por un fabricante de EU los procesos de elaboración y las funcionalidades están guiadas por los estándares norteamericanos, de este modo y aunque no es completamente un estándar normalizado, Modbus es el protocolo de comunicación remota implementado por defecto en los productos de GE.

Entonces, así se cuente con un interfaz físico (RS485) que bien puede ser utilizado con otro protocolo de comunicación el sistema de procesamiento interno del relé sólo entiende Modbus y no existen soluciones de expansión de bajo costo que permitan otro tipo de comunicación para esta familia. Por esta razón primordialmente es que se debe implementar una red Modbus para conectar los PLCs SIMATIC con los relés Multilin de GE.

GE SR 469 (Sistema de Protección de motores)

El relé de protección de motores GE SR 469 fue diseñado para la protección de motores de media y alta potencia y equipos asociados, tiene integradas las funciones de protección de motor, diagnóstico de fallas, medida de potencia y funciones de comunicación, todo en un equipo económico y extraíble. Este alto grado de integración permite la normalización a un único relé de protección, independientemente de la aplicación y/o el motor.

Además de los elementos de protección de intensidad, dispone de entradas de RTD para protección de temperatura del estator y los rodamientos. Las entradas de tensión proporcionan los elementos de protección de tensión y potencia y dispone de entradas de transformadores de intensidad de fase para protección diferencial de fase. Todos los elementos de protección nombrados están incluidos por defecto en el relé y pueden ser habilitados por el usuario.

El SR469 tiene funciones de monitorización y medida completas, un registro de sucesos que guarda 40 registros etiquetados en tiempo y una función de captura de oscilografía con hasta 64 ciclos que permite al usuario seleccionar los ciclos pre-falla y post-falla. También detecta el tiempo de aceleración, la intensidad de arranque y capacidad térmica requerida durante el arranque del motor.

Si la carga del motor durante el arranque es relativamente constante, estos valores pueden ser “aprendidos” por el equipo para ajustar con precisión la

protección de aceleración, en otros casos puede calcular la carga media del motor durante un periodo determinado. Asimismo, dispone de una herramienta de simulación para probar el relé sin entradas externas y cuenta también con interfaces de usuario local y remoto conformadas por un display de 40 caracteres, teclado e indicadores LED para comunicación local, un puerto frontal RS232 que permite el acceso desde un ordenador y dos puertos traseros RS485 para comunicación remota.

El SR469 tiene 12 entradas de RTD programables que se usan normalmente para la monitorización de la temperatura del estator, rodamientos, ambiente y otros, mientras por su parte un circuito interno compensa los efectos resistivos inherentes a los conductores que conforman los cables siempre y cuando los tres sean de la misma longitud. Igualmente posee 9 entradas digitales -5 de las cuales son fijas y 4 con funciones configurables por usuario - y, 4 entradas analógicas que pueden usarse para monitorizar cualquier variable externa como vibración, presión, flujo, etc.

En lo que respecta a señales de salida se tienen 6 relés de los cuales 4 son configurables para disparo, alarma, bloqueo de arranque (para prevenir arranques que pueden suponer un disparo inmediato o funciones de bloqueo) y alarma de equipo (en caso de un fallo interno o pérdida de alimentación) mientras que por su lado los otros 2 relés auxiliares pueden programarse para diversas funciones como disparo auxiliar, alarma auxiliar, respaldo de disparo, circuitos de control, etc. Por último, el dispositivo cuenta con 4 salidas analógicas programables que se usan para efectos de control -por ejemplo conexión con un autómatas programable.

GE SR 489 (Relé multifunción de generador)

El relé multifunción de generador SR 489 tiene como finalidad proporcionar funciones de protección, medida y monitorización pudiendo ser utilizado como protección principal o de respaldo en generadores síncronos o de inducción de 25, 50 ó 60Hz.

El equipo incorpora funciones para la completa protección del generador, entre las cuales se incluyen: protección diferencial, sobre-corriente direccional de tierra, sobre-corriente de secuencia negativa, sobre-corriente instantánea de nivel alto, sobre-corriente con frenado por tensión, máxima y mínima tensión, máxima y mínima frecuencia, distancia y potencia inversa. Para ajustarse a los generadores síncronos, las funciones de protección incluyen sobreexcitación, pérdida de campo y energización accidental del generador. El relé incluye también algunas funciones

de monitorización entre las que se encuentran: medida de intensidad de corriente eficaz, potencia trifásica y temperatura a través de 12 entradas de RTD. Se monitorizan también el fusible de tensiones y la operación del interruptor, indicándose los fallos. Este dispositivo cuenta con 4 entradas analógicas y 4 salidas analógicas; las cuatro entradas analógicas son monitorizadas y pueden ser usadas para funciones tales como la protección y monitorización de la vibración en los rodamientos, por otra parte las cuatro salidas analógicas pueden ser configuradas para reflejar cualquier parámetro medido y almacenado en alguno de los registros de memoria interna. Además de las entradas analógicas posee 7 entradas digitales configurables que pueden usarse para controlar cualquier exceso de velocidad medido desde un tacómetro o en general para introducir al sistema todo tipo de señales necesarias para la protección, el control o el diagnóstico. Las 12 entradas RTD con que cuenta el 489 permiten al usuario monitorizar la temperatura del estator y los rodamientos, contando con una función de redundancia que habilita dos RTD para que monitoricen el mismo equipo otorgando una mayor fiabilidad. Para la interacción con entidades externas el fabricante integra 6 relés de salida configurados así: 1 de disparo, 3 auxiliares, 1 de alarma y 1 de alarma de equipo. Los indicadores de LED en el panel frontal muestran los estados de cada una de las salidas nombradas.

GE SR 745 (Relé de protección de transformador)

El 745 es un relé de protección de transformador de alta velocidad, trifásico, para 2 ó 3 devanados, diseñado para la gestión y protección primaria de transformadores de cualquier tamaño, basándose en una arquitectura que usa un microprocesador interno. Dentro de sus funciones combina elementos de protección diferencial porcentual, sobre-corriente, frecuencia y sobreexcitación, junto a la monitorización de los distintos armónicos, y la distorsión armónica total (THD).

Además ofrece dos funciones de protección adaptables: el frenado por armónicos está dirigido al problema de falsos disparos durante la magnetización mientras que los elementos de sobre-corriente temporizada adaptables reajustan sus valores de arranque basándose en la capacidad calculada del transformador en caso de suministro de corrientes de carga con alto contenido en armónicos.

Figura 21. Relé GE Multilin SR 745. Físicamente todos los relés de la familia se observan muy similares: Teclado numérico, teclas de función, pantalla LCD, puerto serie frontal RS232 y LEDs de indicación.



Cuenta adicionalmente con múltiples grupos de ajustes que permiten al usuario introducir y seleccionar de forma dinámica 4 grupos de setpoints para cumplir los requisitos de protección de las diferentes configuraciones del sistema eléctrico, simplemente se decide cual se mantiene activa dependiendo de los requerimientos. Para la programación adecuada durante la puesta en servicio implementa lógica FlexLogic (patentada por GE) que permite programar ecuaciones de tipo PLC basadas en entradas lógicas y elementos de protección para asignarlas a cualquiera de las salidas del equipo.

Al igual que otros dispositivos de la familia GE SR, el 745 incorpora una función de captura oscilográfica que recoge datos en condiciones de falla, magnetización o alarma y los almacenada en registros de memoria destinados exclusivamente para tal fin.

GE SR 750/760 (Relé de protección de alimentación)

El relé de protección de alimentación 750/760 es un equipo digital diseñado para la gestión y protección primaria de alimentadores de distribución. Además, permite su utilización en la gestión y protección de respaldo para transformadores y líneas de potencia. El equipo registra la frecuencia del sistema de potencia y ajusta el rango de muestreo para mantener la precisión en todo momento. El SR750 y SR760 son prácticamente el mismo equipo, simplemente el 760 tiene incorporada la función de recierre automático, por lo demás son idénticos y están provistos con las mismas especificaciones, guías de referencia y manuales técnicos. Este equipo está especialmente diseñado para ofrecer un sistema de gestión de alimentadores económico, incorporando todos los requisitos de protección, control, medida, así como interfaces de usuario locales y remotas en un solo conjunto. De este modo, se elimina la necesidad de costosos componentes individuales. Dado que se entiende por alimentador a la celda o tablero (conjunto de celdas) que se encarga de distribuir energía eléctrica a partir de un punto de un barraje, así, se logra una protección de los equipos conectados al circuito de derivación sin importar la función que cumplan cada uno de ellos, de este modo el relé protege el circuito que se encuentra aguas abajo y no se necesitan dispositivos de protección específicos (para motor, generador, transformador, etc).

El 750/760 proporciona una completa protección de sobre-corriente que incluye protección de fase, neutro, tierra, tierra sensible, y secuencia inversa para sobre-corriente temporizada e instantánea, además de control direccional. Las funciones de máxima tensión, mínima tensión y mínima frecuencia, constan de dos pasos independientes cada una. Por su parte, el control del 760 incluye un reenganchador de 4 intentos para el recierre.

El equipo incluye numerosas funciones de monitorización y medida, dispone de una memoria interna que permite almacenar los últimos 128 eventos, las 10 últimas fallas, un total de 256 ciclos de datos oscilográficos y realiza funciones de autochequeo de respaldo mientras está funcionando.

Gracias a sus entradas y salidas lógicas programables, el 750/760 puede ser configurado fácilmente para las aplicaciones específicas de cada usuario. Cuenta con 20 entradas lógicas, 14 de las cuales pueden ser asignadas a entradas físicas (contactos), a entradas virtuales (de programa) o a combinaciones de estas dos (AND, OR, etc.), mientras las otras 6 sólo se asignan a entradas virtuales. Todas ellas pueden ser programadas para realizar cualquiera de las 60 funciones predefinidas, incluyendo disparo remoto, reposición, bloqueo de funciones, etc.

Por aparte implementa 8 salidas electromecánicas: 2 programadas en fábrica para el control del interruptor, 5 configurables para activarse bien a prueba de fallos o no, y bien por cierre, auto-restaurables, o por pulso (los relés pueden programarse para que se activen por cualquier característica) y 1 se programa en fábrica como relé de alarma ante un fallo interno del equipo. Al mismo tiempo dispone de una salida de estado sólido SCR de alta velocidad y 8 canales de salidas analógicas en las que puede seleccionarse cualquiera de los 31 parámetros medidos para activarlas. Adicionalmente dispone de una entrada IRIG-B para sincronización horaria mediante una señal de satélite.

3.3 SISTEMA DE COMUNICACIÓN

Todos los relés multifunción utilizados durante la ejecución del proyecto poseen funciones de comunicación remota, algunos como la referencia 469 implementa mayor cantidad de funciones que el 745 pero en general todos permiten a dispositivos externos leer y escribir información sobre el mapa de memoria interno en donde se almacenan los valores de operación del relé. Por cuestiones de seguridad todos los equipos tienen la posibilidad de establecer una contraseña de 8 dígitos alfanuméricos para evitar que personal no entrenado o ajeno a la fábrica pueda sabotear el sistema de protección ya sea a través del panel frontal y su teclado o a través del módulo de comunicaciones; cabe resaltar que ambos modos de acceso están protegidos por la misma contraseña y la desactivación de una u otra es completamente independiente.

La familia Multilin permite comunicaciones remotas a través de los protocolos DNP (Distributed Network Protocol) y Modbus. Como ambos protocolos son independientes de hardware cada fabricante puede elegir la capa física que desee para establecer los enlaces; en el caso de los relés se incluyen: un puerto RS232 frontal y dos puertos RS485 (COM1 y COM2), uno de los cuales puede ser utilizado como RS422 (COM1). Tal como se dijo en el capítulo relacionado con Modbus, General Electric recomienda un cableado de tipo *daisy-chain* con pares trenzados Belden de calibre 22AWG con pantalla aterrizada a tierra preferiblemente cerca del dispositivo maestro junto con terminaciones de línea en cada uno de los extremo conformadas por una resistencia de 120ohm en serie con un capacitor cerámico de 1nF. La comunicación establecida es half-duplex, de modo que nunca se establecen enlaces de transmisión y recepción al mismo tiempo.

Por defecto los relés están configurados para operar con una trama compuesta por 10 bits: 1 de inicio, 8 de datos y 1 de parada, debido a que una gran cantidad

de fabricantes americanos de equipos de comunicación no soportan tramas de 11 bits. Sin embargo, se puede configurar el Multilin para que se incluya un 1 bit adicional de paridad en caso de requerirse. Todos los puertos antes citados pueden trabajar a 300, 1200, 2400, 9600 y 19200 baudios siendo 9600 el valor configurado desde fábrica.

En general los relés de protección acatan la mayoría de especificaciones y sugerencias Modbus postuladas por Modbus-IDA, mantienen la longitud y funcionalidad de los campos correspondientes a dirección de esclavo, código de función, datos y CRC así como los tiempos entre caracteres y entre mensajes diferentes (1.5 y 3.5 caracteres respectivamente), no obstante, la función codificada 05 posee algunas variantes. A continuación se muestra un ejemplo de implementación de funciones Modbus sobre los relés Multilin de acuerdo a los lineamientos ya citados y otro ejemplo del caso especial de la función 05.

Ejemplo 1: Función 03

Implementación según Modbus-IDA: Leer registros de memoria

Implementación GE Multilin: Leer Setpoints o valores actuales

Se muestra el formato de un mensaje petición de maestro requiriendo 3 valores de registro (16 bits cada uno) comenzando en la dirección 0200 del esclavo con dirección 11, junto con su respectiva respuesta. Si se consulta la bibliografía documentada o se descarga del sitio Web del fabricante el mapa de memoria de cada relé se puede conocer a que corresponden los datos alojados en esas posiciones. En este ejemplo se empleo el mapa de memoria del relé de motor 469.

Cuadro 6. Ejemplo de mensaje con la función Modbus 03

Mensaje de petición del maestro	Ejemplo	Descripción
Dirección de esclavo	11	Petición dirigida al esclavo 11
Código de función	03	Leer valores de registros
Dirección de inicio de datos	02 00	Los datos a consultar comienzan el dirección 0200 del mapa de memoria del esclavo
Número de registros (MSB, LSB)	00 03	3 registros = 6 bytes en total
CRC (LSB, MSB)	06 E3	Chequeo de redundancia cíclica calculado

Mensaje de respuesta de esclavo	Ejemplo	Descripción
Dirección de esclavo	11	Respuesta enviada desde esclavo 11
Código de función	03	Leer registros, ejecución exitosa
Número de bytes	06	3 registros = 6 bytes en total
Datos: Registro #1 (MSB, LSB)	02 2B	Registro 0200: Estado general del motor
Datos: Registro #2 (MSB, LSB)	00 0A	Registro 0201: Capacidad térmica del motor en uso
Datos: Registro #3 (MSB, LSB)	00 64	Registro 0202: Tiempo estimado de disparo por sobrecarga
CRC (LSB, MSB)	C8 BA	Chequeo de redundancia cíclica calculado

Ejemplo 2: Función 05

Implementación según Modbus-IDA: Escribir bobina sencilla
 Implementación GE Multilin: Ejecutar operación

Esta función permite que el maestro ejecute diversas operaciones específicas sobre los relés Multilin. Regularmente esta función se utiliza para activar/desactivar bobinas por vía remota cuando los equipos esclavos las poseen, según la implementación GE se “engaña” al maestro y se emplea para ejecutar acciones programadas de fábrica en los relés, en lugar de accionar las bobinas.

Cuando el maestro cree que activa o desactiva una bobina (valores FF00 o 0000 respectivamente) en realidad activa o desactiva la orden de ejecución de un comando y, cuando el maestro envía el número de bobina sobre la que recae la acción en realidad determina el código del comando a ejecutar. Cada referencia tiene operaciones diferentes programadas, se debe consultar el manual nombrado en la bibliografía o disponible en línea antes de ejecutarlas por vía remota a fin de saber que orden se está enviando al relé.

Se muestran el formato de petición de un maestro que ordena a un esclavo un reset remoto, junto con la respectiva respuesta. En el presente ejemplo se emplea la referencia 750/760 porque posee mayor versatilidad en lo que respecta a control desde un ente remoto.

Cuadro 7. Ejemplo de mensaje con la función Modbus 05

Mensaje de petición del maestro	Ejemplo	Descripción
Dirección de esclavo	11	Petición dirigida al esclavo 11
Código de función	05	Ejecutar operación
Código de operación	00 01	Reset remoto
Orden de ejecución	FF 00	Valor para activar orden de ejecución
CRC (LSB, MSB)	DF 6A	Chequeo de redundancia cíclica calculado

Mensaje de respuesta de esclavo	Ejemplo	Descripción
Dirección de esclavo	11	Respuesta enviada desde esclavo 11
Código de función	05	Ejecutar operación, transacción exitosa
Código de operación	00 01	Reset remoto
Orden de ejecución	FF 00	Valor para activar orden de ejecución
CRC (LSB, MSB)	DF 6A	Chequeo de redundancia cíclica calculado

Para la correcta comprensión de la transacción Modbus anterior, la siguiente tabla indica las posibilidades de ejecución con que cuentan las referencias 750/760.

Cuadro 8. Operaciones a ejecutar disponibles con la función Modbus 05

Código de operación	Definición	Descripción
0000h	Operación nula	No ejecuta ninguna opción
0001h	Reset	Ejecuta la misma acción que el comando RESET del teclado en el panel frontal del relé
0002h	Abrir interruptor	Ejecuta la misma acción que el comando OPEN del teclado. El relé debe estar en modo remoto para poder llevar a cabo la acción
0003h	Cerrar interruptor	Ejecuta la misma acción que el comando CLOSE del teclado. El relé debe estar en modo remoto para poder llevar a cabo la acción
0004h	Ajustar hora	Ajusta la hora del reloj interno del relé
0005h	Ajustar fecha	Ajusta la fecha del reloj interno del relé
0006h	Disparador de memoria de rastreo	Activa la memoria de rastreo que almacena datos oscilográficos antes de un disparo
0007h	Borrar datos de energía usada	Borra el área de memoria donde se almacenan los datos de potencia consumida acumulada
0008h	Borrar datos de máxima demanda	Borrar el valor de máxima demanda de potencia alcanzada

Código de operación	Definición	Descripción
0009h	Borrar datos de memoria de eventos	Borra la memoria de eventos: un área de memoria que almacena datos cronológicos referentes a los últimos 128 eventos registrados por el relé
000Ah	Resetear contadores de disparos	Borra los datos de todos los contadores de disparo
000Bh	Resetear datos de corriente de arco	Borra el valor de corriente de arco acumulado (kA ² -seg)
000Ch	Mostrar paquetes de override	Envía los 40 caracteres (20 registros) del paquete de override especificados en el registro de tiempo de override
000Dh	Disparador del data logger	Activa el data logger: un área de memoria que monitoriza hasta 8 valores actuales a intervalos de tiempo definidos por usuario
000Eh	Resetear memoria de rastreo	Borra la memoria de rastreo de datos oscilográficos
000Fh	Resetear data logger	Borra el area de memoria en donde se almacena el data logger
0010h	Resetear contador de autorecierre	Borra el número de autorecierres ocurridos desde el último reset
0011h	Resetear datos de rata de autorecierre	Borra el número de autorecierres ocurridos durante la última hora

Mapa de memoria definido por usuario

Una de las características más notables de los relés de la familia Multilin recae en poseer un área de mapa de memoria definido por el usuario por medio del cual una entidad remota puede acceder con privilegios de sólo lectura a 124 (SR469 y SR489) o 120 (SR745 y SR750/760) registros de datos (valores actuales, setpoints) no consecutivos por medio de una sola transacción Modbus.

En muchas ocasiones un dispositivo maestro necesita indagar continuamente algunos valores a cada uno de los equipos esclavos; si estos valores están distribuidos a lo largo del mapa de memoria de cada esclavo, el proceso de adquisición de datos por parte del maestro sería muy dispendioso y saturaría el enlace de comunicación.

El mapa de memoria de usuario es una porción del mapa de memoria que se puede programar para anexar cualquier dirección del mapa global a un bloque

consecutivo dentro del mapa de usuario, de modo que el proceso de acceso a la información se haga a través de locaciones inmediatas. El mapa de memoria de usuario tiene dos áreas:

- Área de índice de registros. Ubicada entre las direcciones 0180h-01FCh (SR469 y SR489) o 0180h-01F7h (SR745 y SR750/760) contiene la direcciones en donde los registros de setpoints o valores actuales se encuentran alojados en el mapa de memoria.
- Área de registros. Ubicada entre las direcciones 0100h-017Ch (SR469 y SR489) o 0100h-0177h (SR745 y SR750/760) contiene los datos correspondientes a las direcciones que apunta el área de índice de registros.

Así, si por ejemplo los valores de corriente promedio de fase (registro con direcciones 0412h y 0413h) y máxima temperatura en RTD de estator (registro con dirección 04A1h) de un relé SR489 son necesarios, los registros pueden ser re-mapeados al área definida por usuario como sigue:

1. Se escribe el valor 0412h en la dirección 0180h (primer registro del área de índice de registros) haciendo uso de las funciones Modbus 06 o 16.
2. Se escribe el valor 0413h en la dirección 0181h (segundo registro del área de índice de registros) haciendo uso de las funciones Modbus 06 o 16.
3. Se escribe el valor 04A1h en la dirección 0182h (tercer registro del área de índice de registros) haciendo uso de las funciones Modbus 06 o 16.

Una transacción Modbus con funciones de lectura (códigos de función 03 o 04) sobre los registros 0100h y 0101h (primer y segundo dato del área de registro) permitiría entonces obtener información acerca de la corriente de fase promedio, mientras el registro 0102h (tercer dato del área de registros) contendrá el valor de la máxima temperatura de estator.

Para un re-mapeo correcto de los datos requeridos de cada relé se debe tomar como guía el mapa de memoria propio de cada relé citado en la bibliografía del presente documento.

4. ESTÁNDAR ANSI/EIA/TIA 485⁴

4.1 INTRODUCCIÓN: RS422 VS RS485

Tal como se conocen hoy en día, los estándares 422 y 485 son esquemas de transmisión de datos balanceados (diferenciales) que ofrecen soluciones robustas de comunicación sobre largas distancias y ambientes propensos a ruido eléctrico. Regularmente no se establece clara diferencia entre ambos estándares y simplemente se asocia el 485 con transmisión a 2 hilos y el 422 a 4 hilos, no obstante, desde un punto de vista electrónico hay diferencias perceptibles a quienes tengan conocimientos previos del tema; por esta razón el instituto nacional de estándares americano (ANSI) junto con la asociación de industrias de telecomunicaciones (TIA) y la alianza de industrias electrónicas (EIA) tienen definido un estándar para cada esquema de comunicación, estos son:

- ANSI/TIA/EIA-422-B-1994: Características eléctricas para circuitos de interfaz digital con voltaje diferencial. Título original en inglés: *Electrical Characteristics of Balanced Voltage Digital Interface Circuits*.
- ANSI/TIA/EIA-485-A-1998: Características eléctricas de generadores y receptores para su uso en sistemas digitales diferenciales multipunto. Título original en inglés: *Electrical Characteristics of Generators and Receivers for Use in Balanced Digital Multipoint Systems*.

Habitualmente se piensa que hace referencia a ellos con el prefijo RS porque significa estándar recomendado (*Recommended Standard*) pero en realidad significa sector de radio (*Radio Sector*), para la identificación correcta de la aplicación del estándar. Para la implementación de la red Modbus que trata el proyecto presente no se usa en ningún momento de las especificaciones técnicas que cubre el estándar 422, los fabricantes utilizan este nombre para los conectores y configuración de interfaces de comunicación simplemente porque así se suele conocer en el ámbito industrial pero en realidad lo que se tiene es una conexión 485 a 4 hilos.

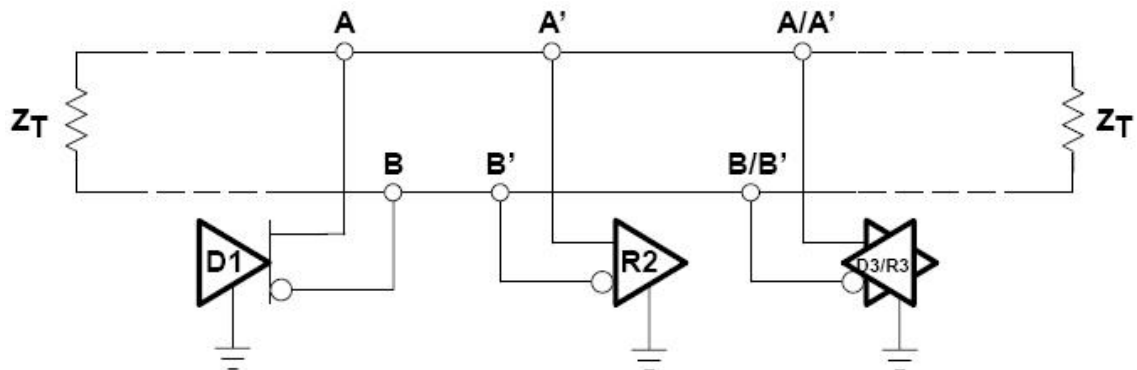
⁴ Artículo: 422 and 485 Standards Overview and System Configurations. Texas Instruments application report. Dallas, Estados Unidos. 2002.

4.2 GENERALIDADES

Según el estándar 422 se definen las características eléctricas para un sistema de comunicación simplex *multidrop* (multicaída), este término hace referencia al hecho de que siempre existe un solo dispositivo (driver) que se encarga de la generación de las señales que se transmiten por el bus del sistema mientras que puede haber más de un dispositivo (máximo 10) que se encarguen de recibir estas señales. Dado que los equipos que se utilizan en este proyecto tienen la capacidad enviar y recibir datos, es claro que ninguno implementa 422 y la conexión a 4 hilos que pueden configurarse se rige por las especificaciones del estándar 485.

Por su parte el estándar 485 surgió como una mejora de sus predecesores y permite la implementación de un sistema de comunicación duplex multipunto (*multipoint*) en donde se permite que hasta 32 unidades de carga envíen y reciben información transmitida a través del bus del sistema. Las características de los generadores y receptores definidas por 485 son tales que cubren completamente las especificaciones del 422 asegurando que haya completa compatibilidad de los equipos que cumplen 485 para operar en aplicaciones que ya implementan 422. La topología definida por el estándar se muestra en la siguiente figura, nótese que es prácticamente la misma recomendada por Modbus-IDA.

Figura 22. Topología general de red 485. Se aprecian un generador o driver (D1), un receptor (R2) y transceiver (D3/R3) junto con las impedancias de terminación de línea (Z_T).



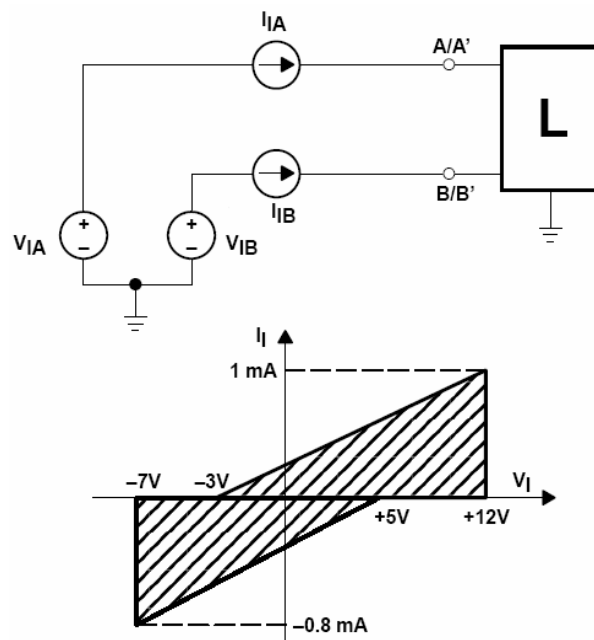
A pesar de que el estándar especifica que solamente un generador puede enviar datos en un determinado momento (operación half-duplex) pueden presentarse condiciones de fallo por cortocircuitos inadvertidos en los drivers de salida o disputa de línea. Los equipos que cumplan con el estándar deben prever esto y tomar las medidas necesarias para evitar daños y transmisión de información

errónea. La disputa de línea ocurre cuando dos o más generadores (drivers) intentan hablar a través del bus común al mismo tiempo. La mayoría de los equipos poseen un circuito de protección térmica que desactiva el driver cuando sensa altas temperaturas y lo vuelve a activar cuando se enfría. El circuito se diseña de modo tal que se intenta hablar por el canal tantas veces como se requiera hasta detectar que los demás drivers se encuentren apagados.

Noción de unidad de carga (UL, unit load)

Con el fin de establecer una carga eléctrica máxima sobre el bus de comunicación cuando las 32 ULs son utilizadas es necesaria definir un límite máximo en las curvas I/V características de los drivers (generadores), receptores y transceivers (generadores-receptores). Si a partir en el circuito de prueba que se muestra se comienza a variar el valor de tensión de la fuente V_{IA} (o V_{IB}) en el rango de -7V a 12V mientras la otra fuente V_{IB} (o V_{IA}) se aterriza a tierra, la corriente de entrada resultante I_{IA} (o I_{IB}) debe permanecer dentro de la región sombreada en cualquiera de los dos estados operativos (activa-inactiva). Un dispositivo que cumpla con la curva I/V descrita se denomina una unidad de carga UL para el bus (ver figura en la página siguiente).

Figura 23. Circuito de prueba de UL y curva I/V característica



El estándar 485 se diseñó de modo tal que se permite siempre conectar por lo menos 32 unidades de carga –que suelen corresponder a 32 equipos diferentes-, por eso suele llamarse un sistema de cargas de $12k\Omega$. Como la corriente de salida de los drivers depende de la carga equivalente del bus, si un diseño de una red requiere un número de equipos superior a 32 se tiene que garantizar que la resistencia de carga se eleve al punto en que permita tantas conexiones. Así si por ejemplo se cuenta con transceivers con características de 0.5 UL, se pueden conectar hasta 64 equipos de estos al bus sin violar la especificación de carga de 32 UL. Por eso la guía de referencia de Modbus-IDA sugiere tomar medidas especiales de diseño de la red cuando se requieren más de 31 esclavos.

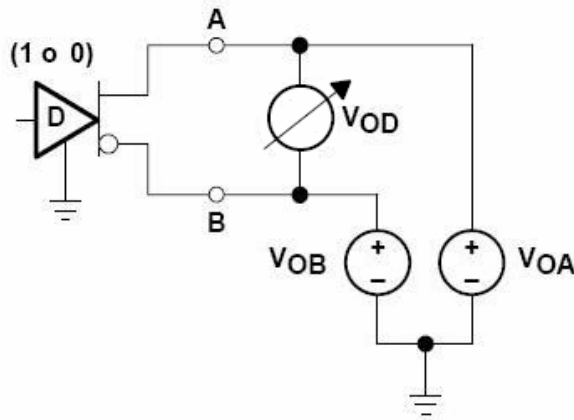
4.3 CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS

A continuación se citan algunas de las características eléctricas que deben cumplir los circuitos de entrada y salida de cada una de las interfaces físicas de los equipos que pertenezcan a la red. Aunque todas las consideraciones que establece el estándar sólo lo tienen en cuenta los diseñadores de los circuitos integrados que conformaran la tarjeta de entrada/salida de los equipos, es importante que se conozcan los principios sobre los que yace el hardware que presta soporte a la red de comunicación Modbus para un correcto diagnóstico de fallas durante la fase de pruebas.

Voltaje de salida de circuito abierto

El valor absoluto de los voltajes de salida con referencia a tierra (V_{OA} y V_{OB}) de cada uno de los terminales A y B no debe superar 6V bajo condiciones de operación sin carga mientras el voltaje diferencial entre los hilos $-V_{OD}$ debe permanecer en el rango de -6V a -1.5V o 1.5V a 6V según sea el caso (V_{OD} positivo/negativo para transmitir un 0/1 lógico, respectivamente).

Figura 24. Circuito de prueba de circuito abierto. $1.5V < |V_{OD}| < 6V$ y $|V_{OA}|, |V_{OB}| < 6V$



Corriente de salida en cortocircuito

Si los terminales A y B del generador (driver) se conectan simultáneamente a una fuente independiente aterrizada a tierra cuyo valor de tensión varía entre -7V y 12V se debe esperar que la corriente que circule por el circuito mostrado (ver figura), no sobrepase los 250mA y que además el driver no sufra daño alguno.

Voltaje de offset

Si se implementa el circuito mostrado en la figura, el driver debe mantener un voltaje de offset en el rango de -1V a 3V mientras al mismo tiempo se respeta un valor mínimo de voltaje diferencial (1.5V) (de modo que se garantice una intensidad de señal adecuada) y se fija un valor máximo (5V). Cuando se presente una conmutación de estado lógico y el subsiguiente cambio de voltaje diferencial se debe respetar una variación en valor absoluto menor a 200mV.

Figura 25. Circuito de prueba de corriente de salida de cortocircuito. $|I_{OS}|$ a tierra $< 250mA$

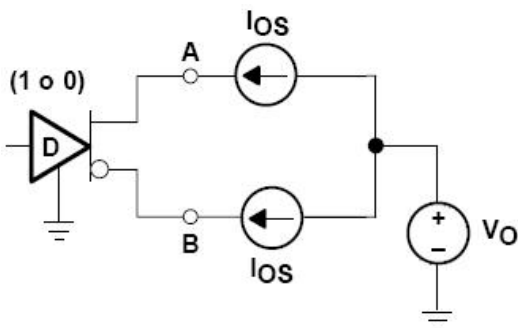
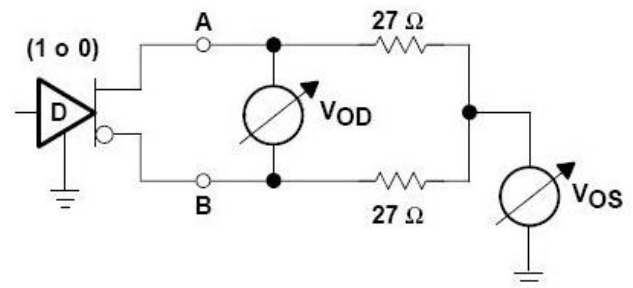


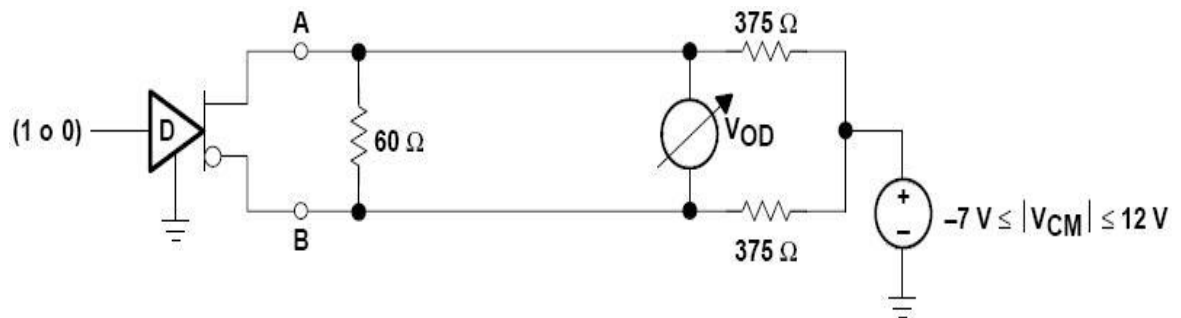
Figura 26. Circuito de prueba para voltaje diferencial y de offset. $1.5V < |V_{OD}| < 5$ y $-1V < |V_{OS}| < 3V$



Voltaje diferencial con carga en modo común

Para voltajes de modo común que oscilen dentro del rango entre $-7V$ y $12V$, el valor absoluto del voltaje diferencial debe permanecer entre $1.5V$ y $5V$ mientras se emplee para pruebas el circuito de la figura.

Figura 27. Circuito de prueba para voltaje diferencial con carga en modo común. $1.5V < |V_{OD}| < 5$

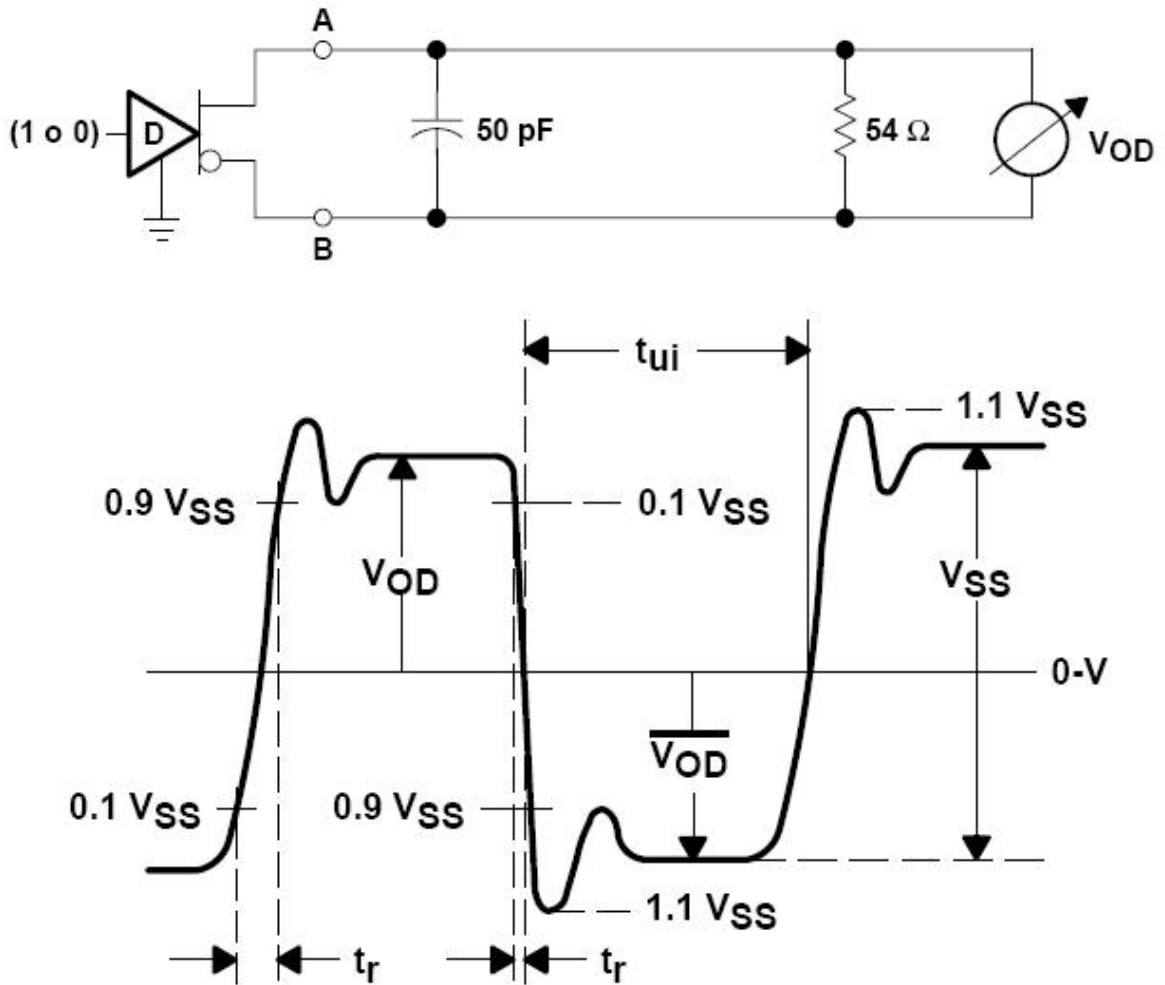


Forma de onda de la señal de salida

Con el fin de garantizar uniformidad en la forma de onda y asegurar buena calidad de transmisión, el estándar 485 establece una prueba de transmisión en la que se conecta una resistencia de $54 \ \Omega$ y un capacitor de 50pF en paralelo entre los bornes A y B del driver. El tiempo de subida o bajada $-t_r-$ que debe tomar la señal para cambiar de estado lógico no puede exceder de 20ns o el 10% del tiempo de duración de un intervalo unitario t_{ui} , el que sea mayor.

Se considera una transición de estado a un cambio en la tensión de salida entre el 10% y el 90% de su valor pico a pico (V_{SS}), o viceversa. Adicionalmente, una vez realizada la transición el valor de la tensión diferencial (señal de salida, V_{DO}) no puede oscilar más del 10% del valor pico a pico y el valor absoluto del voltaje diferencial no puede sobrepasar los $5V$.

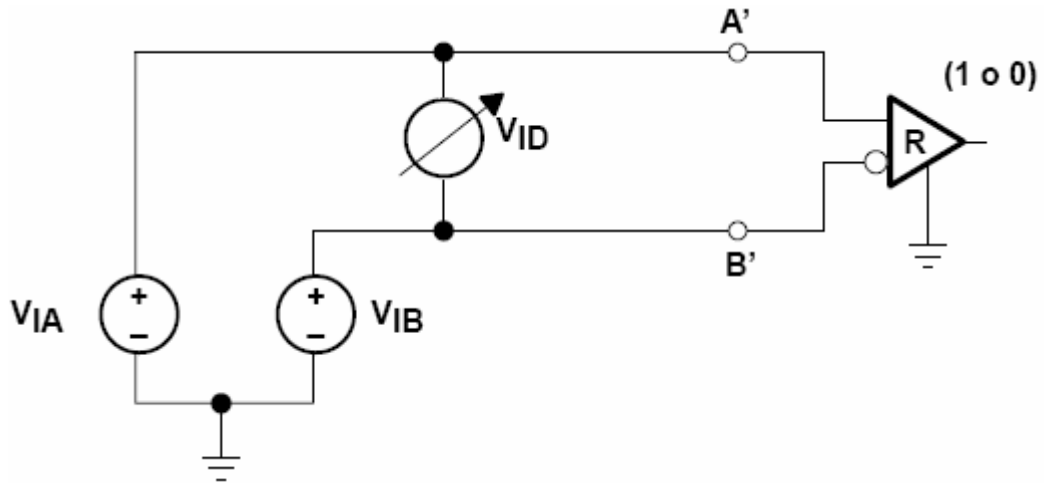
Figura 28. Circuito de prueba y forma de onda de la señal de salida con t_r =tiempo de subida o bajada, t_{ui} =tiempo de duración de un intervalo unitario. $|V_{OD}| < 5V$.



Sensibilidad de entrada

Es fundamental que los circuitos receptores sean capaces de discernir entre los dos estados lógicos binarios para poder establecer una transmisión de datos confiable por esta razón los receptores de señal en los dispositivos que operen bajo 485 deben cumplir algunas pruebas generales de desempeño realizadas en límite eléctrico de operación. Se implementa el circuito de la figura y el receptor debe ser capaz de diferenciar el estado lógico asociado a las tensiones simuladas en las líneas de comunicación.

Figura 29. Circuito de prueba de sensibilidad de entrada de un receptor 485



Los valores de estas tensiones simuladas junto con sus correspondientes valores equivalentes de voltaje de modo común y diferencial se presentan en la tabla respectiva, además, se muestra el estado lógico que debe exhibir la salida del dispositivo receptor junto con la descripción del propósito que persigue la ejecución de una prueba con bajo los voltajes presentados.

Cuadro 9. Sensibilidad de entrada y voltajes resultantes en un receptor 485.

Voltaje aplicado		VID equivalente	VCM equivalente	Estado de salida	Propósito de la prueba
VIA	VIB				
-7V	-6,8V	-200mV	-6,9V	Q'	Voltaje diferencial mínimo con -VCM extremo
+12V	+11,8V	+200mV	+11,9V	Q	Voltaje diferencial mínimo con +VCM extremo
-7V	-2V	-5V	-4,5V	Q'	Voltaje diferencial máximo con -VCM extremo
+12V	+7V	+5V	+9,5V	Q	Voltaje diferencial máximo con +VCM extremo

5. SOFTWARE: STEP7 – ENERVISTA⁵

5.1 INTRODUCCIÓN

Debido a las necesidades particulares de cada cliente en el ámbito de la automatización industrial, los equipos no se fabrican con una funcionalidad única predeterminada sino que cuentan con la posibilidad de ajustar su campo de aplicación; inclusive, en los casos más rudimentarios poseen características parametrizables con algunos ajustes por defectos. Entre más amplio sea el campo de aplicación, más versátil debe ser el comportamiento del dispositivo. Por esta razón, dado el enorme espectro de aplicaciones en las que los controladores programables pueden ser usados (prácticamente cualquier industria), éstos suelen venir acompañados de determinado software que permite configurar el hardware que los compone y elaborar las rutinas que deben llevar a cabo. Así, los PLC SIMATIC S7-300 cuentan con su entorno de programación propio llamado STEP7, que actualmente se encuentra disponible en las versiones STEP7 Lite, STEP7 Basis y STEP7 Professional.

Del otro lado, los relés Multilin SR corresponden a equipos con fines mucho más específicos (industria eléctrica) y por ende su versatilidad es reducida. Están diseñados para ejecutar labores de protección sobre equipos particulares (motor, generador, transformador, línea de alimentación) en circuitos eléctricos y por tal razón se hace menos necesaria la programación de funciones complejas. Tan sólo se requiere del software Enervista Launchpad (un componente de la Suite Enervista) para configurar los equipos previamente a su puesta en servicio.

Figura 30. Componentes de la suite Enervista (software General Electric). Para configuración básica de IEDs sólo se requiere del Launchpad



⁵ Manuales de referencia SIEMENS AG

Para efectos del presente proyecto se utilizó casi exclusivamente STEP7 para darle solución al problema planteado, mientras que el uso de Enervista se vio limitado a la configuración de comunicaciones de los relés. Tal como se explicará en el presente capítulo, STEP7 no es solamente un programa sino un conjunto de aplicaciones que permiten personalizar a gusto los PLC de modo que tanto sus componentes como su programa corren al antojo del usuario.

5.2 COMPONENTES DE STEP7

El software STEP 7 es un entorno universal de programación para configurar y programar toda la gama de controladores SIMATIC incluyendo versiones ya en desuso. El software asiste al usuario en todas las fases del proceso de elaboración de soluciones de automatización, incluido el diagnóstico de fallas en caso de averías en la instalación. Dentro de este entorno contiene amplias herramientas y funciones para las diferentes tareas de un proyecto de automatización, cabe recalcar que se anida el concepto de proyecto en lugar de programa pues desde el software no sólo se desarrolla una rutina de comandos sino que se configura y define el hardware, las comunicaciones y hasta las librerías de funciones de uno o más controladores SIMATIC de familias diferentes (300, 400, Embedded, S5). Permite además, programar bajo los lenguajes KOP, FUP y AWL (del alemán: Kontaktplan, Funktionsplan y Anweisungsliste) que corresponden al estándar internacional IEC 61131-3.

Cuadro 10. Tipos de lenguaje según IEC 61131-3 y su correspondencia en el entorno STEP7

Tipo de lenguaje	IEC 61131-3	STEP7
Diagrama de funciones	FBD Function Block Diagram	FBD/FUP Function Block Diagram
Diagrama de contactos	LD Ladder Diagram	LAD/KOP Ladder Diagram
Lista de instrucciones	IL Instruction List	STL/AWL Statement List
Texto estructurado	ST Structured Text	SCL Structured Control Language
Gráfico secuencial	SFC Sequential Function Chart	S7GRAPH
Diagrama de bloques	N/A	CFC Continuous Function Chart
Diagrama de gráficos de estados	N/A	S7HIGRAPH

Esta norma internacional se considera como estándar mundial ya que ha enfocado al futuro el campo de los controladores lógicos programables. Se ha adoptado como norma europea y en consecuencia ha pasado a ser sucesora de las diferentes normas nacionales. Gracias a este hecho, se ha avanzado en el proceso de una estandarización mundial que permita obtener ahorros en ingeniería de software debido a normalización no propietaria, además de portabilidad de los programas de usuario orientada hacia una larga durabilidad en equipos de diferentes fabricantes.

Como se dijo anteriormente STEP7 es una suite de aplicaciones diversas administradas desde un programa central que maneja toda la información relacionada al proyecto. Los componentes esenciales de STEP 7 son:

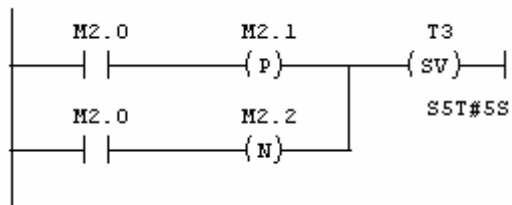
- Administrador SIMATIC para manejar todas las herramientas y los datos de un proyecto de automatización.
- Un editor de programas para elaborar y probar el programa de usuario en los lenguajes de programación KOP, FUP o AWL.
- Configurador de hardware para configurar y parametrizar el equipo físico con el que se trabaja.
- NetPro para configurar redes de transferencia de datos a través del protocolo propietario MPI (Multipoint Interface) o de los protocolos industriales PROFIBUS y PROFINET (Industrial Ethernet).
- Diagnóstico integrado del hardware para obtener información del estado del sistema de automatización.
- PID Control y PID Temperature Control para parametrizar reguladores PID y de temperatura sencillos.
- Editor de símbolos: incluye una interfaz de comandos abierta para importar/exportar datos de otras herramientas de Windows.

Editor de programas

El editor de programas es la interfaz de programación para el programa de usuario. Para la programación están disponibles los lenguajes KOP (esquema de contactos), FUP (diagrama de funciones) y AWL (lista de instrucciones). Los lenguajes de programación KOP, AWL y FUP para S7-300/400 son parte integrante del software estándar (STEP7 en sus 3 versiones).

- KOP (esquema de contactos) es un lenguaje de programación gráfico. La sintaxis de las instrucciones es similar a la de un esquema de circuitos. KOP permite observar la circulación de la corriente a través de contactos, elementos complejos y bobinas.

Figura 31. Ejemplo de programa en KOP



- AWL (lista de instrucciones) es un lenguaje de programación textual orientado a la máquina. En un programa creado en AWL, las instrucciones equivalen en gran medida a los pasos con los que la CPU ejecuta el programa. Para facilitar la programación, AWL se ha ampliado con estructuras de lenguajes de alto nivel (tales como accesos estructurados a datos y parámetros de bloques).

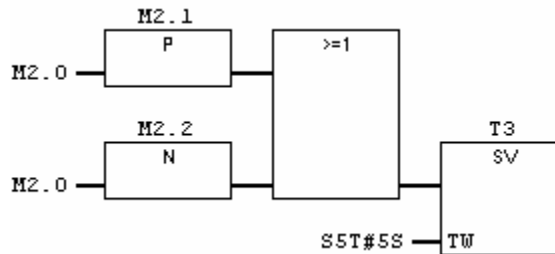
Figura 32. Ejemplo de programa en AWL

```
U    M    2.0
FP   M    2.1
O(
U    M    2.0
FN   M    2.2
)

L    S5T#5S
SV   T    3
```

- FUP (diagrama de funciones) es un lenguaje de programación gráfico que utiliza los cuadros del álgebra booleana para representar la lógica. Asimismo, permite representar funciones complejas (p.ej. funciones matemáticas) mediante cuadros lógicos.

Figura 33. Ejemplo de programa en FUP



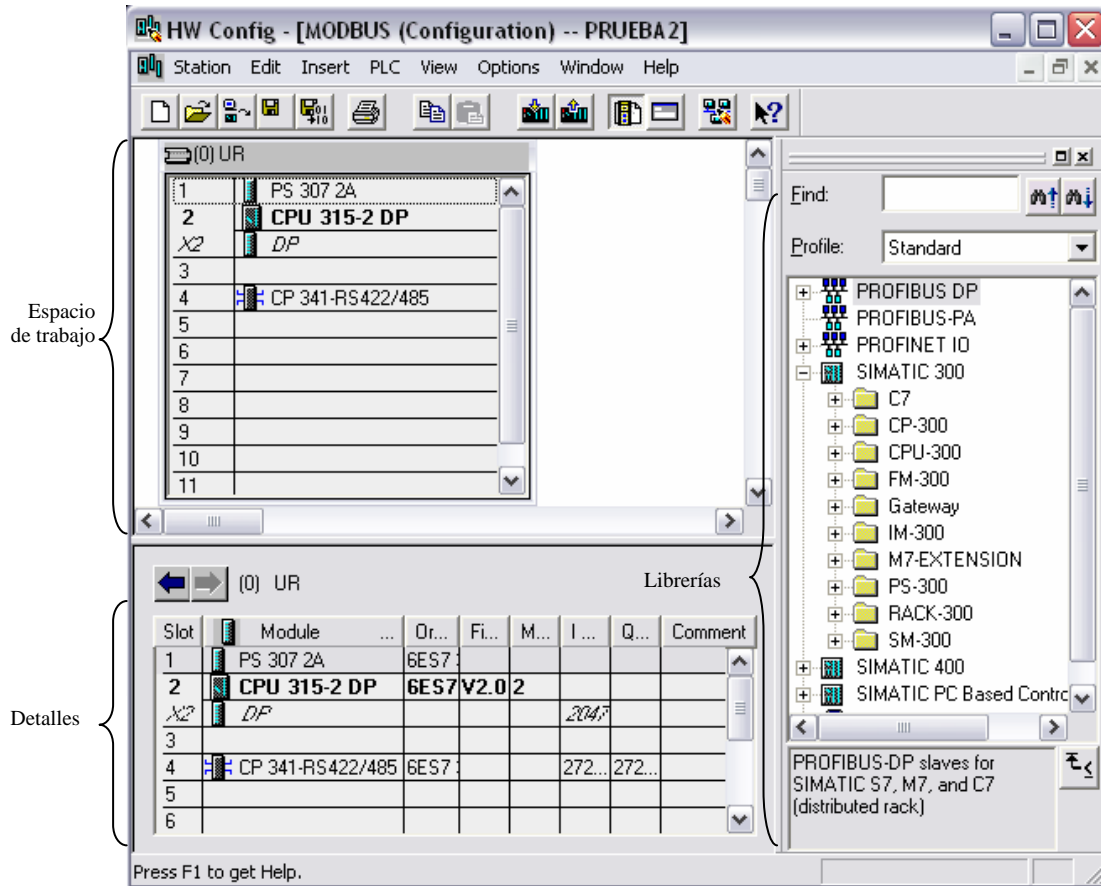
Estos lenguajes se pueden combinar entre sí y, en general, se puede transferir de uno a otro. Aunque en realidad siempre se pueden transferir programas de desde KOP y FUP hacia cualesquiera de los otros dos lenguajes disponibles, pero por lo regular no se suele poder hacer una transferencia desde AWL hacia los demás; esto se debe a que pese que AWL permite programar un código más limpio y rápido, no constituye el modo más estructurado de elaborar rutinas, por consiguiente STEP7 no siempre puede descifrar el orden en que suceden los comandos para poderlos mostrar en lenguaje KOP y/o FUP.

Configuración hardware

Las CPU y los módulos de SIMATIC que hasta hace un par de años solían tener interruptores mecánicos y tornillos de ajuste para configurar su operación, ya no cuentan con esas piezas. Todos los ajustes se realizan de forma centralizada por software. Para ello, el hardware (incluyendo E/S de la periferia) se configura y se parametriza en la herramienta HW Config.

Véase la Figura 34.

Figura 34. Ventana principal de la aplicación STEP7 HW Config. Desde este programa no solo se lleva a cabo la configuración de hardware también permite realizar las labores de diagnóstico de hardware.



Algunas funciones especiales de esta aplicación son:

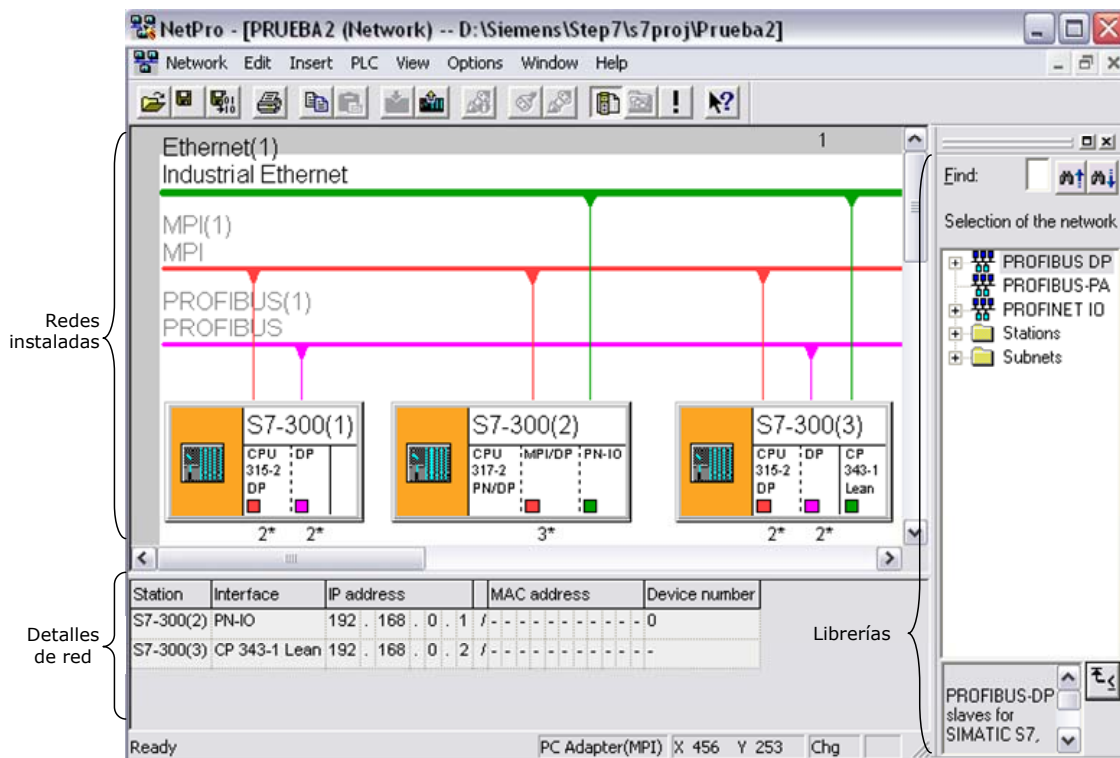
- **Conexión a Internet:** Gracias a la conexión con la información de asistencia técnica del producto disponible en Internet en cualquier momento se puede obtener la información más reciente sobre el hardware empleado. Los nuevos componentes de hardware pueden integrarse directamente en STEP 7 vía Internet sin necesidad de instalar ningún Service Pack, sólo se descargan los archivos .GSD necesarios (archivos descriptivos de dispositivos) y se incluyen en las librerías de trabajo.
- **Configuration in RUN (CiR):** Permite realizar determinadas modificaciones en la configuración de hardware con la instalación en marcha. Al hacerlo, el

procesamiento se detiene como máximo durante un segundo. Durante la configuración del hardware se definen, para ello, elementos de CiR que posteriormente pueden sustituirse paso a paso por objetos reales durante el funcionamiento.

NetPro

La herramienta NetPro de STEP 7 permite configurar la comunicación entre los dispositivos que componen el proyecto. Por medio de este programa se configuran de una forma gráfica y muy clara los enlaces de comunicación entre las diferentes estaciones, en primera instancia se cablean los enlaces físicos y paso seguido se definen los enlaces lógicos con la adecuada selección de protocolos y sus parámetros asociados (direcciones, velocidad). De tal suerte que en una misma ventana se pueden divisar todas las redes conformadas y los equipos que las componen.

Figura 35. Aplicación STEP7 NetPro. Redes configuradas: Industrial Ethernet, MPI y PROFIBUS



Diagnóstico de hardware

El diagnóstico de hardware ofrece información relacionada con el estado instantáneo del sistema de automatización. Para ello, los componentes de hardware que tienen la capacidad de generar información de diagnóstico la envían hacia la CPU para su posterior evaluación a través de STEP 7. Al mismo tiempo también se registran errores en componentes conectados al controlador vía PROFIBUS.

Permite implementar la función "Notificar error de sistema" para mostrar cómodamente la información de diagnóstico ofrecida por los componentes de hardware del control en forma de avisos. STEP 7 genera automáticamente los bloques y los textos de aviso necesarios de modo que se tenga disponible la información con sólo cargarla a la CPU. Cuando se usan sistemas SIMATIC adicionales como HMI (Human-Machine Interface) para visualización y WinCC como SCADA, la transferencia de los textos de diagnóstico a los equipos HMI conectados no requiere programación adicional, dado que STEP 7, SIMATIC HMI y WinCC utilizan una base de datos común.

Con el PC programador existe la posibilidad de realizar un análisis más detallado de errores, ayudando en la estructuración y la puesta en servicio, pero también está disponible durante la instalación. Existen dos tipos de diagnóstico y una opción especial:

- Diagnóstico general: En una ventana se representa gráficamente la topología del controlador, es decir un mímico del sistema que se está trabajando. La indicación del estado de los módulos en dicha ventana ofrece información rápida sin necesidad de cambiar a otras herramientas.
- Diagnóstico de detalle: Si se requieren más datos, desde la ventana general se puede conmutar a una ventana de detalle donde figura información detallada de los errores en texto explícito relativa a los diferentes módulos. Cabe notar que no todos los módulos tienen la posibilidad de monitorear su propio status, en el caso de las CPU, CP y otros módulos con capacidades de procesamiento se cuenta con el buffer de datos, pero por lo regular los módulos de entrada o salida no cuentan con estas opciones y los errores relacionados con éstos se reportan y leen desde la CPU.

- Estado/Forzado: En la vista de topología de HW Config es posible observar y forzar directamente entradas/salidas de la periferia.

Todos los errores se registran en el buffer de diagnóstico contenido en la CPU. En caso de errores críticos la CPU pasa a STOP y se desactivan todas las señales de salida a la periferia. Más adelante se tratan algunas maneras de no detener la CPU cuando se presentan errores pues existen procesos críticos en los que un paro en el funcionamiento del sistema de automatización acarrearía grandes pérdidas y perjuicios.

Editor de símbolos

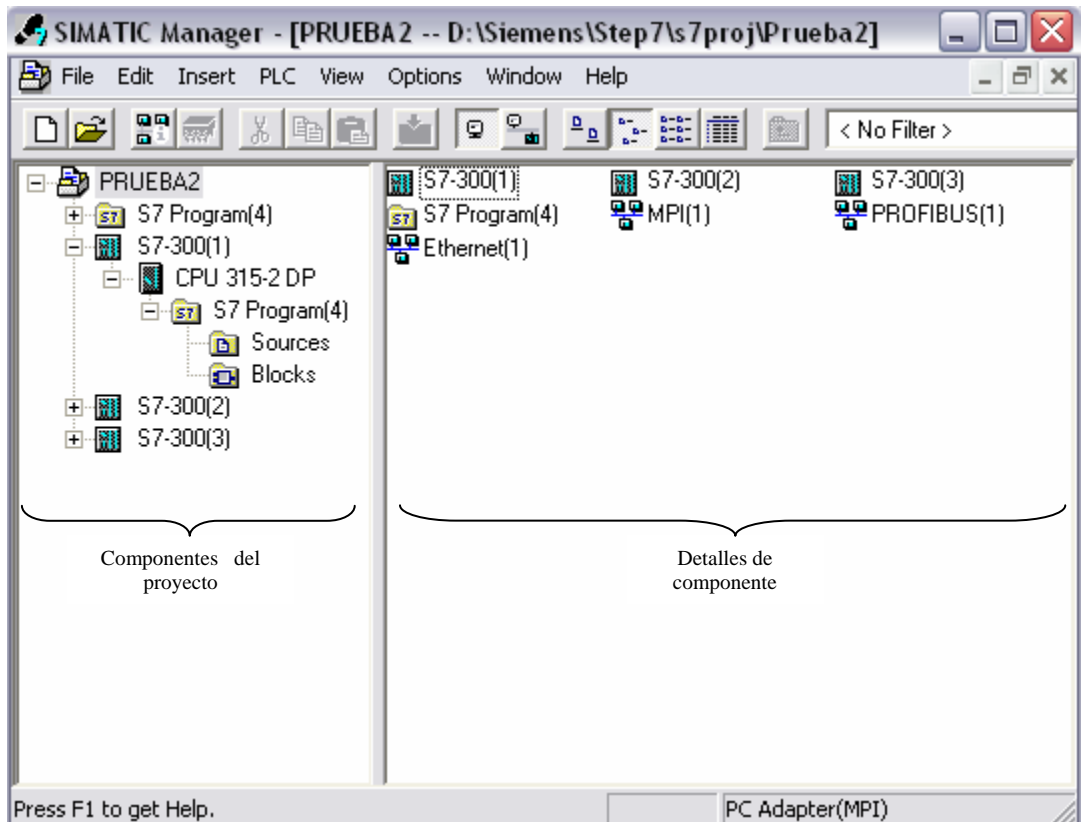
Con el editor de símbolos se gestionan todas las variables globales, es decir a la que pueden acceder todos los OB, FB, FC. Permite definir nombres simbólicos y comentarios para las señales del proceso (entradas y salidas), las marcas y los bloques, incluyendo funciones de ordenación e importación/exportación de/hacia otros programas de Windows.

Todas las demás herramientas listadas pueden acceder a la tabla de símbolos creada. Por consiguiente, detectan automáticamente si se ha modificado un parámetro de un símbolo.

Administrador SIMATIC

El Administrador SIMATIC gestiona todos los datos que pertenecen a un proyecto de automatización. Además se utiliza para crear, copiar, descargar y archivar proyectos, así como multiproyectos. Con esta última opción se pueden configurar instalaciones de una forma flexible y en un tiempo óptimo ya que permite ensamblar un proyecto a partir de diferentes sub-proyectos que diferentes usuarios pueden editar localmente al mismo tiempo. La reagrupación de los proyectos se lleva a cabo con la ayuda del sistema. Así pues, se puede crear, por ejemplo, una subred de comunicaciones que abarque múltiples proyectos de una forma centralizada para todo el multiproyecto.

Figura 36. Administrador SIMATIC STEP7



Desde el administrador también se puede gestionar información externa al programa por medio de opciones de exportar/importar textos y hojas de cálculo en formatos conocidos. Para ello los textos se exportan desde STEP 7, se editan con un editor ASCII o con un programa de hoja de cálculo (por ejemplo, Excel) y, a continuación, se importan de vuelta a STEP 7. De este modo, la información de un proyecto está disponible en diferentes formatos y/o idiomas, lista para ser entregada a los clientes que compraron la solución.

Complementario al último punto, STEP7 permite que además del programa de usuario en sí (las rutinas), los datos de todo el proyecto también puedan almacenarse en la tarjeta de memoria de la CPU en el PLC. Estos datos pueden consultarse fácilmente durante las tareas de servicio técnico, no siendo necesario guardarlos en el PC. Otra ventaja estriba en el hecho de que se puede guardar información relacionada con comentarios sobre el programa de usuario y nombres particulares asignados a las variables involucradas en el proceso, también se pueden guardar manuales, especificaciones técnicas de los módulos, guías de

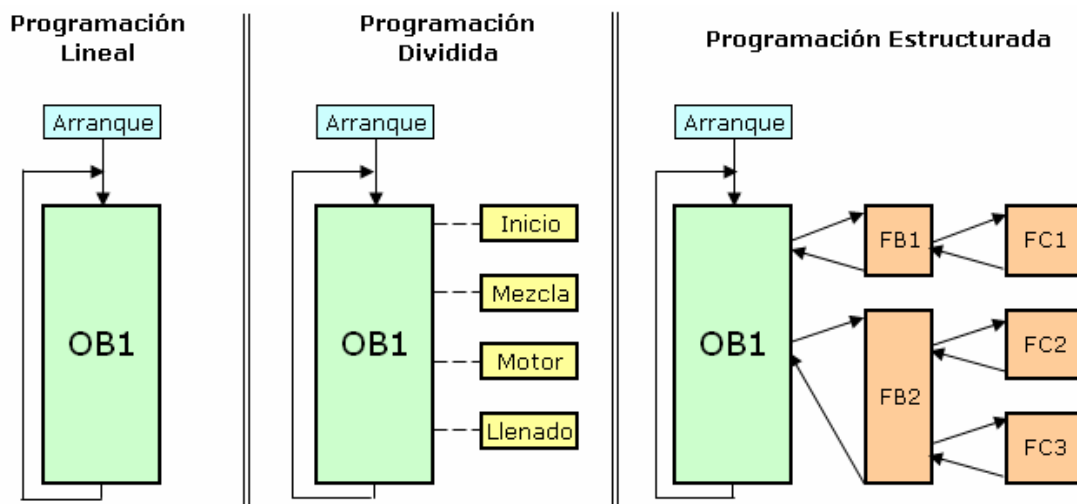
referencia y en general todos los informes que faciliten las labores de mantenimiento y reparación.

5.3 COMPONENTES DEL PROGRAMA DE USUARIO

Una característica esencial de STEP7 es la posibilidad de programación estructurada. En caso de programas voluminosos, es recomendable, y a veces imprescindible, dividirlos en distintas secciones de programa (partes de la rutina principal cerradas en sí mismas), que tengan una relación tecnológica o funcional. Estas partes de programa reciben el nombre de bloques, de modo que cada bloque es una parte del programa de usuario delimitada por su función, estructura o finalidad de uso.

Bajo STEP7 existen tres maneras de organizar el programa de usuario, por medio de programación lineal, dividida o estructurada. En el primer caso todas las instrucciones están contenidas en un bloque (normalmente en el bloque de organización cíclico, OB1) sin clasificación ni ordenación de las instrucciones. En el segundo caso se tiene también un solo módulo, no obstante las instrucciones para funciones individuales están contenidas en áreas individuales (network o segmento, según sea el idioma de la versión de STEP7), luego el OB1 llama a los segmentos individuales sucesivamente. La tercera manera por su parte es la única que hace uso de diferentes bloques y llamados sucesivos entre ellos. Para una mejor comprensión de las particularidades de cada modo de programación se presenta una gráfica resumen.

Figura 37. Esquemas de programación lineal, dividida y estructurada en STEP7



Es evidente entonces que la implementación de bloques de programa permite que las terceras personas que acceden a los programas al realizar tareas de servicio técnico, mantenimiento o modificaciones posteriores puedan entenderlos con más facilidad, procesarlos de un modo más sencillo y probarlos por secciones; además, las partes del programa se pueden estandarizar y reutilizar en otras aplicaciones.

Los elementos (bloques) de un programa de usuario en el entorno STEP7 se clasifican de acuerdo a su funcionalidad, a continuación se presentan cada uno de ellos junto con una breve descripción y sus características principales.

Bloques de organización (OB)

Los bloques de organización determinan la estructura del programa de usuario ya que constituyen la interfaz entre el sistema operativo y el programa de usuario. Controlan el comportamiento en arranque del sistema de automatización, la ejecución cíclica y controlada por alarmas del programa y el tratamiento de errores a través del llamado de rutinas: al arrancar la CPU (*warm restart*), en ejecución intermitente temporal, a determinadas horas o en determinados días, después de transcurrir en tiempo preestablecido, al producirse errores o al dispararse alguna alarma de proceso (ver tabla). La versatilidad de sus eventos de arranque hace más fácil la programación de rutinas especiales sin necesidad de usar recursos como temporizadores y contadores de la CPU.

Cuadro 11. Bloques de organización generales para CPUs S7-300

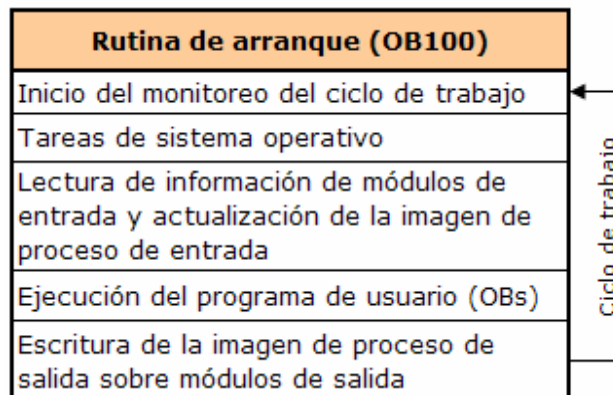
OB	Evento de arranque	Prioridad ajustada	Aclaración
OB1	Final de arranque o final de OB1	1	Ciclo libre
OB10 a OB17	Alarma horaria 0 a 7	2	Sin valores por defecto
OB20 a OB23	Alarma de retardo 0 a 3	3 a 6	Sin valores por defecto
OB30	Alarma cíclica 0 (valor prefijado: impulso de 5s)	7	Alarmas cíclicas
OB31	Alarma cíclica 1 (valor prefijado: impulso de 2s)	8	
OB32	Alarma cíclica 2 (valor prefijado: impulso de 1s)	9	

OB	Evento de arranque	Prioridad ajustada	Aclaración	
OB33	Alarma cíclica 3 (valor prefijado: impulso de 500ms)	10		
OB34	Alarma cíclica 4 (valor prefijado: impulso de 200ms)	11		
OB35	Alarma cíclica 5 (valor prefijado: impulso de 100ms)	12		
OB36	Alarma cíclica 6 (valor prefijado: impulso de 50ms)	13		
OB37	Alarma cíclica 7 (valor prefijado: impulso de 20ms)	14		
OB38	Alarma cíclica 8 (valor prefijado: impulso de 10ms)	15		
OB40 a OB47	Alarma de proceso 0 a 7	16 a 23		Alarmas de proceso
OB55 a OB57	Alarmas de estado, actualización y fabricante	2		Alarmas DPV1
OB61 a OB64	Alarmas de sincronismo 1 a 4	25	Alarmas de sincronismo	
OB80	Error de tiempo	28	Alarmas de error asíncrono	
OB81	Fallo de alimentación	28		
OB82	Alarma de diagnóstico	28		
OB83	Alarma de extraer/insertar (presencia de módulo)	28		
OB84	Avería CPU	28		
OB85	Error de ejecución del programa	28		
OB86	Fallo de un bastidor, de un sistema maestro DP o de una estación descentralizada	28		
OB87	Error de comunicación	28		
OB88	Procesamiento interrumpido	28		
OB90	Rearranque completo, borrado de un bloque en curso de tratamiento en el OB90, carga o fin de un OB90 en la CPU	0.29	Ciclo de tarea no prioritario	
OB100	Rearranque completo	27	Arranque	
OB121	Error de programación	Según OB causa del error	Alarmas de error síncrono	
OB122	Error de acceso a la periferia	Según OB causa del error		

El OB1 presenta la prioridad más baja de todos los OBs sometidos a vigilancia en lo que respecta a su tiempo de ejecución, con excepción del OB90 todos los demás OBs pueden interrumpir la ejecución del OB1. Los eventos que dan lugar a que el sistema operativo llame al OB1 son el final de la ejecución del arranque o el final de la ejecución del OB1 en el ciclo anterior; una vez finalizada la ejecución de este bloque el sistema operativo escribe datos globales y antes de arrancar un nuevo ciclo escribe la imagen de proceso de salidas en los módulos de salida, actualiza la imagen de proceso de las entradas desde los módulos correspondientes y recibe datos globales de la CPU.

Este último proceso descrito corresponde a lo que se denomina ciclo de trabajo del procesador del PLC ya que se ejecuta indefinidamente desde que el sistema de automatización se encuentre encendido y no haya fallas que lleguen a detener el trabajo de la CPU. Existe una supervisión del tiempo de ciclo máximo (*watchdog*) que garantiza un tiempo de reacción máximo así como también un porcentaje máximo del procesamiento de datos de comunicación que asegura un tope de tiempo a estas labores. Por defecto los valores de fábricas para estos parámetros son 150ms para el ciclo de trabajo y 20% de ese tiempo para ejecutar las comunicaciones.

Figura 38. Ciclo de trabajo de la CPU



Si el programa sobrepasa el tiempo de ciclo máximo para el OB1, el sistema operativo llama al OB80 (OB de error de tiempo). En caso de no haberse programado alguna rutina con ese OB, la CPU se detiene y anuncia su estado a través del LED frontal STOP. Además de la supervisión del tiempo de ciclo máximo, puede garantizarse también el cumplimiento de un tiempo de ciclo mínimo en cuyo caso el sistema operativo retarda el comienzo de un nuevo ciclo según el valor programado.

Funciones (FC)

Las funciones son bloques lógicos programables con parámetros absolutos o formales, ya que no tienen ningún bloque de datos asignado necesitan siempre valores de entrada actuales cuando se les llama y como no tiene memoria no se les puede asignar un valor inicial a sus datos locales. Así, los datos locales generados por una función se pierden una concluye su ejecución, mientras que los datos temporales se memorizan en la pila de datos locales; en caso de requerirse los datos generados en rutinas fuera de la función, se debe utilizar un bloque de datos global que almacene esta información.

Bloques de función (FB)

Los bloques de función son también bloques lógicos programables con parámetros absolutos. Disponen de un bloque de datos asignado (bloque de datos de instancia) en el que se almacenan datos estáticos además de los parámetros de entrada y de salida. De este modo, los FB mantienen los valores procesados incluso a lo largo de varios ciclos debido a que los datos de DB no se borran con la finalización en la ejecución del FB.

Su principal ventaja estriba en que permiten ejecutar varias una función con diferentes parámetros de entrada y salida almacenados en bloques de datos de instancia diferentes, así por ejemplo, se puede programar una sola rutina de control para un motor y con ella controlar tantos motores como se quiera asignando a cada un DB diferente.

Los FB y FC son programados por el usuario, quién puede inhibir la visualización de los mismos a través de una función de protección. Esta función es interesante, por ejemplo, para los fabricantes de maquinaria, que así pueden proteger su producción intelectual. En ese caso, los FB/FC se presentan como cajas negras que ocultan al usuario cómo se ha implementado la función, tal como sucede con la FB7 y FB8 que permiten la transferencia de datos de y hacia el CP341 durante la comunicación Modbus, no se sabe cómo se procesan los datos pero se cumple a cabalidad con el objetivo de cada una (recepción y envío, respectivamente).

Bloques de datos (DB)

Los bloques de datos son áreas de memoria que contienen datos de usuario.

Estos bloques pueden estar asignados a bloques de función sueltos o a todo el proyecto. En el caso de estar asignados a un determinado FB (DB de instancia) permiten almacenar la información generada durante la ejecución de la función de manera exclusiva (sólo se puede acceder al DB de instancia desde el FB al que esté asociado), mientras los DBs asignados a todo el proyecto (DB global) permiten almacenar datos indiscriminadamente.

Funciones de sistema (SFC) y bloques de funciones de sistema (SFB)

Corresponden a funciones y bloques de funciones integrados en las librerías generales de STEP7, dado que se necesitan repetidamente están disponibles en el sistema operativo de las CPU S7 y se pueden llamar desde allí. Estas funciones son, por ejemplo, funciones para la comunicación, el manejo del reloj y del contador de horas de funcionamiento y la transferencia de registros.

Áreas de memoria

La memoria de trabajo de la CPU se encuentra distribuida y direccionada de acuerdo a la función que cumple la información almacenada de modo que existen diversas áreas en donde se alojan datos con características diferentes. Dentro del programa de usuario se identifican con un prefijo que designa su funcionalidad. A continuación se listan las áreas y la descripción de los datos que contienen; se presentan los prefijos de nomenclatura alemana (nomenclatura inglesa entre paréntesis).

Cuadro 12. Áreas de memoria de la CPU

Área de memoria	Prefijo	Descripción
Imagen de proceso de entrada	E (I)	La CPU escribe sobre esta área los valores digitales leídos desde los módulos de entrada
Imagen de proceso de salida	A (Q)	La CPU envía los valores almacenados en esta área hacia las salidas digitales asociadas a los módulos de salida
Marcas de memoria	M (M)	Memoria disponible para almacenar resultados intermedios del programa de usuario
Temporizador	T (T)	Memoria de trabajo para temporizadores
Contador	Z (C)	Memoria de trabajo para contadores
Bloque de datos (global)	DB (DB)	Datos de usuario disponibles para su uso en el programa de usuario

Área de memoria	Prefijo	Descripción
Bloque de datos (de instancia)	DI (DI)	Datos asignados para su uso con FBs o SFBs
Datos locales (temporales)	L (L)	Área donde se almacenan los datos temporales que genera un bloque mientras está siendo ejecutado
Periferia de entrada	PE (PI)	Área de acceso directo a los datos de los módulos de entrada locales o distribuidos
Periferia de salida	PA (PQ)	Área de acceso directo a los datos de los módulos de salida locales o distribuidos

5.4 ENERVISTA LAUNCHPAD

Tal como se aclaró al inicio del capítulo el software utilizado para manejar los relés fue el Launchpad de la suite Enervista. Dado que estos equipos no requieren de programación porque su aplicación es específica, solo basta con configurar ciertos parámetros para ponerlos en servicio de tal suerte que el desarrollo de la solución que se propone este proyecto estaba centrado en el PLC y una configuración coherente de los relés. Por este motivo no se hizo necesario un uso exhaustivo de Enervista, simplemente se probaron algunos esquemas de direccionamiento del mapa de memoria de usuario y se implementó la herramienta *Modbus Analyzer* para forzar valores en ciertos registros y direcciones.

En general los relés tienen distribuido su mapa de memoria en tres áreas diferentes: datos del sistema, setpoints y valores actuales. En datos del sistema se almacena la información inherente a la composición física y de firmware del dispositivo, así que es de sólo lectura; en setpoints se guardan los valores de operación que el equipo debe tener en cuenta para llevar a cabo las labores de protección, por ende es un área de lectura/escritura. En valores actuales se registran todos los valores instantáneos de las variables que puede medir el relé por ende es un área de sólo lectura.

Figura 39. Ventana de inicio Enervista Launchpad



Enervista Launchpad es sencillamente la aplicación de inicio de la suite Enervista desde donde se accede a los demás componentes instalados de la suite. También gestiona la configuración de todos los dispositivos (IEDs) de la familia Multilin así como la información técnica relacionada con ellos previa instalación de un add-on correspondiente para cada equipo (ver barra de herramientas en la figura). Así, para cada relé se tiene una ventana de aplicación diferente en donde se presentan los parámetros específicos que se deben asignar para cumplir con sus labores de protección.

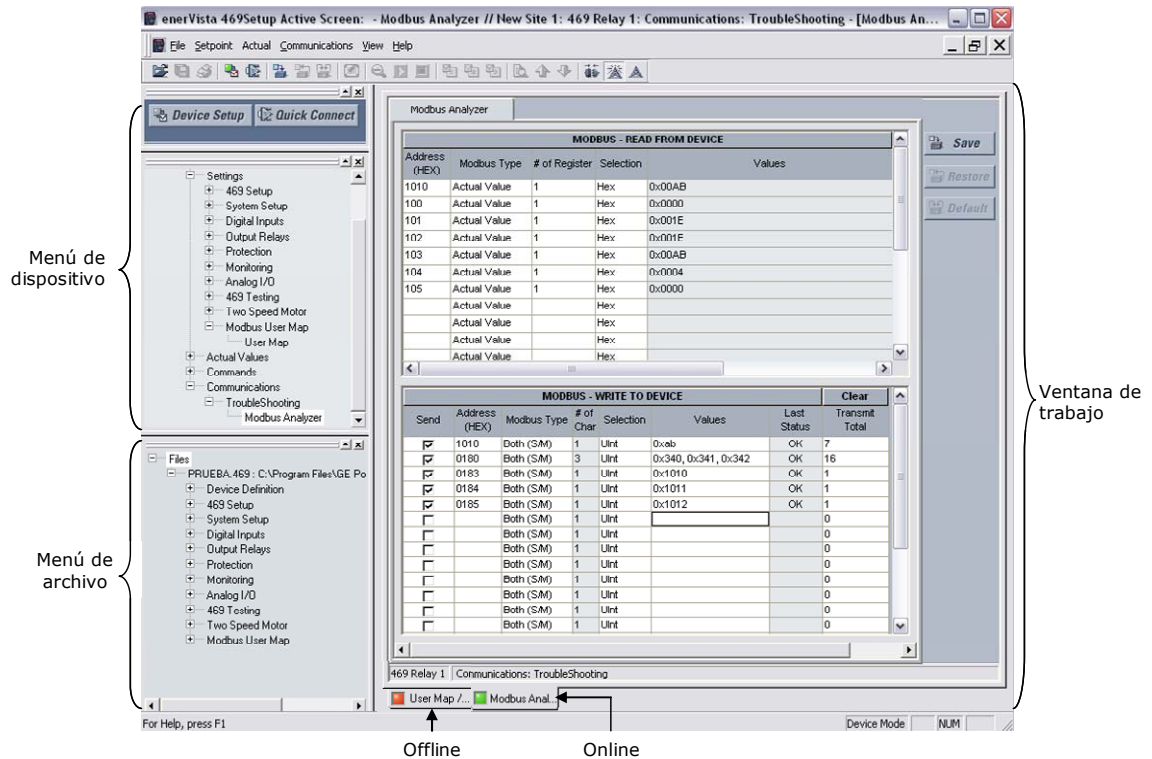
Una vez seleccionado el IED con el que se desea trabajar, se despliega una ventana que hace el papel de interfaz hombre-máquina para ajustar la configuración del equipo. A continuación se muestra y describe la ventana del *469 Setup*, para los demás relés operados se cuenta con parámetros diferentes pero con una organización visual y funcional similar.

Comandos

Constituyen dos herramientas denominadas: *Quick COnnect* y *Device Setup*. La primera de ellas permite la conexión con el relé usando por defecto una comunicación serial a 9600 baudios, sin paridad, con 8 bits de datos y 1 bit de parada en la que el usuario solamente define el puerto a utilizar (COMx). *Device Setup* establece también comunicación con el relé pero a través de un menú más

organizado y específico ya que admite escoger el tipo de enlace a utilizar (Serial, Ethernet, MODEM), el equipo a parametrizar y la descripción particular del mismo.

Figura 40. Ventana del Enervista 469 Setup



Menú de dispositivo

Desde esta ventana se presentan todas las opciones de configuración en línea a las que se puede acceder dentro del equipo, muestra además algunas herramientas para probar el correcto funcionamiento del relé, simular alarmas y disparos y solucionar problemas de comunicación Modbus. Una vez se conecta el equipo y se establece el enlace lógico se pueden ajustar los setpoints tal como si se estuviera accediendo directamente desde el teclado físico, pero a través de una interfaz gráfica más amigable.

Dentro de este menú se encuentra el *Modbus Analyzer*, herramienta de prueba Modbus mediante la cual se pueden forzar valores hexadecimales en los registros del mapa de memoria del dispositivo siempre y cuando sean de lectura/escritura,

de lo contrario sólo se pueden leer datos. Para esto tiene dos ventanas, una de lectura Modbus desde el dispositivo para adquirir datos de sistema, setpoints o valores actuales, y una de escritura Modbus sobre dispositivo para forzar setpoints exclusivamente.

Menú de archivo

Esta ventana admite la configuración de los relés offline trabajando con archivos 469 en los que almacenan los parámetros, la distribución de las opciones es bastante similar al menú de dispositivo. Una vez elaborados estos archivos basta conectar el relé y cargar el archivo para dejarlo listo para servicio.

6. DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN⁶

6.1 INTRODUCCIÓN

En el capítulo anterior se mencionó que la solución al problema que tiene por objeto el presente proyecto se desarrollaba principalmente sobre la plataforma STEP7, lo que en otras palabras significa que la responsabilidad recae sobre el PLC y su correcta programación y configuración de hardware, mientras que los relés simplemente deben sincronizarse con la rutina de PLC a través de una adecuada parametrización. Este capítulo pretende mostrar el trabajo previo al montaje, pruebas y puesta en servicio de la red. Por tanto ilustra el funcionamiento y configuración del PLC desde el punto de vista de hardware así como el desempeño lógico a nivel de software, es decir, la organización del programa, los bloques utilizados y las rutinas que contiene cada uno de ellos. En primera instancia se describe la configuración de hardware desde la aplicación respectiva (HWconfig) y a continuación el software que gobierna al controlador.

6.2 CONFIGURACIÓN DE HARDWARE

Dado que el problema a resolver por medio del presente trabajo surge de un proyecto propio de la empresa, el hardware utilizado no sólo cubre las necesidades de comunicación descritas a lo largo de este documento sino que también se ajusta a los requisitos exigidos por un cliente específico a SIEMENS. En este orden de ideas durante el desarrollo y prueba preliminar del programa STEP7 se utilizó una configuración de hardware demo compuesta por los equipos listados en el capítulo 2; no obstante esta configuración de simulación dista bastante de la configuración real que será puesta en servicio por SIEMENS, ya que éste consta de 5 módulos distribuidos de la siguiente manera: 1 CPU 315-2DP, 2 procesadores de comunicaciones CP 341, 1 módulo de 32 entradas digitales y 1 módulo de 32 salidas digitales; no hay módulo de alimentación porque el PLC estará montado en riel dentro de la caja de baja tensión de una celda de 6,3kV.

⁶ Manuales de referencia SIEMENS AG

Cuadro 13. Configuración de hardware exportada desde STEP7

Modules	MLFB	Type	Slot	Firmware version
Name				
PS 307 2A	6ES7 307-1BA00-0AA0	Module	1	
CPU 315-2 DP DP	6ES7 315-2AG10-0AB0	ControllerTarget SubModule	2 2(1)	V2.0
CP 341-RS422/485	6ES7 341-1CH01-0AE0	Target	4	
DI8/DO8x24V/0.5A	6ES7 323-1BH00-0AA0	Module	5	

Como se citó en el capítulo 2 y lo confirma la tabla precedente, se emplearon un módulo de alimentación, la CPU, un procesador de comunicaciones y un módulo simulador de señales digitales SM374. Aunque éste último no aparece explícitamente en la lista de partes, en HWconfig se le asigna una referencia coherente de acuerdo a la función que esté desempeñando el módulo. En este caso en particular se empleo en la modalidad de 8 entradas digitales y 8 salidas digitales, por tanto STEP7 permite la implementación de un SM323 en su lugar ya que esta referencia ejecuta esta misma labor (8 IN + 8 OUT).

Todos los módulos incluidos a través de la herramienta de configuración traen definidos ciertos parámetros por defecto que permiten operarlos sin necesidad de asignaciones adicionales, sin embargo, para poder llevar a cabo ciertas acciones durante el programa de usuario a la CPU se le debe incluir la posibilidad de correr bloques de organización que operen bajo alarmas horarias (la CPU 315 sólo puede cargar el OB10).

El módulo de alimentación no tiene parámetros configurables y por su parte el módulo de entradas y salidas sólo permite asignar las direcciones en las que se desea almacenar los valores de sus variables, no obstante para fines del presente no tiene trascendencia absoluta.

Por otro lado, el procesador de comunicaciones si tiene parámetros configurables que tiene un papel determinante durante el establecimiento de la comunicación Modbus. En primera instancia se debe tener en cuenta que el CP341 tal y como viene de fábrica de Alemania sólo puede operar protocolos de bajas prestaciones y poca difusión tal como lo son el protocolo ASCII para manejo de impresoras, protocolo RK512 para comunicación punto a punto con ordenadores y el protocolo 3964 de propiedad SIEMENS para comunicación con otros equipos de la marca.

Por tal motivo, se debe adquirir una licencia Modbus Maestro de uso individual que consiste en una llave de hardware con memoria local que físicamente se inserta en un slot posterior del CP y, un componente de software por medio del cual STEP7 reconoce las nuevas prestaciones del módulo y así admite la descarga del driver del protocolo sobre el CP. Además se habilitan nuevos parámetros del CP en HWconfig tras la instalación de este software: parámetros Modbus-Master y parámetros de interfaz.

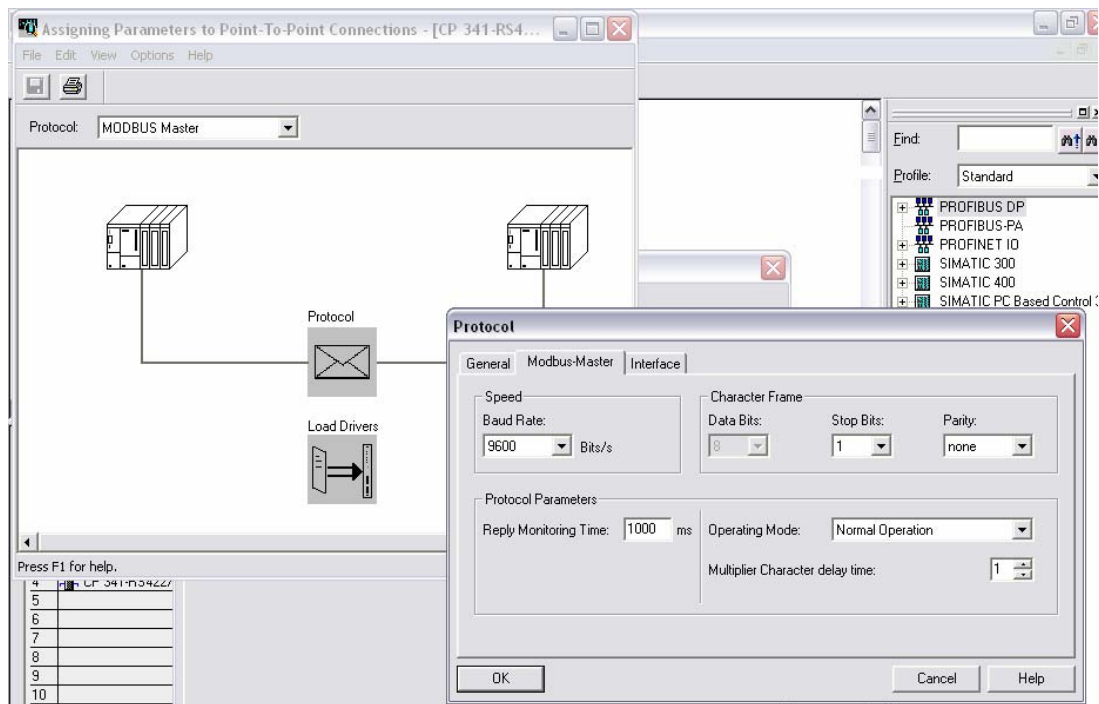
Parámetros Modbus-Master

Desde esta nueva pestaña se puede configurar a nivel de capa 2 del modelo OSI la manera en que serán enviados todos los datos que provienen del programa de usuario en STEP7. Se cuentan con las siguientes opciones:

- Velocidad: Corresponde a la rata de baudios de transmisión. Se puede seleccionar entre 2.4, 4.8, 9.6, 19.2, 38.4, 57.6 y 76.8 Kilobaudios.
- Bits de datos: Por defecto se emplean siempre 8 bits de información de usuario por carácter transmitido; este parámetro es de fin exclusivamente informativo.
- Bits de parada: Define el número (1 o 2) de bits de parada por carácter.
- Paridad: Define el modo de chequeo de errores en caracteres empleado (par o impar) o permite desactivar esta opción (no paridad).
- Tiempo de respuesta: Establece el tiempo máximo en milisegundos que debe esperar el procesador para obtener respuesta del esclavo que se esté indagando.
- Modo de operación: Existen dos posibilidades.
 - Normal: Cada vez que se detecta un error o incoherencia durante el inicio y la finalización de cada transmisión de datos, se genera un código de error correspondiente.

- Supresión de interferencias: Sólo se genera código de error si se detecta error o incoherencia al inicio de la transmisión y subsecuentemente se descarta la trama enviada por el esclavo. En caso de presentarse algún error luego del CRC, se ignora ese estado.
- Multiplicador de tiempo de carácter: En caso de que algún esclavo no pueda alcanzar los requerimientos de tiempo Modbus se puede multiplicar el tiempo de transmisión de cada carácter por un factor entero entre 1 y 10.

Figura 41. Ventana auxiliar de HWconfig para configurar el protocolo Modbus en el CP 341



Parámetros de interfaz

Esta pestaña permite definir los parámetros de operación a nivel de capa física. Por una parte define que tipo de estándar eléctrico que se utiliza: RS422 para operación full-duplex a cuatro hilo o, RS485 para operación half-duplex a dos hilos. Por otro lado establece los niveles de tensión de los hilos en estado de inactividad de la red, es decir el voltaje diferencial presenta cuando no hay transmisión. Existen tres posibilidades para los niveles de tensión:

- Ninguno: no establece voltajes forzados desde la salida eléctrica del CP.
- Señal R(A) 0V/ Señal R(B) 5V: mantiene los niveles de tensión que el estándar recomienda en caso de inactividad cuando no hay transmisión.

Señal R(A) 5V/ Señal R(B) 0V: mantiene invertido los niveles de tensión recomendados de modo que en caso de la ruptura de una línea de transmisión se puede detectar a través del cambio de esta lógico.

6.3 DESCRIPCION DE LA SOLUCIÓN

Antes de poder presentar la solución que permite comunicar el PLC con los relés de protección es necesario echar un vistazo a la disposición física que seguirán los equipos dentro de la subestación en la que se van a instalar porque de esta ubicación dependerán algunos factores que pueden llegar a ser determinantes durante el montaje, implementación y prueba. Se debe aclarar que para cada proyecto diferente se debe diseñar un programa de usuario propio y un conjunto de configuraciones particulares para parametrizar los relés, no obstante el principio de solución es siempre el mismo y sólo basta con algunos retoques sobre las rutinas en STEP7 y algunas variantes en Enervista Launchpad para poder correr con éxito las comunicaciones Modbus en otro proyecto con requerimientos similares.

Los equipos que constituyen el eje central del proyecto serán instalados en una subestación de un cliente de SIEMENS en la que realiza el proceso de distribución de energía eléctrica a 6 motores y 2 líneas de distribución secundaria. Se involucran sistemas eléctricos operando a 115KV (un transformador de tres devanados, -T100 junto con su respectiva celda de control), 34.5KV (un transformador de dos devanados, -T200, junto con su celda de control) y 6.3KV (tablero de distribución con doce celdas, +L01 a +L12), claramente diferenciados en el diagrama unifilar.

Desde las líneas de 115KV del sistema interconectado nacional se alimenta el transformador –T100 de 10MVA que posee tres devanados: uno primario conectado en Y y dos secundarios de alimentación a 6.3KV y 34.5KV conectados en Y y delta, respectivamente. Para efectos de maniobra de patio se cuenta con un interruptor y un seccionador motorizados operados desde la celda de control =E01+R01 (según nomenclatura SIEMENS).

El devanado de 6.3KV alimenta directamente el tablero de media tensión mientras que la salida a 34.5KV debe pasar al transformador –T200. El transformador –T200 es bidevanado de 6MVA y recibe la línea de 34.5KV de -T100 para reducirla a 6.3KV; para maniobras de patio dispone de un seccionador sin motor y un interruptor motorizado manejados desde la celda de control =H01+R01 y para protección contra fallas de sobretensión y descargas atmosféricas se dispuso un pararrayos que está conectado a tierra (el circuito de 115KV posee uno también). El propósito de esta segunda línea de 6.3KV es proveer otra entrada al tablero de 13.2KV.

El tablero de distribución está compuesto por doce celdas que se pueden categorizar según la función que desempeñan, hay así dos celdas de entrada, dos de salida a línea de distribución secundaria, seis de salida a motores, una de acople y una de transición. A continuación se muestra el diagrama unifilar para una mejor comprensión de la topología eléctrica del sistema (incluye equipos de celda).

Véase la Figura 42.

Como se puede apreciar del diagrama, la red está compuesta de 10 relés esclavos y un PLC maestro distribuidos geográficamente en tres partes separadas: el tablero, la celda de control de –T100 y la celda de control de –T200. Se pretende centralizar toda la información del sistema eléctrico en el PLC a fin que pueda enviar esta información a otro controlador a través del CP adicional con protocolo Modbus-Slave (el S7300 será esclavo en esta otra red ya que es el equipo indagado), no obstante el alcance de este proyecto se limita a recopilar la información en el PLC SIMATIC.

Tal como se ha planteado el objetivo que se busca es que el sistema de automatización sea capaz de recoger la información de estado del sistema eléctrico a través del módulo de entrada y del módulo de comunicación Modbus. La recopilación desde la periferia del PLC no ha sido nunca un problema, sin embargo es el proceso de adquisición de datos a través de la red Modbus lo que pretende solucionar y documentar este proyecto.

Se pretende en esta sección describir a grosso modo el principio de operación de la solución desarrollada basada en la previa descripción del sistema eléctrico, la explicación del programa de usuario en detalle se presenta posteriormente.

Con el fin de poder supervisar el sistema eléctrico es necesario que permanentemente se cuente con la información que procesan los relés, para el cliente final es importante que se tenga la información referente al estado del interruptor de potencia, el estado de los interruptores termo-magnéticos de las celdas, los valores de voltaje y corriente, el estado de los relés de protección (disparo, alarma) y en general ciertas señales relativas a la función de la celda.

En el caso de las celdas que no tienen relé estos datos se ingresan directamente al módulo de entrada del PLC pero en el caso de las celdas con relé, la información se pide directamente al equipo de protección.

Desde el CP se deben indagar todos los esclavos a fin de que suministren la información relevante de acuerdo a la función que desempeñan, para los SR469 y SR760 se requieren los valores de voltaje y corriente de línea de cada fase, mientras que para los SR 745 los valores de corriente juegan un papel vital (se supervisan todas las corrientes de todos los devanados) siendo el valor de voltaje de línea (o fase) casi irrelevante y GE solamente permite monitorizar un valor de voltaje en una única fase. A nivel general, el estado operativo del relé es siempre indispensable.

La estrategia para adquirir la información de los relés una vez se conocía la disposición de los equipos y sus características fue sencilla, el PLC indagaría uno por uno todos los relés y requeriría de una sola transacción Modbus para obtener de ellos todos los datos precisados.

Se decidió que se realizaría una sola transacción porque el aporte al tiempo de ciclo de comunicaciones asociado al proceso de varias transacciones cortas (pocos bytes de datos) era mayor que el aporte de una sola transacción larga (mayor volumen de bytes). Se aprovecha así la posibilidad de determinar un mapa de memoria de usuario en los relés y el tiempo de actualización de variables en el PLC se reduce.

Arbitrariamente se decidió que la dirección de esclavo de cada uno de los relés iría de acuerdo al consecutivo de celda que ocupa en el tablero; para los relés ubicados en las celdas de control se siguió con el mismo consecutivo de acuerdo

al nivel de tensión de los equipos que protegen (dirección 12 para la celda de 34.5KV y dirección 13 para la de 115KV). Se resolvió también que el programa de usuario debía permitir la adecuación de otros esclavos en caso de ampliaciones de la subestación y se tuvo en cuenta a la hora de la programación.

6.4 PROGRAMA DE USUARIO

Ya que una característica destacable de STEP7 es la posibilidad de estructurar ordenadamente el programa de usuario, se dispuso de esta opción para la realización de este proyecto. De tal suerte que se hizo uso de OBs, DBs, FCs, SFBs, y FBs; el papel que desempeña cada uno se describirá detalladamente teniendo en cuenta que se procura seguir el orden de las tareas programadas conforme se avanza en la descripción del mismo, de igual modo en algunas partes se remite al lector al respectivo segmento (network) del programa conforme se cita su funcionalidad.

STEP7 permite también el uso de tabla de símbolos en donde se resumen los nombres comunes que se le pueden asignar a todas las variables globales que maneje el programa de usuario; las variables que se incluyen dentro los bloques de datos no son nombrados desde esta herramienta ya que esto se hace desde otra, simplemente se cita el DB como una variable más.

A partir de este punto se llamará a cada una de las variables listadas en la tabla 6.2 indiscriminadamente de acuerdo su nombre absoluto (lenguaje de máquina) o su nombre simbólico según se considera sea más fáciles el entendimiento del tema que se este explicando.

Cuadro 14. Tabla de símbolos del programa de usuario

SIMBOLO	DIRECCION	TIPO VARIABLE
+L2	VAT 4	Tabla de variables
+L3	VAT 6	Tabla de variables
+L4	VAT 7	Tabla de variables
+L5	VAT 8	Tabla de variables
+L8	VAT 9	Tabla de variables
+L9	VAT 10	Tabla de variables
+L10	VAT 11	Tabla de variables
+L11	VAT 5	Tabla de variables
+L12	VAT 12	Tabla de variables

SIMBOLO	DIRECCION	TIPO VARIABLE
+L13	VAT 13	Tabla de variables
DATOS ENVIO 03 READ	DB 21	DB 21
DATOS ENVIO 10 WRITE	DB 22	DB 22
DB CONTROL ENVIO	DB 40	DB 40
DB CONTROL RECEPCION	DB 41	DB 41
DB DATOS ESCLAVO 10	DB 10	DB 10
DB DATOS ESCLAVO 11	DB 11	DB 11
DB DATOS ESCLAVO 12	DB 12	DB 12
DB DATOS ESCLAVO 13	DB 13	DB 13
DB DATOS ESCLAVO 2	DB 2	DB 2
DB DATOS ESCLAVO 3	DB 3	DB 3
DB DATOS ESCLAVO 4	DB 4	DB 4
DB DATOS ESCLAVO 5	DB 5	DB 5
DB DATOS ESCLAVO 8	DB 8	DB 8
DB DATOS ESCLAVO 9	DB 9	DB 9
DB DE RECEPCION	DB 43	DB 43
ENABLE FC 22	M 2.0	BOOL
ENVIO MODBUS 03 READ	FC 21	FC 21
ENVIO MODBUS 10 WRITE	FC 22	FC 22
FC DE RECEPCION	FC 23	FC 23
GENERADOR DE RELOJ	FC 32	FC 32
IDB_P_RCV_RK	DB 70	FB 7
IDB_P_SND_RK	DB 50	FB 8
INICIALIZACION	FC 10	FC 10
No DB RECEPCION	MW 20	INT
OFFSET DB ENVIO 03 READ	MW 10	INT
P_RCV_RK	FB 7	FB 7
P_SND_RK	FB 8	FB 8
RD_REC	SFC 59	SFC 59
RELOJ1 ENVIAR	M 1.0	BOOL
RELOJ2 RECIBIR	M 1.1	BOOL
RESTART	OB 100	OB 100
RUTINA PRINCIPAL	OB 1	OB 1
SELECTOR ESCLAVOS ENVIO	FC 11	FC 11
SELECTOR ESCLAVOS RECEP	FC 13	FC 13
SR469	VAT 14	Tabla de variables
TOD_INT0	OB 10	OB 10
VAT1	VAT 1	Tabla de variables
VAT2	VAT 2	Tabla de variables
VAT3	VAT 3	Tabla de variables
WR_REC	SFC 58	SFC 58

Bloque de organización OB100

El evento que activa este bloque es el reinicio de la CPU. Cada vez que el usuario pasa la CPU del estado STOP a RUN se escribe sobre los bloques de datos 40 y 41 la dirección lógica de memoria desde donde inician los registros del CP y se llama incondicionalmente a la función FC10. Se busca así que por ningún motivo la CPU “olvide” desde cuales registros debe leer la información que viaja por el bus y que es adquirida por el procesador de comunicaciones.

Función FC10

Se encarga exclusivamente de inicializar en cero todas las condiciones de envío y recepción de información a través del CP. Así, carga con cero las palabras que contienen los bits de control, los contadores de éxito y error y las palabras que los estados actuales de la transacción de comunicación del CP. Se busca que siempre haya información actualizada que corresponde al tiempo desde el último arranque exitoso del sistema de automatización.

Bloque de organización OB1

Debido a la estructuración del programa en varias partes funcionales no se desarrollan rutinas dentro de este bloque, se hacen llamadas a las funciones que contienen en sí las acciones a llevar a cabo. Inicialmente se hace un llamado incondicional al generador de reloj para que marque la pauta de envío y recepción de información desde y hacia el procesador de comunicaciones (Network 1).

Se destaca en este punto que el procesador de comunicaciones una vez se configura desde HWconfig trabaja por sí sólo y desde el programa de usuario simplemente se suministra la información necesaria y se activa-desactiva la función de envío o recepción, en otras palabras el CP no se programa, es la CPU exclusivamente la que lleva las rutinas.

Paso seguido se acciona el temporizador T3 de 30 segundos cada vez que haya un cambio en el estado lógico de la señal ENABLE FC 22 (Network 2). Así la señal T3 exhibirá un estado lógico 1 siempre y cuando no se haya vencido el tiempo estipulado (estado lógico 0), con esta ejecución se logra que mientras el temporizador esté activo se haga un llamado a la función 22 (Network 3) y mientras que se encuentre inactivo se corran las funciones 11, 13, 21 y 23

(Network 4, 5, 6 y 7, respectivamente). La explicación de las rutinas de cada función se hace en su respectiva sección.

Funcion FC32

Es una de las funciones más sencillas con que cuenta el programa de usuario pero es quizás la más importante porque regula el flujo de información entre la CPU y el CP y entre el CP y los esclavos que estén conectados al bus. Según el manual de funcionamiento del CP y la guía de usuario de la licencia Modbus Maestro que vende SIEMENS, el proceso de recepción de información es indiscriminado ya que se asume que la información procedente del bus corresponde a la del esclavo indagado.

No obstante la situación real es diferente. Debido a que el flujo de datos de una transacción Modbus completa comprende 5 componentes de la red: CPU-CP-esclavo, esclavo-CP-CPU y el tiempo de procesamiento de información de cada uno de ellos es diferente se puede presentar el caso de que la CPU haga el llamado al CP para que indague a un esclavo y después reciba la información del otro esclavo indagado previamente. Por esta razón se utilizan dos señales de reloj que regulan que durante un semiciclo se lleven a cabo labores de envío a un esclavo n y justo en el semiciclo siguiente se realizan las tareas de la información proveniente del esclavo correspondiente.

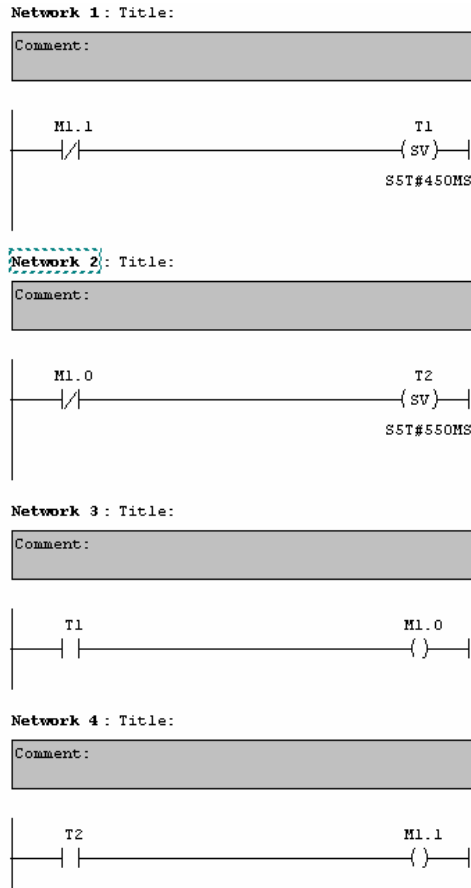
La función utiliza los temporizadores T1 y T2 junto con dos marcas de bit para generar estas señales. Las marcas son imágenes de los temporizadores a las que se asignó un nombre simbólico de acuerdo al proceso que regulan: RELOJ1 ENVIAR y RELOJ2 RECIBIR.

Los valores de los tiempos que se mantienen activas las señales provienen de las pruebas preliminares realizadas en el campo de pruebas de la fábrica de tableros de SIEMENS sin tener en cuenta la disposición final del PLC y los relés, las distancias de los cables y la posible interferencia causada por los equipos de potencia de las celdas.

El funcionamiento de las señales es el siguiente: cada vez que se activa un temporizador (T1), se activa (pasa a estado lógico 1) también la marca imagen correspondiente (M 1.0) y se mantiene esta situación mientras el temporizador no caduque. Pero una vez se vence el tiempo preestablecido se genera un flanco de bajada en el temporizador y la marca imagen, este flanco se programó como

disparo del otro temporizador (T2) y su marca imagen asociada (M 1.1) y es ahora T2 quien permanece activo y la marca M 1.1 en estado lógico 1. De igual forma, una vez caduca este tiempo se genera un flanco de bajada que activa el temporizador T1 y el proceso se repite de nuevo, indefinidamente.

Figura 43. Rutina de la función FC32



Se debe tener en cuenta que recién se reinicia la CPU todos se registros de memoria no retentiva (incluye las variables tipo marca) se asignan a cero. Observando cuidadosamente la estructura cruzada de la rutina (la marca de un temporizador activa el arranque del otro y viceversa) se evidencia que los temporizadores se activan simultáneamente ($M 1.0 = M 1.1 = 0$) y sus marcas asociadas también lo hacen, contradiciendo la operación descrita. Para dar solución a este inconveniente los tiempos de cada temporizador tienen que ser diferentes y así siempre alguno se vence primero y da inicio al funcionamiento previsto para la rutina.

NOMBRE	TIPO	VALOR INICIAL	DESCRIPCIÓN
REGISTER1	WORD	W#16#210	469 STATUS
REGISTER2	WORD	W#16#300	469 PHASE Ia
REGISTER3	WORD	W#16#301	469 PHASE Ia
REGISTER4	WORD	W#16#302	469 PHASE Ib
REGISTER5	WORD	W#16#303	469 PHASE Ib
REGISTER6	WORD	W#16#304	469 PHASE Ic
REGISTER7	WORD	W#16#305	469 PHASE Ic
REGISTER8	WORD	W#16#340	469 VOLTAGE ab
REGISTER9	WORD	W#16#341	469 VOLTAGE bc
REGISTER10	WORD	W#16#342	469 VOLTAGE ca
REGISTER11	WORD	W#16#202	745 CONDITIONS
REGISTER12	WORD	W#16#204	745 LOGIC INPUT STATUS
REGISTER13	WORD	W#16#280	745 WINDING 1 PHASE Ia
REGISTER14	WORD	W#16#282	745 WINDING 1 PHASE Ib
REGISTER15	WORD	W#16#284	745 WINDING 1 PHASE Ic
REGISTER16	WORD	W#16#290	745 WINDING 2 PHASE Ia
REGISTER17	WORD	W#16#292	745 WINDING 2 PHASE Ib
REGISTER18	WORD	W#16#294	745 WINDING 2 PHASE Ic
REGISTER19	WORD	W#16#2A0	745 WINDING 3 PHASE Ia
REGISTER20	WORD	W#16#2A2	745 WINDING 3 PHASE Ib
REGISTER21	WORD	W#16#2A4	745 WINDING 3 PHASE Ic
REGISTER22	WORD	W#16#449	745 LINE VOLTAGE
REGISTER23	WORD	W#16#200	760 STATUS
REGISTER24	WORD	W#16#300	760 PHASE Ia
REGISTER25	WORD	W#16#301	760 PHASE Ib
REGISTER26	WORD	W#16#302	760 PHASE Ic
REGISTER27	WORD	W#16#308	760 VOLTAGE ab
REGISTER28	WORD	W#16#309	760 VOLTAGE bc
REGISTER29	WORD	W#16#30A	760 VOLTAGE ca
REGISTER30	WORD	W#16#204	760 LOGIC INPUT STATUS
REGISTER31	WORD	W#16#2D2	469 STARTER_STATUS
REGISTER32	WORD	W#16#2D5	469 MCBS_DC
REGISTER33	WORD	W#16#2D6	469 INTERRUPTOR_CERRADO
REGISTER34	WORD	W#16#2D7	469 SELECTOR_EN_REMOTO
REGISTER35	WORD	W#16#2D8	469 INTERRUPTOR_VIBRACION

Durante las pruebas hechas a los equipos conectados en red se contó con un PLC y relés con referencias SR469, SR745 y SR760. Se cableó la red en topología *daisy chain* y de acuerdo a los manuales de los relés se definió un listado de direcciones que se escribirían sobre el mapa de direcciones de usuario de todos los dispositivos.

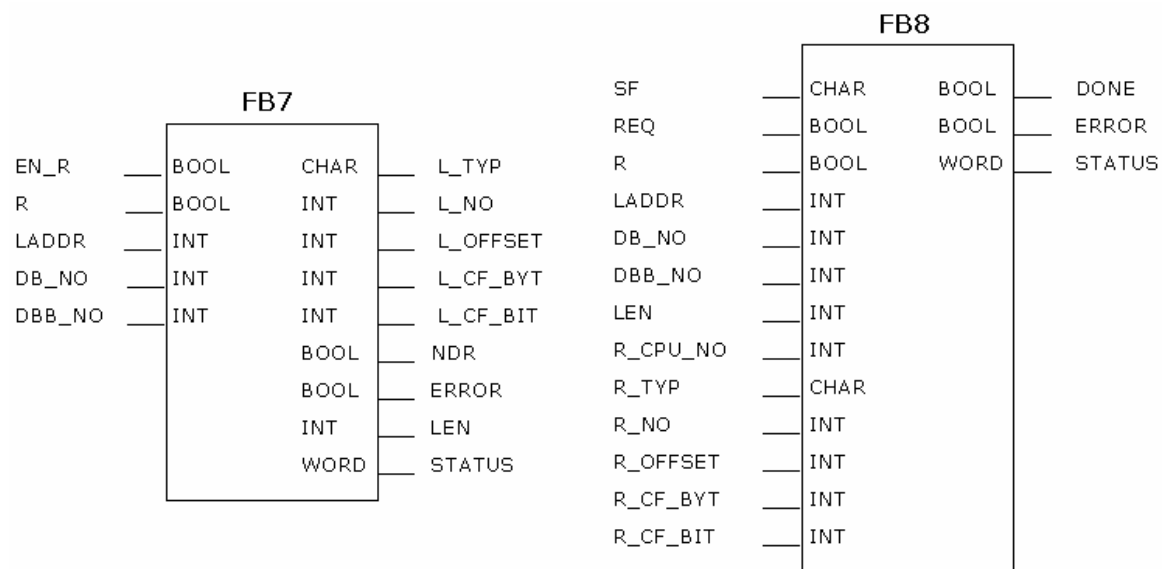
El propósito de que se realice este proceso cada hora se apoya en la posibilidad de falla durante el funcionamiento de los relés en sitio y el posterior reemplazo por uno de repuesto, como este nuevo esclavo a pesar de mantener la referencia y las funcionalidades de protección tiene por defecto el mapa de direcciones de usuario en cero, se hace necesario que algún ente externo (hombre o máquina) le informe las señales que serán indagadas a él. Aprovechando la presencia del PLC, periódicamente le “recuerda” a sus esclavos las direcciones de los registros en donde almacenan la información requerida.

La función prácticamente consiste en un llamado al bloque de función FB8 que opera con el bloque de datos de instancia 50. Previamente se ha escrito sobre el DB40 la longitud del mensaje a enviar para que el CP lo tenga presente. Una vez se ha enviado el mensaje Modbus, se inicializan en cero las variables que se encargan de la selección del esclavo a indagar.

La función FC22 ejecuta una petición a todos los esclavos a través de la modalidad broadcast (petición al esclavo 0), por ende no corre ninguna rutina de recepción de respuesta porque las especificaciones del protocolo así lo determinan.

Bloques de función FB7 y FB8. Bloques de datos de instancia DB50 y DB51

Figura 45. Diagramas en lenguaje KOP de los bloques de función FB7 y FB8



Estos bloques de función junto con sus correspondientes bloques de datos de instancia son suministrados por la división de automatización y control de SIEMENS Alemania. Los FBs 7 y 8 ejecutan labores de recepción y envío – respectivamente- hacia el CP pero por cuestiones de protección de material intelectual sus rutinas se encuentran protegidas contra escritura y lectura.

Simplemente se suministran tutoriales y guías sobre su manejo pero para el usuario es transparente el procesamiento que se lleva a cabo en el bloque, el programador se debe resignar a la asignación adecuada de los parámetros de entrada para poder obtener una respuesta coherente en las variables de salida.

Cuadro 16. Parámetros de operación del bloque de función FB8

Parámetro	Nota / Comentario
SF	Seleccionar envío o recepción local, por lo regular se asigna el carácter "S" (Send)
REQ	Habilita ejecución con un flanco de subida
R	Cancela ejecución con un flanco de subida
LADDR	Dirección lógica de los registros del CP, configurada en el hardware a través de la herramienta HWconfig en STEP7
DB_NO	Numero del bloque de datos fuente (información necesaria para transacción Modbus)
DBB_NO	Numero de byte en donde inicia la información fuente (offset)
LEN	Longitud en bytes del mensaje a ser enviado
R_TYP	Tipo de dirección de la CPU, se asigna "X"
DONE	Ejecución del envío completo y con éxito
ERROR	Error durante la ejecución del bloque de función
STATUS	Mensaje de estado con información detallada relacionada con la ejecución de la función
	<i>Los demás parámetros del bloque no son necesarios con el protocolo Modbus y pueden permanecer vacíos. Los parámetros de salida sólo se encuentran disponibles durante un ciclo de CPU.</i>

Cuadro 17. Parámetros de operación del bloque de función FB7

Parámetro	Nota / Comentario
EN_R	Habilita ejecución del bloque
R	Cancela ejecución con un flanco de subida
LADDR	Dirección lógica de los registros del CP, configurada en el hardware a través de la herramienta HWconfig en STEP7

Parámetro	Nota / Comentario
DB_NO	Numero del bloque de datos destino (información proveniente de la transacción Modbus)
DBB_NO	Numero de byte en donde inicia la información de usuario (offset)
NDR	Ejecución de al recepción completa y exitosa
ERROR	Error durante la ejecución del bloque de función
LEN	Longitud en bytes del mensaje recibido
STATUS	Mensaje de estado con información detallada relacionada con la ejecución de la función
<i>Los demás parámetros del bloque no son necesarios con el protocolo Modbus y pueden permanecer vacíos. Los parámetros de salida sólo se encuentran disponibles durante un ciclo de CPU.</i>	

Por inspección durante las pruebas con el PLC se hizo evidente que estos FBs hacen llamados a las funciones de sistema SFC58 y SFC59 porque la CPU las carga automáticamente en la memoria de trabajo cada vez que se hace uso de alguno de los FB citados. Según la ayuda de STEP7 los nombres simbólicos de estas funciones son: *escritura de registros de datos* y *lectura de registros de datos*, pero las razones que obedecen a este llamado no son conocidas.

En cuanto a los DBs respectivos, es posible escribir y leer los datos que allí se alojan. Pero si se llegan a modificar los valores iniciales de las variables o si se eliminan algunas de ellas el FB queda inutilizable. Los nombres y comentarios de la mayoría de las variables están escritos en alemán, así que la información que se encuentra almacena aquí tampoco es útil.

Funciones FC13 y FC11

Físicamente la red está compuesta por once dispositivos conectados en bus bajo la configuración *daisy chain*. De todos estos dispositivos existe un solo maestro y los otros diez equipos son esclavos. El PLC hace el papel de maestro y es el encargado de realizar el supervisorio de las señales que necesita el usuario para adaptarlas directamente a una interfaz hombre-máquina o para enviarlas a un nivel de control superior (SCADA, por ejemplo), es quien también realiza las peticiones a cada uno de los esclavos y debe hacerlo uno por uno porque así lo determinan las especificaciones del protocolo Modbus. Aunque existe el modo broadcast, sólo esta habilitado para funciones Modbus de escritura.

Debe existir entonces una(s) rutina(s) que regule en el PLC el direccionamiento de esclavos a fin de realizar peticiones a todos los entes involucrados por cada ciclo

de comunicaciones. Las funciones FC11 y FC13 llevan a cabo separadamente esta labor ya sea para el envío o la recepción, respectivamente. El proceso involucra un contador síncrono que a cada ciclo de los relojes regula el orden y el destino de la información generada por el maestro para su posterior transmisión por el bus.

Inicialmente se planteo una solución con dos contadores pero al probarse el programa en fábrica se evidenció que los procesos de envío y recepción se hacían muy independientes y sincronizarlos para su actuación conjunta demandaba mayores recursos de la CPU y por consiguiente mayor tiempo de procesamiento. Además, dado que una vez se realice una petición a un esclavo determinado es de esperarse que sea solamente éste el que responde, queda claro que los contadores separados en realidad llevan la misma cuenta, en otras palabras se concluyó que no era necesario el uso de dos contadores porque en realidad el conteo se hace en el mismo sentido (ascendente o descendente) pero con un pequeño desfase de tiempo.

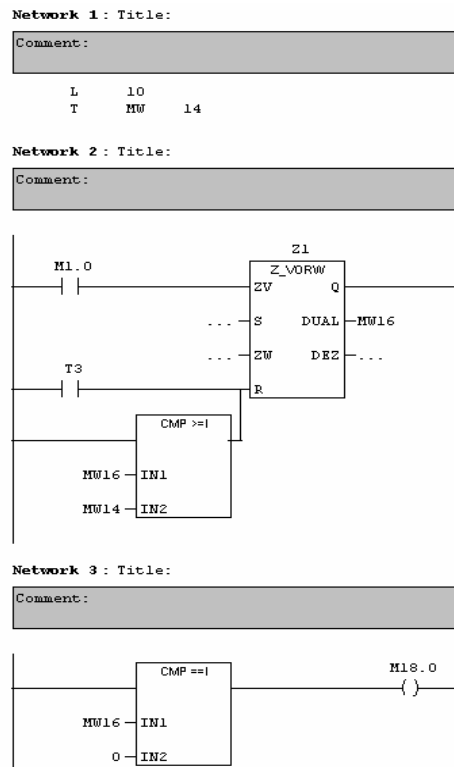
A fin de aclarar lo anterior se ampliará un poco la información al respecto. Supongamos que en un momento determinado el maestro se encuentra realizando una petición a esclavo n , el contador que regula los envíos debe estar en el valor que previamente se le ha asociado a este esclavo. Un instante después – dependen los tiempos de los relojes 1 y 2, FC32-, el contador que regula la recepción debe estar también en el valor asociado al mismo esclavo n para mantener la coherencia. Luego se repite el proceso para el esclavo $n+1$ y se continúa hasta indagarlos a todos. Se evidencia que fácilmente un contador realiza el trabajo y es cuestión de tiempo adelantar o atrasar los selectores para envío o recepción.

Este tiempo de desfase corresponde al tiempo que toma al PLC completar una transacción Modbus. De esto modo los relojes generados por la función FC32 cumplen un doble papel: disciernen operaciones de envío o recepción y habilitan el contador que regula el direccionamiento de esclavos. Es lógico esta situación, si los relojes habilitan transferencias –ya sea de ida o venida- pueden también suministrar la señal que permita contarlas.

De este modo la operación conjunta de las funciones FC11, FC13 y FC32 es como sigue: cada vez que hay un flanco de subida en el reloj 1 (M 1.0) se lleva a cabo la transferencia de información de transacción Modbus hacia el CP para que éste genere la petición a un esclavo, mientras por otra parte se activa el conteo ascendente de una unidad en el contador Z1 operado desde FC13. Una vez se vence el tiempo de envío se desactiva el reloj 1 y comienza el tiempo de T2 a

hacerse vigente a través de un flanco de subida en reloj 2 (M 1.1), se habilita así la transferencia de datos desde el CP de modo que llega a la CPU la información enviada por el esclavo, junto con esta acción se transfiere el valor de conteo de Z1 hacia un registro de memoria llamado desde FC11. Culinado el tiempo de recepción se inicia un nuevo ciclo de comunicaciones pero con peticiones direccionadas hacia el siguiente esclavo.

Figura 46. Rutina abreviada de la función FC13, los segmentos 4 a 17 son copias sucesivas del segmento 3 (no aparecen en la gráfica)



La función FC13 consta de un contador Z1 con límite de conteo definido por usuario, una se alcanza este valor se reinicia la cuenta. Posee también numerosos comparadores que activan ciertas marcas habilitadoras según el valor de conteo actual, aunque sólo se emplean 10 esclavos en la red se dispuso de comparadores para soportar hasta una red de 15 esclavos previendo futuras ampliaciones. El objetivo de las marcas habilitadoras es conmutar las direcciones de esclavo para recepción desde la función FC23.

Del mismo modo, la función FC11 posee también 15 marcas habilitadoras con sus respectivos comparadores. En este caso no existe ningún contador sino que hay un bloque de transferencia que actualiza el valor del contador Z1 en un registro de 16 bits de marca para que los comparadores tengan un valor fijo de comparación cada vez que se corre la función. Las marcas determinadas por esta función permiten conmutar las direcciones de esclavo de envío desde la función FC21.

A pesar que el reloj 1 está asociado con la ejecución del envío de información hacia un esclavo se encarga de llevar la cuenta ordenada de la dirección del esclavo del que se recibirá información con un flanco de subida del reloj 2; asimismo, el reloj 2 está asociado con labores de recepción de datos provenientes del esclavo pero lleva la cuenta de la dirección del esclavo al que se le enviará la petición una vez se presente el siguiente flanco de subida del reloj 1. En estas rutinas los relojes hacen referencias cruzadas entre la acción que llevan a cabo (envío/recepción) y el control de los datos que permiten realizar la acción (selección dirección de esclavo de recepción/envío).

Función FC21

Cuando se realiza una petición de lectura desde un esclavo solamente se requiere suministrar 6 bytes de datos desde el programa de usuario (dirección: 1 byte, función: 1 byte, dirección inicio de datos: 2 bytes, número de registros: 2 bytes) mientras que el volumen de la información recibida es casi 12 veces mayor, 70 bytes en nuestro caso (35 registros de 16 bits cada uno).

Por lo tanto, ante tal disparidad se optó por generar un bloque de datos con la información de envío para los 10 esclavos, 60 bytes en total, y un bloque de datos para cada esclavo en donde se almacenan la información que cada uno provee, 10 x 70 bytes en total. La razón de esta determinación es arbitraria pero busca una mejor organización del programa, se pueden ordenar los datos que maneja el programa de cualquier manera e igual la operación de los equipos es semejante.

La función FC21 genera un llamado al bloque de función FB8 con el que transfiere hacia el CP la información de petición Modbus (el manejo de parámetros de este bloque se explica en la sección correspondiente). Se destaca el hecho que siempre se utiliza el mismo bloque de datos DB21 como fuente para proveer los datos necesarios para llevar a cabo la ejecución del bloque.

Figura 47. Rutina abreviada de habilitadores, dentro de FC21

```
Network 1: Title:
ASIGNACION DE OFFSET EN DB21
DE ACUERDO A LA SELECCION DE ESCLAVO
EJECUTADA PREVIAMENTE

UN      M      8.0
SPB     M002
L        0
T       "OFFSET DE ENVIO 03 READ"
SPA     M001

M002: UN      M      8.1
SPB     M003
L        10
T       "OFFSET DE ENVIO 03 READ"
SPA     M001

M003: UN      M      8.2
SPB     M004
L        20
T       "OFFSET DE ENVIO 03 READ"
SPA     M001

//      -
//      -
//      -

M001: NOP  0
```

Antes de hacer el llamado se corre una rutina de selección en la que se hace uso de los habilitadores suministrados por la FC11, de este modo se selecciona un offset adecuado dentro del DB21 (DB ENVIO 03 READ) de acuerdo al habilitador que se encuentre activado cuando se ejecute el bloque. En general la información de petición suministrada es siempre la misma, el único valor que varía es la dirección de esclavo.

Una vez concluye la ejecución del FB8 se salvan los parámetros de salida. Cuando hay éxito en la operación se aumenta un registro de conteo, mientras que en caso de error no solo se aumenta el registro de conteo respectivo sino que se verifica que en efecto haya un mensaje de estado relacionado con errores para salvarlo, si no es el caso se ignora la información de estado.

En el remoto caso de que no se activen ninguno de los parámetros de éxito o error se inspecciona el parámetro de estado para detectar errores, si no los hay se ignora el hecho.

Función FC23

La función se inicia con un selector de esclavo al igual que la FC21 pero en este caso las marcas de habilitación que se generaron en el bloque FC13 se utilizan para definir un número de bloque de datos, el offset siempre es cero ya que cada

uno de los esclavos cuenta con su propio DB de almacenamiento de acuerdo a su dirección, es decir la información proveniente del esclavo 5 se almacena en el DB5, la del 10 en el DB y así sucesivamente los 10 esclavos. Esta función almacena datos sobre los DBs: 2, 3, 4, 5, 8, 9, 10, 11, 12 y 13.

Una vez definido el bloque de datos sobre el que se guardan los datos transferidos desde el CP se corre la FB7 siguiendo la señal de reloj 2 y al igual que en el caso de FC21 se ejecuta una serie de operaciones con los parámetros de salida. Si la operación es exitosa se aumenta el contador respectivo, en caso de error se aumenta el contador también pero se chequea el parámetro de estado para confirmar los reportes de error o se ignora la falta y por último dada la situación de que no se registra ni error ni éxito se examina el registro de estado.

7. MONTAJE Y PRUEBA⁷

7.1 MONTAJE GENERAL

Una vez se definió la estrategia y los elementos que harían parte de la solución final, se procedió a realizar el respectivo montaje y pruebas posteriores. Se montó el PLC sobre el rack que lo alojaría en la celda y cada uno de los relés se cableó de acuerdo a las instrucciones de puesta en servicio. Debido a la disponibilidad de los equipos y el espacio reducido con que se contaba en campo de pruebas se utilizaron tres relés con referencias diferentes: un 469, un 745 y un 760. Se empleó cable de datos AWG20 con blindaje para implementar el bus y en uno de los extremos se le acopló un conector DB15 macho para que se ajustara al conector hembra del mismo tiempo que posee el CP del sistema de automatización.

Cuadro 18. Especificaciones técnicas cable de bus

Especificaciones técnicas cable Modbus utilizado	
Fabricante	Helukabel Alemania
Referencia	TRONIC-CY (LiY-CY)
Número de parte	16002
Voltaje Nominal	500V
Voltaje de prueba hilo/hilo hilo/pantalla	1200V 800V
Inductancia	0,65 mH/km
Capacitancia hilo/hilo hilo/pantalla	(a 800Hz) 150 pF/m 270 pF/m
Impedancia	78 Ohm
Calibre conductores	AWG20

⁷ Manuales de referencia SIEMENS AG

Posteriormente se energizaron todos los dispositivos y se procedió a parametrizar cada uno de los relés. Ya que no se requería cumplir con las protecciones que usualmente se acostumbra instalar, se realizó una configuración básica que permitiera poner en funcionamiento los dispositivos y visualizar las variables que nos interesaban. Se parametrizaron exclusivamente las protecciones de sobrecorriente, subtensión y sobretensión para que corrieran pickups, alarmas y disparos a diferentes niveles de voltaje y corriente, según se deseaba.

Se asignaron parámetros a los relés y se procedió a alimentar las entradas de los relés correspondientes a los bornes de los transformadores de corriente y potencial utilizando un equipo que inyecta señales de voltaje y corriente simulando las salidas de los transformadores de corriente y voltaje.

En cuanto al PLC, se configuró el hardware primeramente y luego se descargó el programa de usuario. Aunque en la disposición dentro de la celda de control el S7-300 contará con módulos de entrada y salida digitales, durante las pruebas se omitieron estos componentes porque no eran indispensables. Se dispusieron en el riel pero no se les instaló el conector en U que los acopla al bus de comunicación posterior.

En las siguientes fotos se perciben el sistema de automatización (PLC), los tres relés disponibles, el cable de comunicación Modbus, el computador de control para el controlador y el equipo de inyección de tensiones y corrientes; el computador de control de este simulador no alcanza a aparecer en ninguna imagen. Aunque el cableado del bus no fue riguroso, una vez se instale en sitio es estrictamente necesario que se sigan las recomendaciones de los fabricantes pues allí hay exposición a ruido eléctrico y campos electromagnéticos provenientes de los circuitos de potencia de los equipos de la subestación.

Véase la Figura 48.

Figura 48. Vista posterior del montaje de prueba

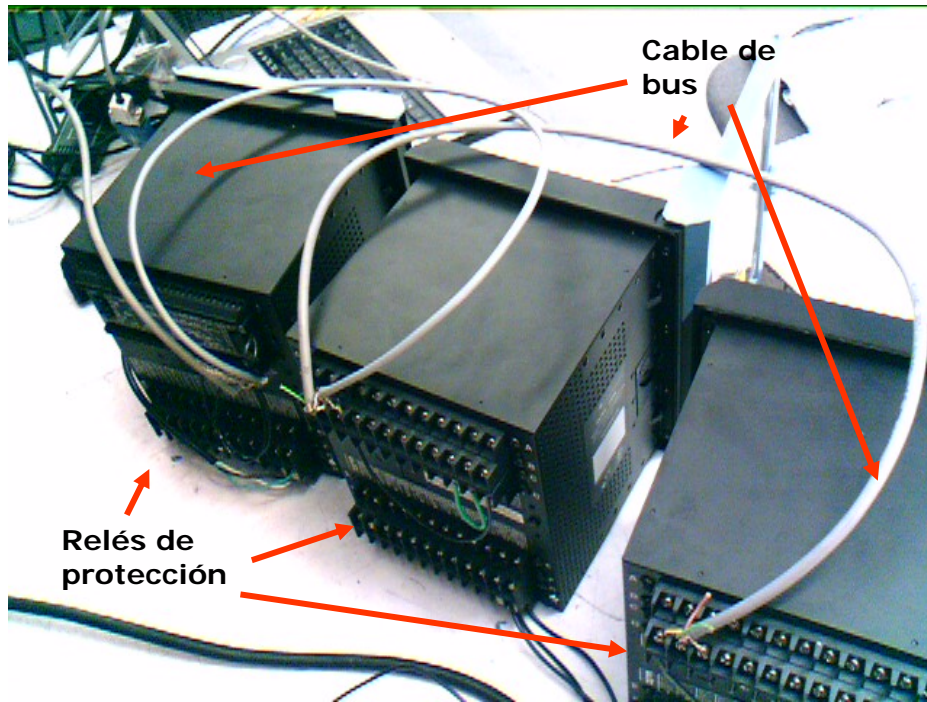
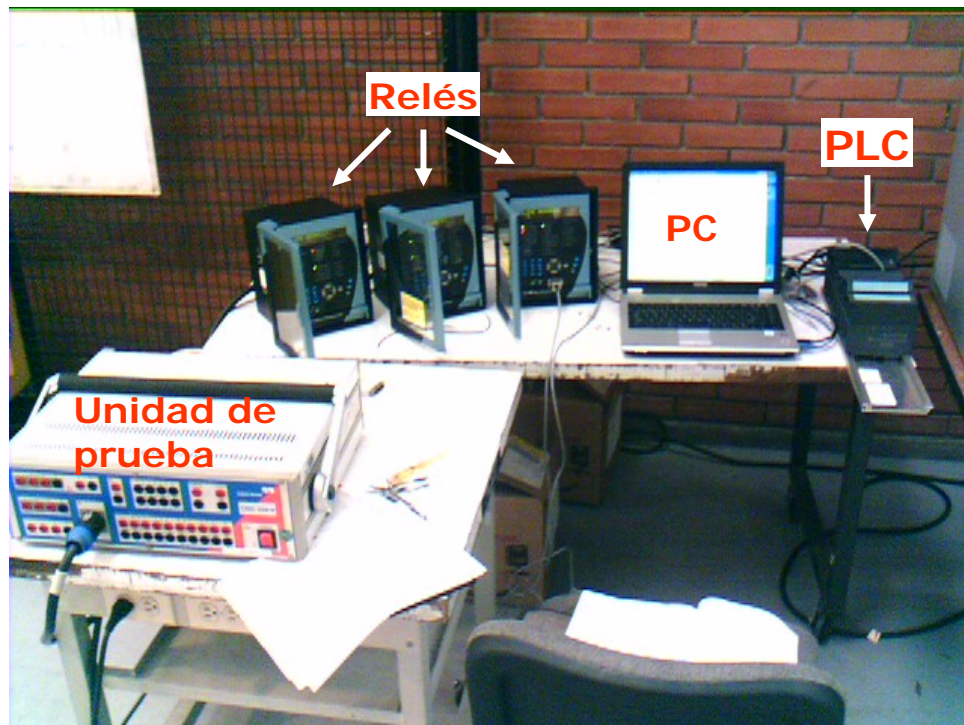


Figura 49. Vista frontal del montaje de prueba



Todas las pruebas se realizaron en la fábrica de tableros del departamento de transmisión y distribución de energía de SIEMENS S.A. por esta razón se aprecia que en el mismo sitio se ensayan los tableros de maniobra en baja tensión, las celdas de media tensión y las cajas de baja tensión de las celdas de alta tensión. Para la permanencia en este lugar es requisito portar botas dieléctricas como medida de precaución y por normatividad de seguridad industrial.

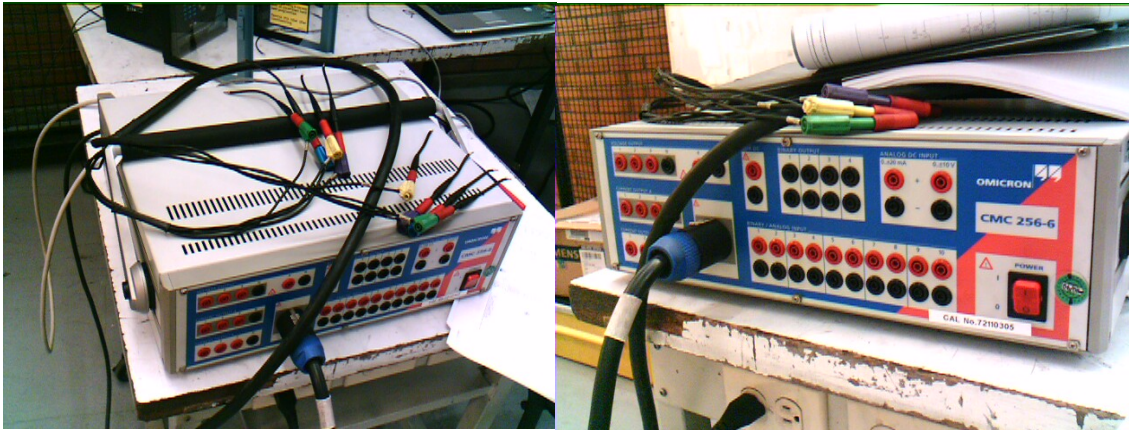
Unidad OMICRON CMC 256-6

El CMC 256-6 es una unidad de prueba de tensión tetrafásica y corriente hexafásica desarrollada y producida por Omicron Electronics GMBH en Hohemems, Austria. Omicron es una empresa fundada en 1984 especializada en el suministro de hardware y software para pruebas de equipos eléctricos. Actualmente es la compañía líder en el segmento y provee equipos a los fabricantes de gran prestigio como SIEMENS AG y ABB. En Colombia se poseen tres dispositivos que se utilizan para probar los relés de protección que se suelen instalar en los tableros de baja tensión y en las cajas de control de las celdas de media y alta tensión.

La unidad permite ensayar todo tipo de relés de protección -como los Multilin de GE y los Siprotec de SIEMENS-. Este equipo se utilizó para probar los relés y establecer lecturas reales en los medidores de los mismos, cuenta con 8 cables de alimentación que se conectan a las entradas de CTs y PTs de los relés. Durante las pruebas realizadas siempre se emplearon los 8 terminales para proveer señales tetrafásicas de voltaje y corriente, por un lado se simulaba una fuente de corriente trifásica balanceada con neutro y por el otro una fuente de voltaje de las mismas condiciones.

Todos los generadores de tensión y corriente son ajustables de forma continua e independiente en su amplitud, fase y frecuencia. Desde el software de control se pueden ajustar arbitrariamente a través de una interfaz gráfica los fasores que representan las señales entregadas, el procedimiento se puede realizar en tiempo real para generar alarmas y producir disparos de los equipos de protección (por desbalance o sobrecorriente monofásica).

Figura 50. Vistas de la unidad de prueba OMICRON



Algunas características reseñables de la unidad utilizada son:

- 4 salidas x 300 V
- 6 salidas x 12.5 A / 3 x 25 A
- 6 salidas de bajo nivel (parte posterior)
- 2 entradas de contador (parte posterior)
- fuente de alimentación AC (0 - 264 V)
- 4 salidas binarias
- Entradas de medida de DC
- 10 entradas binarias
- Entradas de medida analógicas

7.2 DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS

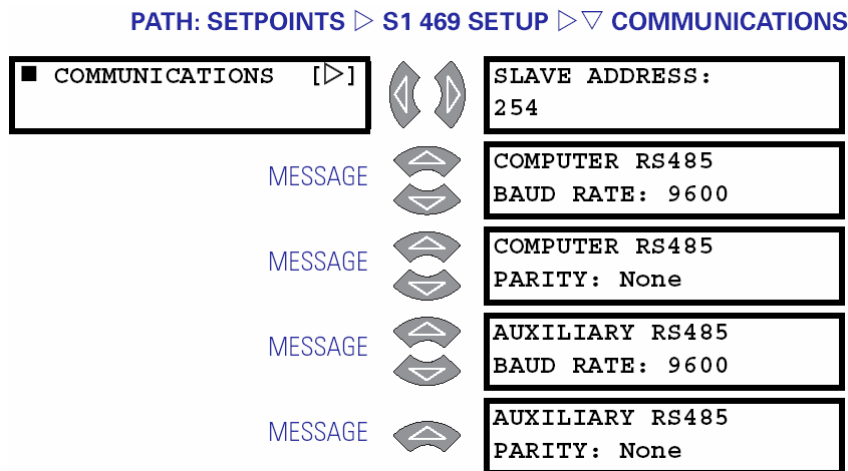
En el sistema de automatización proyectado en sitio se contempla la existencia de al menos diez relés de protección y el PLC. Como se contaba únicamente con tres relés se procedió a simular la presencia de los demás organizando en varias configuraciones los equipos que se tenían de tal suerte que en ocasiones se contaba con una subred conformada por el maestro y los esclavos 3, 7, 5 y en otras los esclavos podían ser los 6, 9 y 13, por ejemplo.

Sin embargo se mantuvo la correspondencia entre el tipo de relé (de motor, transformador o línea) y los números de dirección de esclavo que se les

adjudicaba, por ejemplo, el SR469 nunca hizo el papel de esclavo 12 porque con base en el unifilar y la convención establecida, la celda =H01+R01 era de control y protección de transformador, no de alimentación de motor.

Como hecho curioso se percibió que en muchas ocasiones al modificar la dirección de esclavo de un relé sin haber desconectado la red Modbus, el equipo no era capaz de reconocer su nueva dirección y perdía toda comunicación con el maestro; solamente cuando se reasignaba su dirección inicial se podían reanudar comunicaciones con el dispositivo. Para cambiar la dirección del relé fue necesario desconectarlo de la red Modbus o reiniciarlo y así lograba operar correctamente con una dirección nueva. En la figura se aprecia el procedimiento a seguir desde el teclado de un relé SR469 para configurar sus puertos RS485, con los demás referencias (SR745, SR760) el procedimiento es similar.

Figura 51. Procedimiento para configurar los puertos RS485 en un relé SR469.



Se buscaba que al final se obtuviera información de cada esclavo (direcciones 2 a 5, 8-13) enviando y recibiendo información hacia/desde el PLC. El controlador siempre se mantuvo en uno de los extremos por cuestiones de comodidad a la hora de reorganizar los relés.

Haciendo uso del equipo de inyección de señales se asumieron ciertas fuentes y cargas ficticias siguiendo los ejemplos que traen las guías de instalación de los relés. Para el 469 se asumió un motor con corriente de plena carga de 700 A y alimentación nominal a 5000V; para el 745 se configuró un transformador

bidevanado de 100MVA de potencia con voltaje y corriente nominal en el primario de 100kV y 1000 A respectivamente y voltaje y corriente nominal de 50kV y 2000 A en el secundario, respectivamente; para el 760 se designó una línea de alimentación a 14.4kV con corriente nominal de 1200 A.

Como el propósito del procedimiento seguido no era probar la precisión del equipo inyector sino la fiabilidad del enlace de comunicación se aceptó que las lecturas de medida de los relés eran correctas y correspondían a valores reales de las señales entregadas por el Omicron. Adjunto se muestran las especificaciones técnicas de los circuitos de medida de cada uno de los relés.

Cuadro 19. Especificaciones técnicas del circuito de medida del relé SR469

ENTRADA CORRIENTES FASE SR 469		ENTRADA DE TENSIONES SR 469	
Primario del CT	1 a 5000 A	Razón de transformación	1.00 a 300.00:1 en pasos de 0.01
Secundario del CT	5 A	Secundario del PT	273 VAC (fondo de escala)
Rango de conversión	0.05 a 20 x CT	Rango de conversión	0.05 a 1 x fondo de escala
Precisión	< 2 x CT: 0.5% de 2 x CT > 2 x CT: 1% de 20 x CT	Precisión	0.5% de fondo de escala

Cuadro 20. Especificaciones técnicas del circuito de medida del relé SR760

ENTRADA CORRIENTES FASE SR 760		ENTRADA DE TENSIONES SR 760	
Primario del CT	1 a 50000 A	Razón de transformación	1.0 a 5000.0:1 en pasos de 0.1
Secundario del CT	5 A	PT fuente	0.12 a 600kV/ 50 a 240 V
Rango de conversión	0.01 a 20 x CT	Entrada máxima	273V fase-neutro (fondo de escala)
Precisión	< 2 x CT: 0.5% de 2 x CT > 2 x CT: 1% de 20 x CT	Precisión	11 a 130V: 0.25% fondo de escala 130 a 273V: 0.8% fondo de escala

Cuadro 21. Especificaciones técnicas del circuito de medida del relé SR745

ENTRADA CORRIENTES FASE SR 745		ENTRADA DE TENSIONES SR 745	
Primario del CT	1 a 50000 A	Razón de transformación	1 a 5000:1 en pasos de 1
Secundario del CT	5 A	PT fuente	2 a 600kV/ 60 a 120 V
Rango de conversión	0.02 a 46 x CT	Entrada máxima	273V fase-neutro (fondo de escala)
Precisión	< 4 x CT: 0.25% de 4 x CT > 4 x CT: 0.5% de 4 x CT	Precisión	2% fondo de escala

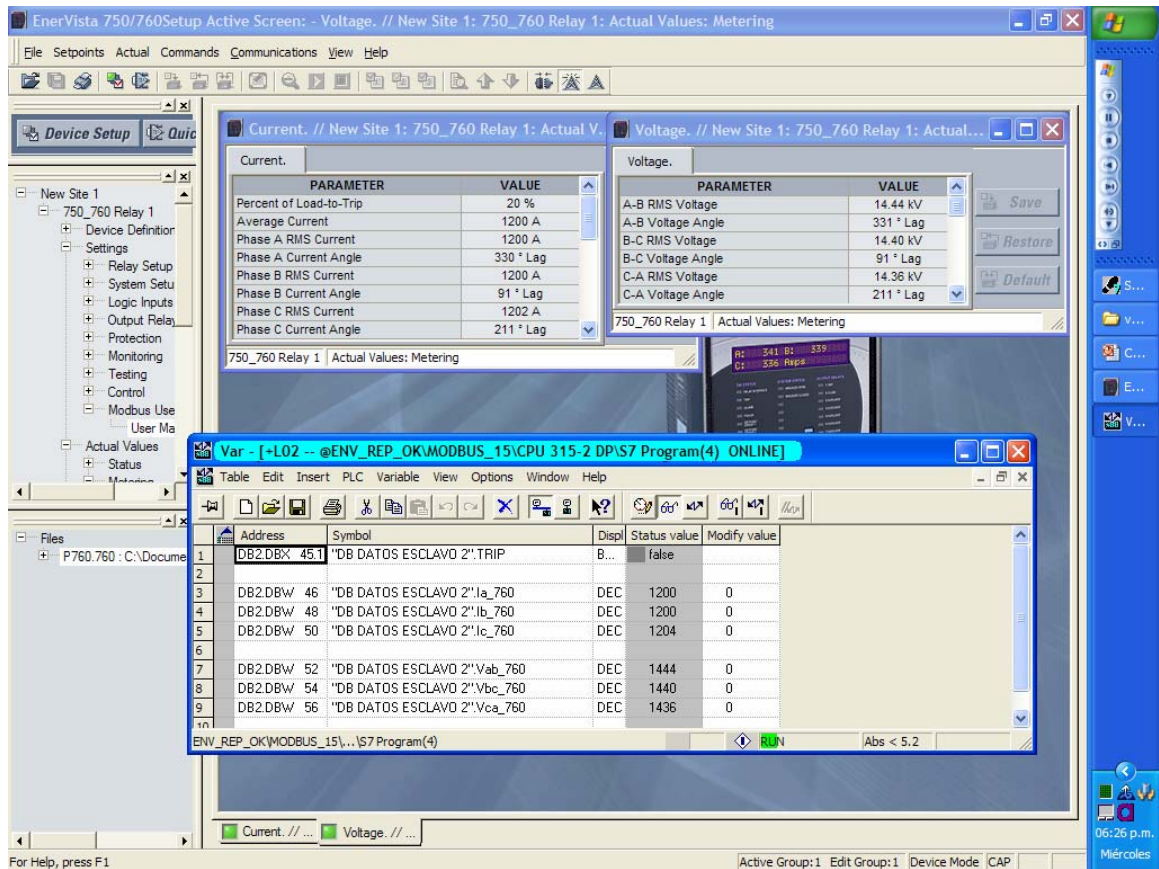
Cuando se definía la configuración que adoptarían los equipos y se asignaban las direcciones que iban a adoptar, se procedía a arrancar el dispositivo de inyección de señales eléctricas. Se captaban los datos que llegaban al relé por medio del enlace online de Enervista Launchpad y se tomaban los datos observados. Posteriormente se contrastaban estas lecturas con los valores online que arrojaba STEP7.

Como los datos tomados corresponden a valores RMS de las variables seleccionadas y además el equipo de inyección a pesar de ser constantemente calibrado no es completamente preciso, las lecturas que se apreciaban en Enervista oscilaban levemente alrededor del valor seleccionado.

Para ser ligeramente más precisos, las ventanas de cada una de las aplicaciones se mantenían abiertas y cada vez que alguna variable cambiaba se capturaba la imagen de pantalla instantánea del PC.

Con la interfaz gráfica del SR469 se contó con la dificultad de no poder monitorear las señales de corriente porque la aplicación no actualiza los valores de todas las ventanas abiertas dentro de Enervista, sólo refresca los valores de la última ventana abierta. Arbitrariamente se eligió mantener actuales los datos de las señales de voltaje.

Figura 52. Captura de pantalla con datos online de Enervista y STEP7 simultáneamente



7.3 RESULTADOS Y ANÁLISIS

En el presente aparte se muestran los resultados correspondientes a las pruebas hechas con el relé SR760 haciendo el papel de esclavo #2 en una configuración y el de esclavo #11 en otra.

Para cada configuración se realizó una serie de pruebas con corrientes variables (400, 800, 1200, 1600 y 2000 A) manteniendo un valor de voltaje constante (14,4kV) y otra serie de pruebas con voltaje variable (3.45, 6.9 y 10.35kV) y corriente constante (1200 A).

En todos los casos se realizaban tres lecturas de todas las variables que entregaba el relé y de todos los datos que recibía el PLC, el propósito fue

determinar el nivel de error presente en la información recogida en el controlador al contrastarla con la que enviaba el relé. También se verificó el estado de la señal de disparo que llega al PLC y se comparó con el status que mostraba el relé en sus LEDs indicadores.

A continuación se muestra toda la información recolectada, organizada según los valores que se asignaban a las señales de corriente y tensión.

Cuadro 22. Resultados de las pruebas a los Esclavos #2 y #11 con señales de tensión constantes (14.4kV) y variaciones en las señales de corriente.

		ESCLAVO 2			ESCLAVO 11		
Señal		RELE	PLC	Error Relativo	RELE	PLC	Error Relativo
Corriente 400A; Voltaje 14,4kV	Ia [A]	398	398	0,000%	400	400	0,000%
		398	398	0,000%	400	398	0,500%
		398	400	-0,503%	400	400	0,000%
	Ib [A]	400	398	0,500%	398	400	-0,503%
		400	402	-0,500%	400	400	0,000%
		400	400	0,000%	400	400	0,000%
	Ic [A]	400	400	0,000%	400	400	0,000%
		400	398	0,500%	398	398	0,000%
		398	398	0,000%	400	398	0,500%
	Vab [kV]	14,44	14,44	0,000%	14,44	14,44	0,000%
		14,43	14,44	-0,069%	14,44	14,44	0,000%
		14,44	14,44	0,000%	14,44	14,44	0,000%
	Vbc [kV]	14,40	14,39	0,069%	14,41	14,39	0,139%
		14,40	14,41	-0,069%	14,40	14,40	0,000%
		14,40	14,41	-0,069%	14,39	14,39	0,000%
	Vca [kV]	14,34	14,34	0,000%	14,36	14,34	0,139%
		14,34	14,34	0,000%	14,36	14,34	0,139%
		14,34	14,34	0,000%	14,36	14,36	0,000%
	TRIP	off	off	N/A	off	off	N/A
		off	off	N/A	off	off	N/A
		off	off	N/A	off	off	N/A

		ESCLAVO 2			ESCLAVO 11		
Señal		RELE	PLC	Error Relativo	RELE	PLC	Error Relativo
Corriente 800A; Voltaje 14,4kV	Ia [A]	800	800	0,000%	800	800	0,000%
		798	800	-0,251%	800	800	0,000%
		798	798	0,000%	800	798	0,250%
	Ib [A]	800	800	0,000%	800	800	0,000%
		800	800	0,000%	800	800	0,000%
		800	800	0,000%	800	800	0,000%
	Ic [A]	800	802	-0,250%	800	800	0,000%
		800	800	0,000%	800	800	0,000%
		800	800	0,000%	800	800	0,000%
	Vab [kV]	14,44	14,44	0,000%	14,44	14,44	0,000%
		14,44	14,46	-0,139%	14,44	14,44	0,000%
		14,44	14,44	0,000%	14,44	14,44	0,000%
	Vbc [kV]	14,40	14,40	0,000%	14,41	14,41	0,000%
		14,40	14,40	0,000%	14,40	14,39	0,069%
		14,40	14,39	0,069%	14,40	14,41	-0,069%
	Vca [kV]	14,36	14,36	0,000%	14,34	14,36	-0,139%
		14,36	14,36	0,000%	14,36	14,36	0,000%
		14,34	14,36	-0,139%	14,36	14,36	0,000%
	TRIP	off	off	N/A	off	off	N/A
		off	off	N/A	off	off	N/A
		off	off	N/A	off	off	N/A
Corriente 1200A; Voltaje 14,4kV	Ia [A]	1200	1200	0,000%	1200	1200	0,000%
		1200	1200	0,000%	1200	1200	0,000%
		1200	1200	0,000%	1200	1200	0,000%
	Ib [A]	1200	1200	0,000%	1200	1198	0,167%
		1200	1200	0,000%	1200	1200	0,000%
	Ic [A]	1202	1204	-0,166%	1202	1202	0,000%
		1204	1202	0,166%	1204	1204	0,000%
		1202	1204	-0,166%	1204	1200	0,332%
	Vab [kV]	14,44	14,44	0,000%	14,44	14,46	-0,139%
		14,44	14,40	0,277%	14,44	14,44	0,000%
		14,44	14,43	0,069%	14,44	14,40	0,277%
	Vbc [kV]	14,40	14,40	0,000%	14,40	14,40	0,000%
		14,41	14,40	0,069%	14,40	14,41	-0,069%
		14,40	14,39	0,069%	14,40	14,40	0,000%
	Vca [kV]	14,36	14,36	0,000%	14,36	14,36	0,000%
		14,36	14,36	0,000%	14,36	14,34	0,139%
		14,34	14,34	0,000%	14,36	14,36	0,000%
	TRIP	off	off	N/A	off	off	N/A
		off	off	N/A	off	off	N/A
		off	off	N/A	off	off	N/A

		ESCLAVO 2			ESCLAVO 11		
Señal		RELE	PLC	Error Relativo	RELE	PLC	Error Relativo
Corriente 1600A; Voltaje 14,4kV	Ia [A]	1600	1600	0,000%	1600	1600	0,000%
		1600	1600	0,000%	1600	1600	0,000%
		1600	1600	0,000%	1598	1598	0,000%
	Ib [A]	1600	1600	0,000%	1600	1602	-0,125%
		1600	1600	0,000%	1602	1600	0,125%
		1600	1600	0,000%	1600	1600	0,000%
	Ic [A]	1604	1602	0,125%	1604	1602	0,125%
		1604	1604	0,000%	1602	1606	-0,250%
		1604	1602	0,125%	1604	1604	0,000%
	Vab [kV]	14,44	14,44	0,000%	14,44	14,44	0,000%
		14,44	14,44	0,000%	14,44	14,44	0,000%
		14,44	14,44	0,000%	14,44	14,44	0,000%
	Vbc [kV]	14,39	14,39	0,000%	14,40	14,40	0,000%
		14,40	14,40	0,000%	14,41	14,40	0,069%
		14,39	14,40	-0,069%	14,39	14,40	-0,069%
	Vca [kV]	14,34	14,36	-0,139%	14,34	14,36	-0,139%
		14,34	14,36	-0,139%	14,36	14,34	0,139%
		14,36	14,36	0,000%	14,34	14,34	0,000%
TRIP	off	off	N/A	off	off	N/A	
	off	off	N/A	off	off	N/A	
	off	off	N/A	off	off	N/A	
Corriente 2000A; Voltaje 14,4kV	Ia [A]	2000	2002	-0,100%	2000	2002	-0,100%
		2002	2000	0,100%	2000	2000	0,000%
		2000	2002	-0,100%	2000	2002	-0,100%
	Ib [A]	2000	2002	-0,100%	2002	2002	0,000%
		2000	2000	0,000%	2000	2002	-0,100%
		2000	2002	-0,100%	2000	2000	0,000%
	Ic [A]	2006	2006	0,000%	2006	2006	0,000%
		2006	2006	0,000%	2006	2006	0,000%
		2006	2006	0,000%	2006	2006	0,000%
	Vab [kV]	14,44	14,44	0,000%	14,39	14,44	-0,347%
		14,39	14,44	-0,347%	14,39	14,44	-0,347%
		14,36	14,44	-0,557%	14,39	14,44	-0,347%
	Vbc [kV]	14,40	14,40	0,000%	14,41	14,40	0,069%
		14,41	14,41	0,000%	14,41	14,40	0,069%
		14,41	14,40	0,069%	14,41	14,41	0,000%
	Vca [kV]	14,36	14,34	0,139%	14,39	14,36	0,208%
		14,39	14,36	0,208%	14,39	14,36	0,208%
		14,41	14,34	0,486%	14,39	14,36	0,208%
TRIP	on	on	N/A	on	on	N/A	
	on	on	N/A	on	on	N/A	
	on	on	N/A	on	on	N/A	

Cuadro 23. Resultados de las pruebas a los Esclavos #2 y #11 con señales de corriente constantes (1200A) y variaciones en las señales de tensión.

		ESCLAVO 2			ESCLAVO 11		
Señal		RELE	PLC	Error Relativo	RELE	PLC	Error Relativo
Corriente 1200A; Voltaje 3,45kV	Ia [A]	1200	1200	0,000%	1200	1198	0,167%
		1200	1200	0,000%	1200	1198	0,167%
		1200	1200	0,000%	1200	1198	0,167%
	Ib [A]	1200	1202	-0,167%	1200	1200	0,000%
		1200	1200	0,000%	1200	1200	0,000%
		1200	1200	0,000%	1200	1198	0,167%
	Ic [A]	1204	1202	0,166%	1204	1204	0,000%
		1204	1202	0,166%	1204	1204	0,000%
		1202	1202	0,000%	1202	1202	0,000%
	Vab [kV]	3,46	3,46	0,000%	3,46	3,47	-0,289%
		3,45	3,47	-0,580%	3,46	3,47	-0,289%
		3,46	3,47	-0,289%	3,46	3,47	-0,289%
	Vbc [kV]	3,46	3,46	0,000%	3,46	3,46	0,000%
		3,46	3,46	0,000%	3,41	3,46	-1,466%
		3,46	3,46	0,000%	3,46	3,46	0,000%
	Vca [kV]	3,45	3,44	0,290%	3,45	3,43	0,580%
		3,45	3,44	0,290%	3,41	3,44	-0,880%
		3,41	3,43	-0,587%	3,45	3,43	0,580%
	TRIP	on	on	N/A	on	on	N/A
		on	on	N/A	on	on	N/A
		on	on	N/A	on	on	N/A
Corriente 1200A; Voltaje 6,9kV	Ia [A]	1200	1200	0,000%	1200	1200	0,000%
		1200	1200	0,000%	1200	1198	0,167%
		1200	1198	0,167%	1200	1202	-0,167%
	Ib [A]	1200	1200	0,000%	1200	1200	0,000%
		1200	1200	0,000%	1200	1200	0,000%
		1200	1200	0,000%	1200	1200	0,000%
	Ic [A]	1202	1202	0,000%	1202	1201	0,083%
		1204	1200	0,332%	1204	1202	0,166%
		1202	1204	-0,166%	1204	1202	0,166%
	Vab [kV]	6,91	6,94	-0,434%	6,88	6,88	0,000%
		6,88	6,94	-0,872%	6,88	6,88	0,000%
		6,91	6,94	-0,434%	6,88	6,90	-0,291%
	Vbc [kV]	6,91	6,91	0,000%	6,93	6,93	0,000%
		6,91	6,91	0,000%	6,93	6,94	-0,144%
		6,91	6,91	0,000%	6,91	6,94	-0,434%
	Vca [kV]	6,88	6,90	-0,291%	6,91	6,91	0,000%
		6,88	6,88	0,000%	6,88	6,90	-0,291%
		6,88	6,88	0,000%	6,88	6,91	-0,436%
	TRIP	off	off	N/A	off	off	N/A
		off	off	N/A	off	off	N/A
		off	off	N/A	off	off	N/A

		ESCLAVO 2			ESCLAVO 11		
Señal		RELE	PLC	Error Relativo	RELE	PLC	Error Relativo
Corriente 1200A; Voltaje 10,35kV	Ia [A]	1200	1202	-0,167%	1200	1202	-0,167%
		1200	1200	0,000%	1200	1200	0,000%
		1200	1202	-0,167%	1200	1200	0,000%
	Ib [A]	1200	1198	0,167%	1200	1200	0,000%
		1200	1200	0,000%	1200	1200	0,000%
		1200	1200	0,000%	1200	1200	0,000%
	Ic [A]	1204	1204	0,000%	1204	1202	0,166%
		1204	1200	0,332%	1204	1204	0,000%
		1204	1202	0,166%	1202	1204	-0,166%
	Vab [kV]	10,36	10,40	-0,386%	10,37	10,40	-0,289%
		10,36	10,41	-0,483%	10,36	10,40	-0,386%
		10,37	10,40	-0,289%	10,36	10,41	-0,483%
	Vbc [kV]	10,37	10,37	0,000%	10,36	10,37	-0,097%
		10,37	10,38	-0,096%	10,37	10,38	-0,096%
		10,36	10,37	-0,097%	10,37	10,37	0,000%
	Vca [kV]	10,36	10,32	0,386%	10,36	10,32	0,386%
		10,36	10,34	0,193%	10,36	10,32	0,386%
		10,36	10,32	0,386%	10,36	10,34	0,193%
	TRIP	on	on	N/A	on	on	N/A
		on	on	N/A	on	on	N/A
		on	on	N/A	on	on	N/A

A partir de las anteriores tablas se generó un gráfico de distribución del error relativo para cada uno de los esclavos, como se puede apreciar en las siguientes figuras.

Figura 53. Distribución del error relativo para el esclavo 2

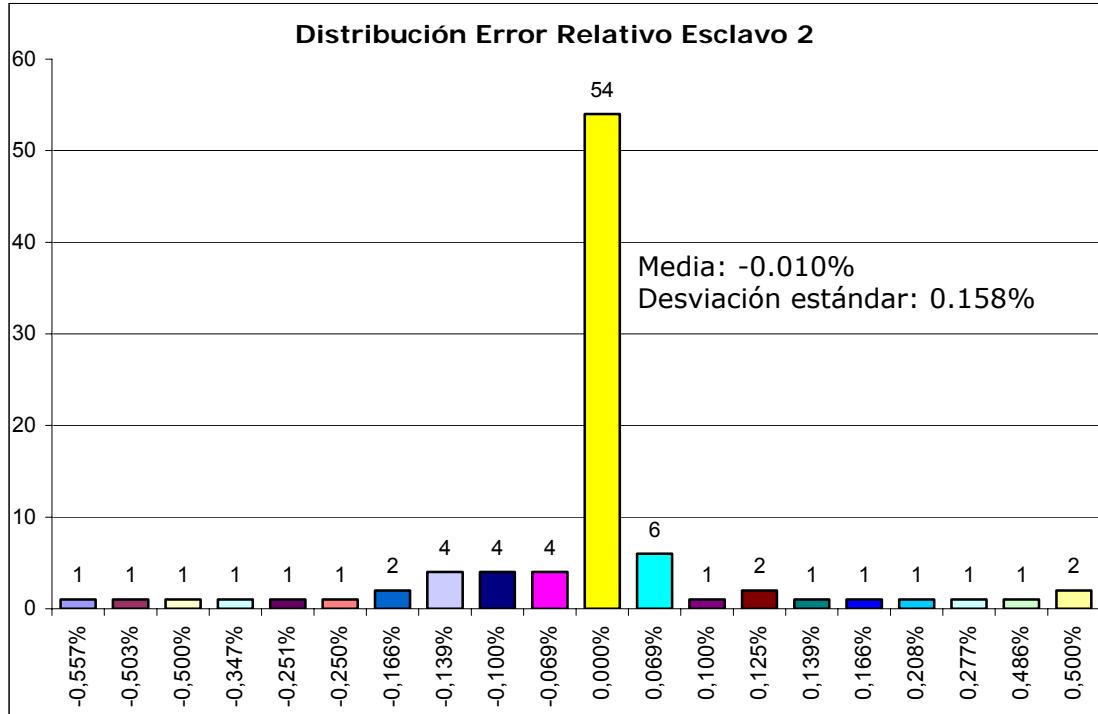
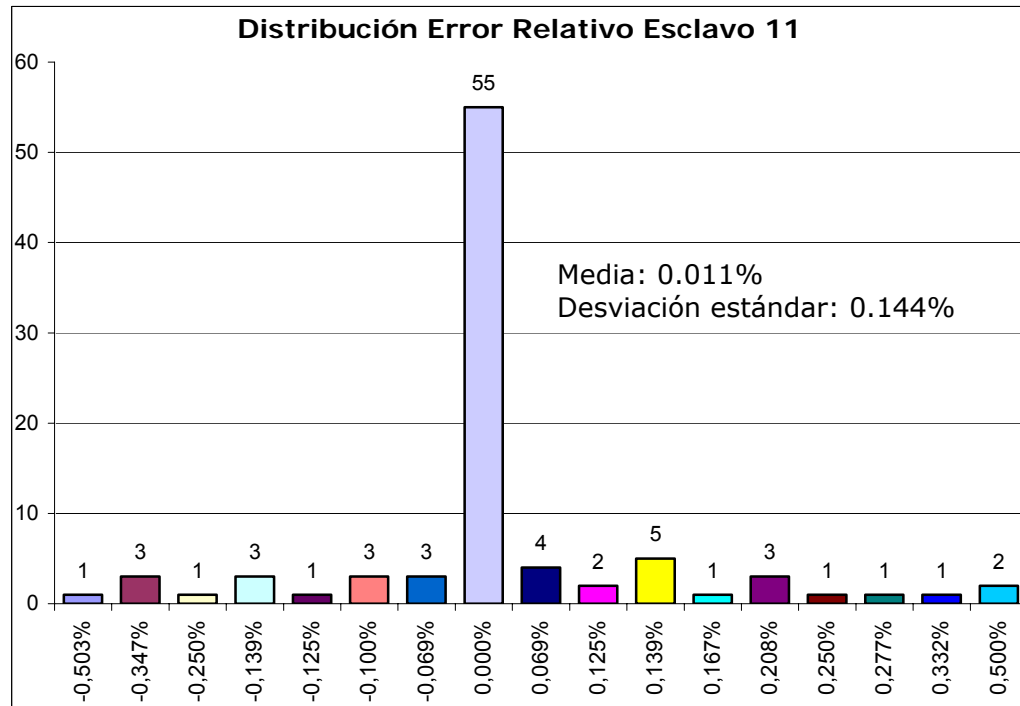


Figura 54. Distribución del error relativo para el esclavo 11



Con base en las ilustraciones previas se evidencia la marcada tendencia del error relativo hacia el cero, es decir, hacia la ausencia de error. Este hecho se reafirma al analizar los valores de la media aritmética y la desviación estándar. Por consiguiente, se puede deducir que el enlace de comunicación utilizado constituye una fuente confiable de información para realizar las labores de supervisión que se tienen previstas.

Esta conclusión se deriva de los datos tomados de las pruebas del relé SR760, no obstante si se detallan a fondo las demás tablas generadas con los mismos datos se puede evaluar que el error no supera un 5% en ninguno de los casos y desde un punto de vista práctico se puede considerar que este margen mantiene vigente la afirmación hecha con los datos presentados.

En el Anexo correspondiente se presentan los demás datos tomados durante la fase de pruebas organizados siguiendo el mismo criterio que el presentado. Para el caso del relé SR469 se tiene la información desde los esclavos 3, 4, 5, 8, 9 y 10 y en el caso del relé SR760 desde los esclavos 12 y 13. No se detalla el análisis de estos casos pues el estudio estadístico no se encuentra dentro de los alcances del presente proyecto.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Tras haber llevado a fin el presente proyecto quedan algunas conclusiones y/o recomendaciones no explícitas en el documento final que quizás vale la pena tener en cuenta y por eso se ha destinado esta última sección para presentarlas.

En primera instancia, y como consecuencia directa de la culminación del proyecto, se logra determinar con toda certeza que a pesar de, por un lado, ser SIEMENS un fabricante europeo con tendencia a implementar comunicaciones industriales bajo protocolos originarios del viejo continente, y por el otro, ser General Electric un fabricante de EEUU que elabora equipos industriales con capacidad de establecer enlaces bajo protocolos de origen americano, es posible enlazar lógicamente dispositivos producidos por ambos fabricantes a través de protocolo Modbus.

A pesar que ya se contaba con evidencia que mostraba que era posible esta conexión, este proyecto se propone alcanzar el Know-how que hasta ahora era propiedad exclusiva de empresas integradoras tales como: Asesorías Santafé, Inprelco y Vikom Ltda. La Universidad Industrial de Santander y SIEMENS S.A. cuentan ahora con una guía que ilustra el procedimiento y el bagaje teórico que se esconden detrás de la consecución que tiene por objetivo principal este proyecto y se refleja en el título: diseño e implementación de una solución de compatibilidad entre un PLC y relés de protección bajo protocolo Modbus.

Los alcances específicos de la aseveración citada se limitan a los equipos que se utilizaron en el proyecto pero no excluye otras posibles configuraciones similares ya que este documento es una base sólida para emprender empresas similares con dispositivos diferentes, pueden contemplarse controladores SIMATIC S7-300/400 o LOGO y demás relés de protección de las familias SR y UR.

Se comprobó también que Modbus es un protocolo sencillo y fácil de utilizar pues cuenta que una estructura de poca complejidad desde el punto de vista físico y lógico, de aquí su amplia difusión mundial. No obstante esa simplicidad en su implementación, Modbus se castiga con la lentitud de sus transmisiones y el reducido flujo de datos a través del bus. Ambos aspectos del protocolo se corroboraron durante la ejecución del proyecto. Por ende, a nivel ingeniería es vital que durante la etapa de diseño de un sistema de automatización se tengan en

cuenta las ventajas y desventajas que Modbus ofrece para tomar una decisión acertada y una correcta selección de equipos y materiales.

El protocolo cuenta también con unas guías de referencia estrictas que no dejan al azar ninguna característica de la red de comunicación permitiendo una implementación sin tropiezos. Depende de las arbitrariedades de los fabricantes la presencia de problemas a la hora del diseño y puesta en servicio de los equipos interconectados en bus.

Se verificó también la versatilidad de los PLC SIMATIC pues no sólo se adecuan al uso que se les quiera dar sino que además cuentan con variedad de recursos que SIEMENS ha desarrollado para sus plataformas y rutinas de programa. De acuerdo a las simulaciones y prácticas hechas durante las capacitaciones tomadas en las instalaciones del fabricante se observó que los PLC S7-300 se pueden utilizar en aplicaciones de alta corrosión (industria química), ambientes abrasivos (industria cementera) y atmósferas de altas temperaturas adecuando el hardware del controlador.

Por su parte los relés de protección justificaron su posición de liderato en el mercado eléctrico ya que son dispositivos de fácil manejo que poseen suficiente documentación clara y concisa. Cuentan con doble interfaz hombre-máquina: un teclado y LCD o conexión con PC local; además los menús de navegación del sistema operativo son intuitivos y amigables orientados a facilitar la manipulación del equipo por parte del usuario final.

Por último, se puede agregar que el éxito en la ejecución de un proyecto con las características del que se reseña en estas páginas no depende exclusivamente de la habilidad operativa del ingeniero sino que se basa también en una gestión apropiada de los recursos, de la información y del tiempo con que se cuenta. Al interior de empresas tan grandes como SIEMENS S.A. no es fácil llevar a cabo iniciativas propias si no se posee la información necesaria y requerida, por razones de orden cualquier trámite demanda tiempo y papeleo, además si no se conocen las políticas corporativas pueden encontrarse muchos obstáculos en el desarrollo de un proyecto que si no son tratados con destreza pueden retrasar el cronograma de trabajo. Para cumplir con lo que se debe hacer en el tiempo que se ha estipulado no basta con aprender como se hace sino también cómo y quienes manejan los procesos que permiten llevar a buen término un proyecto.

BIBLIOGRAFÍA

GENERAL ELECTRIC INC. 469 Motor Management Relay Instruction Manual. Revisión A4. Markham, Canadá. 2006.

GENERAL ELECTRIC INC. 489 Generator Management Relay Instruction Manual. Revisión A5. Markham, Canadá. 2006.

GENERAL ELECTRIC INC. 745 Transformer Protection System Instruction Manual. Revisión A2. Markham, Canadá. 2006.

GENERAL ELECTRIC INC. 750/760 Feeder Management Relay Instruction Manual. Revisión A6. Markham, Canadá. 2006.

GENERAL ELECTRIC INC. 469 Motor Management Relay Communications Guide. Revisión A4. Markham, Canadá. 2006.

GENERAL ELECTRIC INC. 489 Generator Management Relay Communications Guide. Revisión A5. Markham, Canadá. 2006.

GENERAL ELECTRIC INC. 745 Transformer Protection System Communications Guide. Revisión A2. Markham, Canadá. 2006.

GENERAL ELECTRIC INC. 750/760 Feeder Management Relay Communications Guide. Revisión A6. Markham, Canadá. 2006.

SIEMENS AG. CP 341 Point-to-Point Communications: Installation and Parameter Assignment. Tercera edición. Nuernberg, Alemania. 2000.

SIEMENS AG. Lista de instrucciones (AWL) para S7-300 y S7-400, Manual de referencia. Octava edición. Nuernberg, Alemania. 2000.

SIEMENS AG. Diagrama de funciones (FUP) para S7-300 y S7-400, Manual de referencia. Octava edición. Nuernberg, Alemania. 2000.

SIEMENS AG. Esquema de contactos (KOP) para S7-300 y S7-400, Manual de referencia. Octava edición. Nuernberg, Alemania. 2000.

SIEMENS AG. Programmable Logic Controllers S7-300 Module Data. Segunda edición. Nuernberg, Alemania. 2004.

SIEMENS AG. Autómata programable S7-300: Iniciación a la configuración y programación. Nuemberg, Alemania. 1996.

SIEMENS AG. Autómata programable S7-300, Configuración, instalación y datos de las CPU. Segunda edición. Nuemberg, Alemania. 1999.

SIEMENS AG. Software de sistema para S7-300/400: Diseño de programas, Manual de programación. Nuemberg, Alemania. 1996.

SIEMENS AG. STEP 7 V5.3 Introducción y ejercicios prácticos. Primera edición. Nuemberg, Alemania. 2004.

SIEMENS AG. PC Adapter USB Manual. Primera edición. Nuemberg, Alemania. 2004.

SIEMENS AG. Communication with Automation Systems: Planning, Configuring, Referencing. Revisión A. Nuemberg, Alemania. 2004.

SIEMENS AG. Loadable Driver for Point-to-Point CPs: MODBUS Protocol RTU Format S7 is Master, Manual. Quinta edición. Nuemberg, Alemania. 2003.

B&B ELECTRONICS. Troubleshooting Guide for RS485. Oranmore, Ireland. 2002.

B&B ELECTRONICS. RS422 and RS485 Application Note. Oranmore, Ireland. 1992.

SOLTERO, Manny. ZHANG, Jing. COCKRILL, Chris. 422 and 485 Standards Overview and System Configurations. Texas Instruments application report. Dallas, Estados Unidos. 2002.

MODICON INC. Modicon Modbus Protocol Reference Guide. Revisión J. North Andover, Estados Unidos. 1996.

MODBUS IDA. Modbus over Serial Line Specification and Implementation Guide. Versión 1.02. 2006

MODBUS IDA. Modbus Application Protocol Specification. Versión 1.1A. 2004.

TANENBAUM, Andrew. Redes de computadores. Cuarta edición. Prentice Hall.

ANEXOS

Anexo A. Resultados de las pruebas

Tablas de resultados de las pruebas hechas a los Esclavos #12 y #13 con señales de tensión constante (100kV) y variaciones en las señales de corriente. Relé empleado: GE SR745.

		ESCLAVO 12			ESCLAVO 13		
Señal		RELE	PLC	Error Relativo	RELE	PLC	Error Relativo
Corriente 200A; Voltaje 100kV	Ia [A]	199	199	0,000%	197	200	-1,523%
		199	199	0,000%	199	199	0,000%
		199	200	-0,503%	199	199	0,000%
	Ib [A]	199	199	0,000%	199	197	1,005%
		199	200	-0,503%	199	199	0,000%
		199	199	0,000%	199	199	0,000%
	Ic [A]	199	199	0,000%	199	200	-0,503%
		199	199	0,000%	199	200	-0,503%
		200	199	0,500%	199	199	0,000%
	V línea [kV]	100,08	99,60	0,480%	99,37	100,56	-1,198%
		100,08	100,08	0,000%	99,37	100,32	-0,956%
		99,37	100,08	-0,715%	99,37	100,56	-1,198%
Entradas Digitales	H#1111	H#1111	N/A	H#1111	H#1111	N/A	
	H#1111	H#1111	N/A	H#1111	H#1111	N/A	
	H#1111	H#1111	N/A	H#1111	H#1111	N/A	
Corriente 400A; Voltaje 100kV	Ia [A]	400	400	0,000%	400	400	0,000%
		400	400	0,000%	400	400	0,000%
		398	400	-0,503%	398	400	-0,503%
	Ib [A]	400	400	0,000%	400	400	0,000%
		400	398	0,500%	398	400	-0,503%
		398	400	-0,503%	400	400	0,000%
	Ic [A]	400	398	0,500%	400	400	0,000%
		400	400	0,000%	400	400	0,000%
		400	400	0,000%	400	400	0,000%
	V línea [kV]	100,08	100,08	0,000%	99,59	99,60	-0,010%
		99,84	100,56	-0,721%	100,32	100,08	0,239%
		100,08	100,08	0,000%	100,56	100,32	0,239%
Entradas Digitales	H#1111	H#1111	N/A	H#1111	H#1111	N/A	
	H#1111	H#1111	N/A	H#1111	H#1111	N/A	
	H#1111	H#1111	N/A	H#1111	H#1111	N/A	

		ESCLAVO 12			ESCLAVO 13		
Señal		RELE	PLC	Error Relativo	RELE	PLC	Error Relativo
Corriente 600A; Voltaje 100kV	Ia [A]	600	600	0,000%	600	598	0,333%
		599	599	0,000%	599	600	-0,167%
		598	599	-0,167%	601	600	0,166%
	Ib [A]	599	599	0,000%	600	600	0,000%
		599	599	0,000%	600	600	0,000%
		599	600	-0,167%	599	599	0,000%
	Ic [A]	600	600	0,000%	599	600	-0,167%
		601	601	0,000%	600	599	0,167%
		601	600	0,166%	599	600	-0,167%
	V línea [kV]	100,08	99,36	0,719%	99,84	99,84	0,000%
		99,84	100,08	-0,240%	100,32	99,60	0,718%
		100,08	99,84	0,240%	100,56	99,84	0,716%
Entradas Digitales	H#1111	H#1111	N/A	H#1111	H#1111	N/A	
	H#1111	H#1111	N/A	H#1111	H#1111	N/A	
	H#1111	H#1111	N/A	H#1111	H#1111	N/A	
Corriente 800A; Voltaje 100kV	Ia [A]	800	800	0,000%	800	800	0,000%
		800	798	0,250%	800	800	0,000%
		800	800	0,000%	798	800	-0,251%
	Ib [A]	800	798	0,250%	798	800	-0,251%
		798	798	0,000%	800	798	0,250%
		798	800	-0,251%	800	800	0,000%
	Ic [A]	798	800	-0,251%	800	800	0,000%
		800	800	0,000%	798	800	-0,251%
		800	798	0,250%	800	800	0,000%
	V línea [kV]	100,32	101,04	-0,718%	100,56	100,32	0,239%
		100,08	99,36	0,719%	100,08	99,60	0,480%
		100,32	99,84	0,478%	100,32	100,32	0,000%
Entradas Digitales	H#1111	H#1111	N/A	H#1111	H#1111	N/A	
	H#1111	H#1111	N/A	H#1111	H#1111	N/A	
	H#1111	H#1111	N/A	H#1111	H#1111	N/A	
Corriente 1000A; Voltaje 100kV	Ia [A]	1000	1000	0,000%	1000	1000	0,000%
		1000	998	0,200%	1000	999	0,100%
		999	1000	-0,100%	999	999	0,000%
	Ib [A]	998	1000	-0,200%	1000	999	0,100%
		999	1000	-0,100%	998	999	-0,100%
		999	999	0,000%	998	999	-0,100%
	Ic [A]	1000	998	0,200%	999	999	0,000%
		1001	1000	0,100%	1000	1001	-0,100%
		999	999	0,000%	1000	999	0,100%
	V línea [kV]	100,56	100,56	0,000%	100,32	100,08	0,239%
		99,84	100,08	-0,240%	99,84	100,32	-0,481%
		99,84	100,56	-0,721%	100,08	100,32	-0,240%

Señal	ESCLAVO 12			ESCLAVO 13		
	RELE	PLC	Error Relativo	RELE	PLC	Error Relativo
Entradas Digitales	H#1111	H#1111	N/A	H#1111	H#1111	N/A
	H#1111	H#1111	N/A	H#1111	H#1111	N/A
	H#1111	H#1111	N/A	H#1111	H#1111	N/A

Tablas de resultados de las pruebas hechas a los Esclavos #12 y #13 con señales de corriente constante (600A) y variaciones en las señales de tensión. Relé empleado: GE SR745.

	Señal	ESCLAVO 12			ESCLAVO 13		
		RELE	PLC	Error Relativo	RELE	PLC	Error Relativo
Corriente 600A; Voltaje 25kV	Ia [A]	600	600	0,000%	599	600	-0,167%
		600	599	0,167%	599	599	0,000%
		599	598	0,167%	599	600	-0,167%
	Ib [A]	600	599	0,167%	599	600	-0,167%
		599	599	0,000%	600	599	0,167%
		599	600	-0,167%	599	599	0,000%
	Ic [A]	599	599	0,000%	599	598	0,167%
		600	601	-0,167%	599	600	-0,167%
		600	600	0,000%	599	600	-0,167%
	V línea [kV]	24,72	24,72	0,000%	24,72	25,68	-3,883%
		24,96	25,20	-0,962%	25,20	25,20	0,000%
		24,96	24,96	0,000%	24,72	24,24	1,942%
	Entradas Digitales	H#1111	H#1111	N/A	H#1111	H#1111	N/A
		H#1111	H#1111	N/A	H#1111	H#1111	N/A
		H#1111	H#1111	N/A	H#1111	H#1111	N/A

		ESCLAVO 12			ESCLAVO 13		
Señal		RELE	PLC	Error Relativo	RELE	PLC	Error Relativo
Corriente 600A; Voltaje 50kV	Ia [A]	599	600	-0,167%	599	599	0,000%
		600	599	0,167%	600	600	0,000%
		600	600	0,000%	599	599	0,000%
	Ib [A]	600	599	0,167%	600	599	0,167%
		599	599	0,000%	599	599	0,000%
		599	599	0,000%	599	599	0,000%
	Ic [A]	600	600	0,000%	600	599	0,167%
		600	600	0,000%	600	600	0,000%
		600	600	0,000%	601	600	0,166%
V línea [kV]	50,16	49,92	0,478%	50,65	50,64	0,020%	
	50,16	50,16	0,000%	50,40	50,40	0,000%	
	50,16	50,64	-0,957%	50,16	50,16	0,000%	
Entradas Digitales	H#1111	H#1111	N/A	H#1111	H#1111	N/A	
	H#1111	H#1111	N/A	H#1111	H#1111	N/A	
	H#1111	H#1111	N/A	H#1111	H#1111	N/A	

		ESCLAVO 12			ESCLAVO 13		
Señal		RELE	PLC	Error Relativo	RELE	PLC	Error Relativo
Corriente 600A; Voltaje 150kV	Ia [A]	600	599	0,167%	599	600	-0,167%
		599	600	-0,167%	599	599	0,000%
		600	599	0,167%	599	600	-0,167%
	Ib [A]	599	599	0,000%	600	599	0,167%
		600	599	0,167%	599	601	-0,334%
		599	598	0,167%	600	599	0,167%
	Ic [A]	600	601	-0,167%	601	599	0,333%
		601	599	0,333%	601	601	0,000%
		600	601	-0,167%	599	599	0,000%
	V línea [kV]	149,75	150,24	-0,327%	149,75	150,24	-0,327%
		150,00	150,24	-0,160%	149,75	150,24	-0,327%
		150,97	150,00	0,643%	150,00	150,72	-0,480%
	Entradas Digitales	H#1111	H#1111	N/A	H#1111	H#1111	N/A
		H#1111	H#1111	N/A	H#1111	H#1111	N/A
		H#1111	H#1111	N/A	H#1111	H#1111	N/A

Tablas de resultados de las pruebas hechas a los Esclavos #3 y #4 con señales de tensión constante (5000V) y variaciones en las señales de corriente. Relé empleado: GE SR469.

		ESCLAVO 3			ESCLAVO 4		
Señal		RELE	PLC	Error Relativo	RELE	PLC	Error Relativo
Corriente 200A; Voltaje 5000V	Ia [A]	200	198	1,000%	200	200	0,000%
		200	200	0,000%	200	200	0,000%
		200	198	1,000%	200	198	1,000%
	Ib [A]	200	198	1,000%	200	200	0,000%
		200	200	0,000%	200	198	1,000%
		200	198	1,000%	200	200	0,000%
	Ic [A]	200	200	0,000%	200	200	0,000%
		200	200	0,000%	200	200	0,000%
		200	200	0,000%	200	200	0,000%
	Vab [V]	4992	5001	-0,180%	4996	4992	0,080%
		4996	4982	0,280%	4996	5001	-0,100%
		4996	4992	0,080%	4996	4992	0,080%
	Vbc [V]	4987	5006	-0,381%	5030	5011	0,378%
		4958	5011	-1,069%	5020	4948	1,434%
		4992	4972	0,401%	5068	5006	1,223%
	Vca [V]	4982	4972	0,201%	4872	4987	-2,360%
		4977	5020	-0,864%	4953	4939	0,283%
		4987	4963	0,481%	5025	4977	0,955%
	TRIP	off	off	N/A	off	off	N/A
		off	off	N/A	off	off	N/A
		off	off	N/A	off	off	N/A

		ESCLAVO 3			ESCLAVO 4		
Señal		RELE	PLC	Error Relativo	RELE	PLC	Error Relativo
Corriente 400A; Voltaje 5000V	Ia [A]	400	400	0,000%	400	400	0,000%
		400	400	0,000%	400	400	0,000%
		400	400	0,000%	400	400	0,000%
	Ib [A]	400	400	0,000%	400	398	0,500%
		400	400	0,000%	400	400	0,000%
		400	400	0,000%	400	400	0,000%
	Ic [A]	400	400	0,000%	400	400	0,000%
		400	400	0,000%	400	400	0,000%
		400	400	0,000%	400	400	0,000%
	Vab [V]	4992	4992	0,000%	4996	4992	0,080%
		4987	4996	-0,180%	4996	4996	0,000%
		4992	4987	0,100%	4992	4992	0,000%
	Vbc [V]	4982	4968	0,281%	5011	4996	0,299%
		4982	4987	-0,100%	4996	5025	-0,580%
		4982	4948	0,682%	5011	5001	0,200%
	Vca [V]	5020	4963	1,135%	5006	4968	0,759%
		4977	4977	0,000%	5030	5001	0,577%
		4996	5006	-0,200%	4972	4982	-0,201%
TRIP	off	off	N/A	off	off	N/A	
	off	off	N/A	off	off	N/A	
	off	off	N/A	off	off	N/A	
Corriente 600A; Voltaje 5000V	Ia [A]	600	600	0,000%	600	600	0,000%
		600	600	0,000%	600	600	0,000%
		600	600	0,000%	600	600	0,000%
	Ib [A]	600	600	0,000%	600	600	0,000%
		600	600	0,000%	600	600	0,000%
		600	600	0,000%	600	600	0,000%
	Ic [A]	600	600	0,000%	600	600	0,000%
		600	600	0,000%	600	600	0,000%
		600	600	0,000%	600	600	0,000%
	Vab [V]	4996	4992	0,080%	4987	4987	0,000%
		4996	5001	-0,100%	5001	4996	0,100%
		5001	5001	0,000%	4996	5001	-0,100%
	Vbc [V]	5025	5016	0,179%	5016	4910	2,113%
		5006	4968	0,759%	4972	5001	-0,583%
		5025	4987	0,756%	5011	5040	-0,579%
	Vca [V]	5011	5016	-0,100%	4982	5054	-1,445%
		5006	4939	1,338%	4987	4972	0,301%
		4982	5001	-0,381%	5025	5040	-0,299%
TRIP	off	off	N/A	off	off	N/A	
	off	off	N/A	off	off	N/A	
	off	off	N/A	off	off	N/A	

		ESCLAVO 3			ESCLAVO 4		
Señal		RELE	PLC	Error Relativo	RELE	PLC	Error Relativo
Corriente 800A; Voltaje 5000V	Ia [A]	800	800	0,000%	800	800	0,000%
		800	800	0,000%	800	800	0,000%
		800	800	0,000%	800	800	0,000%
	Ib [A]	800	802	-0,250%	800	800	0,000%
		800	802	-0,250%	800	800	0,000%
		800	800	0,000%	800	802	-0,250%
	Ic [A]	800	802	-0,250%	800	800	0,000%
		800	800	0,000%	800	802	-0,250%
		800	802	-0,250%	800	800	0,000%
	Vab [V]	5001	4992	0,180%	4996	4996	0,000%
		4992	4992	0,000%	4992	4987	0,100%
		4996	5001	-0,100%	4987	4982	0,100%
	Vbc [V]	4977	4987	-0,201%	4972	5016	-0,885%
		5001	5035	-0,680%	4987	5064	-1,544%
		5001	4900	2,020%	5011	4977	0,679%
	Vca [V]	4953	5016	-1,272%	5016	4972	0,877%
		4982	5030	-0,963%	4992	5006	-0,280%
		4987	4929	1,163%	4953	4996	-0,868%
TRIP	off	off	N/A	off	off	N/A	
	off	off	N/A	off	off	N/A	
	off	off	N/A	off	off	N/A	
Corriente 1000A; Voltaje 5000V	Ia [A]	1000	1000	0,000%	1000	1000	0,000%
		1000	1002	-0,200%	1000	1000	0,000%
		1000	1002	-0,200%	1000	1000	0,000%
	Ib [A]	1000	1002	-0,200%	1000	1000	0,000%
		1000	1000	0,000%	1000	1000	0,000%
		1000	1001	-0,100%	1000	1000	0,000%
	Ic [A]	1000	1002	-0,200%	1000	1002	-0,200%
		1000	1002	-0,200%	1000	1002	-0,200%
		1000	1000	0,000%	1000	1002	-0,200%
	Vab [V]	4996	4987	0,180%	5001	4996	0,100%
		4992	4987	0,100%	4996	4996	0,000%
		4992	4992	0,000%	4996	4987	0,180%
	Vbc [V]	4939	4996	-1,154%	4972	5001	-0,583%
		4992	5030	-0,761%	4987	4992	-0,100%
		4996	4963	0,661%	4992	4939	1,062%
	Vca [V]	5035	4972	1,251%	4987	4972	0,301%
		4996	4987	0,180%	4996	5001	-0,100%
		4992	4982	0,200%	4982	4987	-0,100%
TRIP	on	on	N/A	on	on	N/A	
	on	on	N/A	on	on	N/A	
	on	on	N/A	on	on	N/A	

Tablas de resultados de las pruebas hechas a los Esclavos #3 y #4 con señales de corriente constante (700 A) y variaciones en las señales de tensión. Relé empleado: GE SR469.

		ESCLAVO 3			ESCLAVO 4		
Señal		RELE	PLC	Error Relativo	RELE	PLC	Error Relativo
Corriente 700A; 2500V	Ia [A]	700	700	0,000%	700	700	0,000%
		700	700	0,000%	700	700	0,000%
		700	700	0,000%	700	700	0,000%
	Ib [A]	700	700	0,000%	700	700	0,000%
		700	700	0,000%	700	700	0,000%
		700	700	0,000%	700	700	0,000%
	Ic [A]	700	700	0,000%	700	700	0,000%
		700	700	0,000%	700	702	-0,286%
		700	700	0,000%	700	700	0,000%
	Vab [V]	2486	2486	0,000%	2486	2491	-0,201%
		2500	2496	0,160%	2486	2491	-0,201%
		2496	2491	0,200%	2491	2505	-0,562%
	Vbc [V]	2524	2529	-0,198%	2587	2515	2,783%
		2486	2443	1,730%	2587	2505	3,170%
		2404	2472	-2,829%	2428	2443	-0,618%
	Vca [V]	2510	2515	-0,199%	2548	2486	2,433%
		2505	2486	0,758%	2548	2505	1,688%
		2443	2404	1,596%	2385	2496	-4,654%
	TRIP	off	off	N/A	off	off	N/A
		off	off	N/A	off	off	N/A
		off	off	N/A	off	off	N/A
Corriente 700A; 5000V	Ia [A]	700	700	0,000%	700	700	0,000%
		700	700	0,000%	700	700	0,000%
		700	700	0,000%	700	700	0,000%
	Ib [A]	700	700	0,000%	700	700	0,000%
		700	700	0,000%	700	700	0,000%
		700	700	0,000%	700	700	0,000%
	Ic [A]	700	700	0,000%	700	702	-0,286%
		700	702	-0,286%	700	700	0,000%
		700	700	0,000%	700	700	0,000%
	Vab [V]	4987	4996	-0,180%	4996	4987	0,180%
		4992	4996	-0,080%	4996	5001	-0,100%
		4992	4992	0,000%	4987	4992	-0,100%
	Vbc [V]	4992	5030	-0,761%	4996	5020	-0,480%
		5016	4982	0,678%	4987	5001	-0,281%
		4948	5006	-1,172%	5011	4968	0,858%
Vca [V]	5016	4982	0,678%	5016	5044	-0,558%	
	5040	4992	0,952%	4992	4972	0,401%	
	4948	4944	0,081%	4982	4944	0,763%	

		ESCLAVO 3			ESCLAVO 4		
Señal	RELE	PLC	Error Relativo	RELE	PLC	Error Relativo	
TRIP	off	off	N/A	off	off	N/A	
	off	off	N/A	off	off	N/A	
	off	off	N/A	off	off	N/A	

		ESCLAVO 3			ESCLAVO 4		
Corriente 700A; 10000V	Ia [A]	700	700	0,000%	700	698	0,286%
		700	700	0,000%	700	700	0,000%
		700	700	0,000%	700	700	0,000%
	Ib [A]	700	700	0,000%	700	700	0,000%
		700	700	0,000%	700	700	0,000%
		700	700	0,000%	700	700	0,000%
	Ic [A]	700	702	-0,286%	700	702	-0,286%
		700	700	0,000%	700	700	0,000%
		700	700	0,000%	700	700	0,000%
	Vab [V]	10003	9998	0,050%	9998	9998	0,000%
		10003	9998	0,050%	10008	10008	0,000%
		9998	9998	0,000%	9998	9998	0,000%
	Vbc [V]	9969	10008	-0,391%	9998	9960	0,380%
		9964	10036	-0,723%	9998	10056	-0,580%
		10060	9998	0,616%	9926	10056	-1,310%
	Vca [V]	9998	9993	0,050%	9998	9969	0,290%
		9955	10008	-0,532%	10046	9969	0,766%
		10027	10027	0,000%	9960	10017	-0,572%
	TRIP	off	off	N/A	off	off	N/A
		off	off	N/A	off	off	N/A
		off	off	N/A	off	off	N/A

Tablas de resultados de las pruebas hechas a los Esclavos #5 y #8 con señales de tensión constante (5000V) y variaciones en las señales de corriente. Relé empleado: GE SR469.

		ESCLAVO 5			ESCLAVO 8		
Señal		RELE	PLC	Error Relativo	RELE	PLC	Error Relativo
Corriente 200A; Voltaje 5000V	Ia [A]	200	200	0,000%	200	200	0,000%
		200	198	1,000%	200	200	0,000%
		200	200	0,000%	200	200	0,000%
	Ib [A]	200	200	0,000%	200	200	0,000%
		200	200	0,000%	200	200	0,000%
		200	198	1,000%	200	200	0,000%
	Ic [A]	200	200	0,000%	200	200	0,000%
		200	200	0,000%	200	200	0,000%
		200	200	0,000%	200	200	0,000%
	Vab [V]	5001	4992	0,180%	5001	4992	0,180%
		4996	4992	0,080%	4992	4996	-0,080%
		4996	4996	0,000%	4996	4987	0,180%
	Vbc [V]	5020	5030	-0,199%	5001	4948	1,060%
		5035	5044	-0,179%	4972	5064	-1,850%
		5025	4977	0,955%	4915	4992	-1,567%
	Vca [V]	5011	5025	-0,279%	4996	4977	0,380%
		5011	5044	-0,659%	4992	5088	-1,923%
		5064	4972	1,817%	4944	4982	-0,769%
	TRIP	off	off	N/A	off	off	N/A
		off	off	N/A	off	off	N/A
		off	off	N/A	off	off	N/A

		ESCLAVO 5			ESCLAVO 8		
Señal		RELE	PLC	Error Relativo	RELE	PLC	Error Relativo
Corriente 400A; Voltaje 5000V	Ia [A]	400	400	0,000%	400	400	0,000%
		400	400	0,000%	400	400	0,000%
		400	400	0,000%	400	398	0,500%
	Ib [A]	400	400	0,000%	400	400	0,000%
		400	398	0,500%	400	400	0,000%
		400	400	0,000%	400	400	0,000%
	Ic [A]	400	400	0,000%	400	400	0,000%
		400	400	0,000%	400	400	0,000%
		400	400	0,000%	400	400	0,000%
	Vab [V]	4996	4996	0,000%	5006	4996	0,200%
		4996	4992	0,080%	4987	4996	-0,180%
		4996	4996	0,000%	4996	5001	-0,100%
	Vbc [V]	4996	4982	0,280%	5025	5006	0,378%
		4968	4987	-0,382%	4968	4992	-0,483%
		4992	4968	0,481%	5054	4972	1,622%
	Vca [V]	4992	4977	0,300%	5011	4963	0,958%
		4972	4996	-0,483%	4972	5016	-0,885%
		4996	4972	0,480%	5030	4996	0,676%
TRIP	off	off	N/A	off	off	N/A	
	off	off	N/A	off	off	N/A	
	off	off	N/A	off	off	N/A	
Corriente 600A; Voltaje 5000V	Ia [A]	600	600	0,000%	600	600	0,000%
		600	600	0,000%	600	600	0,000%
		600	600	0,000%	600	600	0,000%
	Ib [A]	600	600	0,000%	600	600	0,000%
		600	598	0,333%	600	600	0,000%
	Ic [A]	600	600	0,000%	600	602	-0,333%
		600	600	0,000%	600	600	0,000%
		600	600	0,000%	600	600	0,000%
	Vab [V]	4996	4996	0,000%	5001	4987	0,280%
		4996	4992	0,080%	4992	4996	-0,080%
		4992	5001	-0,180%	4992	4992	0,000%
	Vbc [V]	5025	5025	0,000%	5001	4992	0,180%
		4992	5035	-0,861%	4958	5016	-1,170%
		4992	5040	-0,962%	4948	5025	-1,556%
	Vca [V]	4939	5088	-3,017%	5011	5044	-0,659%
		5040	5044	-0,079%	4920	5030	-2,236%
		4977	5011	-0,683%	4939	5020	-1,640%
	TRIP	off	off	N/A	off	off	N/A
off		off	N/A	off	off	N/A	
off		off	N/A	off	off	N/A	

		ESCLAVO 5			ESCLAVO 8		
Señal		RELE	PLC	Error Relativo	RELE	PLC	Error Relativo
Corriente 800A; Voltaje 5000V	Ia [A]	800	800	0,000%	800	800	0,000%
		800	800	0,000%	800	800	0,000%
		800	800	0,000%	800	800	0,000%
	Ib [A]	800	802	-0,250%	800	800	0,000%
		800	800	0,000%	800	800	0,000%
		800	802	-0,250%	800	800	0,000%
	Ic [A]	800	800	0,000%	800	800	0,000%
		800	800	0,000%	800	800	0,000%
		800	800	0,000%	800	800	0,000%
	Vab [V]	5001	4992	0,180%	5006	4992	0,280%
		4987	4992	-0,100%	4992	5001	-0,180%
		4996	4992	0,080%	4996	4996	0,000%
	Vbc [V]	4920	4982	-1,260%	4972	5011	-0,784%
		4982	4977	0,100%	4944	5016	-1,456%
		5006	5011	-0,100%	4968	4987	-0,382%
	Vca [V]	4953	4992	-0,787%	4958	5040	-1,654%
		4992	5006	-0,280%	4982	5054	-1,445%
		4929	4992	-1,278%	5020	5016	0,080%
TRIP	off	off	N/A	off	off	N/A	
	off	off	N/A	off	off	N/A	
	off	off	N/A	off	off	N/A	
Corriente 1000A; Voltaje 5000V	Ia [A]	1000	1000	0,000%	1000	1000	0,000%
		1000	1000	0,000%	1000	1002	-0,200%
		1000	1000	0,000%	1000	1000	0,000%
	Ib [A]	1000	1002	-0,200%	1000	1002	-0,200%
		1000	1002	-0,200%	1000	1000	0,000%
		1000	1002	-0,200%	1000	1002	-0,200%
	Ic [A]	1000	1002	-0,200%	1000	1002	-0,200%
		1000	1002	-0,200%	1000	1002	-0,200%
		1000	1002	-0,200%	1000	1002	-0,200%
	Vab [V]	4987	4996	-0,180%	5001	4987	0,280%
		4996	4992	0,080%	4992	4987	0,100%
		4987	4996	-0,180%	4982	4996	-0,281%
	Vbc [V]	5054	4982	1,425%	4944	4996	-1,052%
		4963	5011	-0,967%	4968	5016	-0,966%
		5016	4977	0,778%	5006	4953	1,059%
	Vca [V]	5044	4958	1,705%	4896	4963	-1,368%
		4948	4958	-0,202%	5006	5020	-0,280%
		5020	4982	0,757%	4987	4958	0,582%
TRIP	on	on	N/A	on	on	N/A	
	on	on	N/A	on	on	N/A	
	on	on	N/A	on	on	N/A	

Tablas de resultados de las pruebas hechas a los Esclavos #5 y #8 con señales de corriente constante (700 A) y variaciones en las señales de tensión. Relé empleado: GE SR469.

		ESCLAVO 5			ESCLAVO 8		
Señal		RELE	PLC	Error Relativo	RELE	PLC	Error Relativo
Corriente 700A; 2500V	Ia [A]	700	700	0,000%	700	700	0,000%
		700	700	0,000%	700	700	0,000%
		700	700	0,000%	700	700	0,000%
	Ib [A]	700	700	0,000%	700	700	0,000%
		700	700	0,000%	700	700	0,000%
		700	700	0,000%	700	700	0,000%
	Ic [A]	700	700	0,000%	700	700	0,000%
		700	702	-0,286%	700	702	-0,286%
		700	700	0,000%	700	700	0,000%
	Vab [V]	2500	2491	0,360%	2500	2496	0,160%
		2500	2496	0,160%	2491	2496	-0,201%
		2500	2491	0,360%	2500	2491	0,360%
	Vbc [V]	2491	2496	-0,201%	2524	2500	0,951%
		2462	2472	-0,406%	2568	2496	2,804%
		2505	2481	0,958%	2568	2577	-0,350%
	Vca [V]	2481	2491	-0,403%	2496	2491	0,200%
		2486	2467	0,764%	2481	2472	0,363%
		2510	2500	0,398%	2496	2563	-2,684%
TRIP	off	off	N/A	off	off	N/A	
	off	off	N/A	off	off	N/A	
	off	off	N/A	off	off	N/A	
Corriente 700A; 5000V	Ia [A]	700	700	0,000%	700	700	0,000%
		700	700	0,000%	700	700	0,000%
		700	700	0,000%	700	700	0,000%
	Ib [A]	700	700	0,000%	700	700	0,000%
		700	700	0,000%	700	700	0,000%
		700	700	0,000%	700	700	0,000%
	Ic [A]	700	700	0,000%	700	700	0,000%
		700	700	0,000%	700	700	0,000%
		700	700	0,000%	700	702	-0,286%
	Vab [V]	4987	4992	-0,100%	4992	5001	-0,180%
		4996	4996	0,000%	4996	5001	-0,100%
		4992	4996	-0,080%	4987	5001	-0,281%
	Vbc [V]	4996	4958	0,761%	5025	4982	0,856%
		4996	5088	-1,841%	4987	4934	1,063%
		4996	4982	0,280%	5025	4987	0,756%
Vca [V]	5035	4963	1,430%	5059	4963	1,898%	
	5001	5040	-0,780%	4996	4944	1,041%	
	4968	5006	-0,765%	4996	4972	0,480%	

		ESCLAVO 5			ESCLAVO 8		
Señal	RELE	PLC	Error Relativo	RELE	PLC	Error Relativo	
TRIP	off	off	N/A	off	off	N/A	
	off	off	N/A	off	off	N/A	
	off	off	N/A	off	off	N/A	

		ESCLAVO 5			ESCLAVO 8		
Corriente 700A; 10000V	Ia [A]	700	700	0,000%	700	700	0,000%
		700	700	0,000%	700	700	0,000%
		700	700	0,000%	700	700	0,000%
	Ib [A]	700	702	-0,286%	700	700	0,000%
		700	700	0,000%	700	700	0,000%
		700	700	0,000%	700	700	0,000%
	Ic [A]	700	700	0,000%	700	700	0,000%
		700	700	0,000%	700	702	-0,286%
		700	700	0,000%	700	700	0,000%
	Vab [V]	10003	9998	0,050%	10008	10003	0,050%
		9988	10003	-0,150%	10003	9998	0,050%
		9998	9988	0,100%	9998	10003	-0,050%
	Vbc [V]	9993	9988	0,050%	10022	9960	0,619%
		9969	10017	-0,481%	9955	9969	-0,141%
		10036	9974	0,618%	9988	9945	0,431%
	Vca [V]	10012	9993	0,190%	9979	9969	0,100%
		9984	10032	-0,481%	10012	10008	0,040%
		10028	9960	0,678%	9940	9940	0,000%
	TRIP	off	off	N/A	off	off	N/A
		off	off	N/A	off	off	N/A
		off	off	N/A	off	off	N/A

Tablas de resultados de las pruebas hechas a los Esclavos #9 y #10 con señales de tensión constante (5000V) y variaciones en las señales de corriente. Relé empleado: GE SR469.

		ESCLAVO 9			ESCLAVO 10		
Señal		RELE	PLC	Error Relativo	RELE	PLC	Error Relativo
Corriente 200A; Voltaje 5000V	Ia [A]	200	200	0,000%	200	200	0,000%
		200	200	0,000%	200	198	1,000%
		200	198	1,000%	200	198	1,000%
	Ib [A]	200	200	0,000%	200	200	0,000%
		200	198	1,000%	200	200	0,000%
		200	198	1,000%	200	200	0,000%
	Ic [A]	200	198	1,000%	200	200	0,000%
		200	200	0,000%	200	200	0,000%
		200	200	0,000%	200	200	0,000%
	Vab [V]	5001	4992	0,180%	4992	4996	-0,080%
		5001	4982	0,380%	4996	5001	-0,100%
		4996	4992	0,080%	4996	4996	0,000%
	Vbc [V]	5049	4996	1,050%	4958	4982	-0,484%
		4968	4996	-0,564%	5006	5006	0,000%
		4977	5011	-0,683%	5006	4996	0,200%
	Vca [V]	5025	5025	0,000%	4968	5006	-0,765%
		4972	4992	-0,402%	4972	4987	-0,302%
		4982	4982	0,000%	4972	5059	-1,750%
	TRIP	off	off	N/A	off	off	N/A
		off	off	N/A	off	off	N/A
		off	off	N/A	off	off	N/A

		ESCLAVO 9			ESCLAVO 10		
Señal		RELE	PLC	Error Relativo	RELE	PLC	Error Relativo
Corriente 400A; Voltaje 5000V	Ia [A]	400	400	0,000%	400	400	0,000%
		400	400	0,000%	400	400	0,000%
		400	398	0,500%	400	400	0,000%
	Ib [A]	400	400	0,000%	400	400	0,000%
		400	400	0,000%	400	400	0,000%
		400	400	0,000%	400	400	0,000%
	Ic [A]	400	400	0,000%	400	400	0,000%
		400	400	0,000%	400	400	0,000%
		400	400	0,000%	400	400	0,000%
	Vab [V]	4992	4992	0,000%	4996	4996	0,000%
		4996	4992	0,080%	4987	4996	-0,180%
		4996	4987	0,180%	4996	4996	0,000%
	Vbc [V]	5025	5006	0,378%	4987	4952	0,702%
		4977	4958	0,382%	5006	4948	1,159%
		5016	4996	0,399%	5011	4977	0,679%
	Vca [V]	5097	4953	2,825%	5001	4948	1,060%
		4953	4977	-0,485%	4987	4987	0,000%
		5001	4996	0,100%	5054	4900	3,047%
TRIP	off	off	N/A	off	off	N/A	
	off	off	N/A	off	off	N/A	
	off	off	N/A	off	off	N/A	
Corriente 600A; Voltaje 5000V	Ia [A]	600	600	0,000%	600	600	0,000%
		600	600	0,000%	600	600	0,000%
		600	600	0,000%	600	600	0,000%
	Ib [A]	600	600	0,000%	600	600	0,000%
		600	600	0,000%	600	600	0,000%
		600	600	0,000%	600	600	0,000%
	Ic [A]	600	600	0,000%	600	600	0,000%
		600	600	0,000%	600	600	0,000%
		600	600	0,000%	600	600	0,000%
	Vab [V]	4996	5001	-0,100%	4992	4996	-0,080%
		4996	4982	0,280%	4996	4987	0,180%
		4992	4996	-0,080%	4987	4996	-0,180%
	Vbc [V]	4987	5011	-0,481%	4992	4996	-0,080%
		4939	4934	0,101%	5035	4972	1,251%
		4982	4963	0,381%	4968	5054	-1,731%
	Vca [V]	4972	5011	-0,784%	4982	4982	0,000%
		4915	4929	-0,285%	4996	5016	-0,400%
		4987	5001	-0,281%	4977	5030	-1,065%
TRIP	off	off	N/A	off	off	N/A	
	off	off	N/A	off	off	N/A	
	off	off	N/A	off	off	N/A	

		ESCLAVO 9			ESCLAVO 10		
Señal		RELE	PLC	Error Relativo	RELE	PLC	Error Relativo
Corriente 800A; Voltaje 5000V	Ia [A]	800	800	0,000%	800	800	0,000%
		800	800	0,000%	800	800	0,000%
		800	800	0,000%	800	800	0,000%
	Ib [A]	800	800	0,000%	800	800	0,000%
		800	800	0,000%	800	802	-0,250%
		800	800	0,000%	800	800	0,000%
	Ic [A]	800	800	0,000%	800	800	0,000%
		800	800	0,000%	800	802	-0,250%
		800	800	0,000%	800	800	0,000%
	Vab [V]	4992	4996	-0,080%	4992	5001	-0,180%
		5001	4996	0,100%	4992	4996	-0,080%
		4992	4987	0,100%	4996	5001	-0,100%
	Vbc [V]	4987	4987	0,000%	5006	4944	1,239%
		5001	5011	-0,200%	4996	5011	-0,300%
		5006	4958	0,959%	4982	5020	-0,763%
	Vca [V]	4948	5016	-1,374%	5020	4963	1,135%
		4992	4987	0,100%	4992	5059	-1,342%
		5011	4982	0,579%	4992	5035	-0,861%
TRIP	off	off	N/A	off	off	N/A	
	off	off	N/A	off	off	N/A	
	off	off	N/A	off	off	N/A	
Corriente 1000A; Voltaje 5000V	Ia [A]	1000	1000	0,000%	1000	1000	0,000%
		1000	1000	0,000%	1000	1000	0,000%
		1000	1000	0,000%	1000	1000	0,000%
	Ib [A]	1000	1000	0,000%	1000	1002	-0,200%
		1000	1000	0,000%	1000	1000	0,000%
		1000	1000	0,000%	1000	1002	-0,200%
	Ic [A]	1000	1002	-0,200%	1000	1002	-0,200%
		1000	1002	-0,200%	1000	1002	-0,200%
		1000	1002	-0,200%	1000	1002	-0,200%
	Vab [V]	4987	4992	-0,100%	4996	4996	0,000%
		4996	4992	0,080%	4992	4987	0,100%
		4992	5001	-0,180%	5001	5001	0,000%
	Vbc [V]	4968	5016	-0,966%	5054	4996	1,148%
		4987	4953	0,682%	4982	4992	-0,201%
		4972	4958	0,282%	5006	5030	-0,479%
	Vca [V]	4958	4958	0,000%	5035	4953	1,629%
		4996	4958	0,761%	4982	4948	0,682%
		4968	4987	-0,382%	5001	4944	1,140%
TRIP	on	on	N/A	on	on	N/A	
	on	on	N/A	on	on	N/A	
	on	on	N/A	on	on	N/A	

Tablas de resultados de las pruebas hechas a los Esclavos #9 y #10 con señales de corriente constante (700 A) y variaciones en las señales de tensión. Relé empleado: GE SR469.

		ESCLAVO 9			ESCLAVO 10		
Señal		RELE	PLC	Error Relativo	RELE	PLC	Error Relativo
Corriente 700A; 2500V	Ia [A]	700	700	0,000%	700	700	0,000%
		700	700	0,000%	700	700	0,000%
		700	700	0,000%	700	700	0,000%
	Ib [A]	700	700	0,000%	700	700	0,000%
		700	700	0,000%	700	700	0,000%
		700	700	0,000%	700	700	0,000%
	Ic [A]	700	702	-0,286%	700	702	-0,286%
		700	700	0,000%	700	702	-0,286%
		700	702	-0,286%	700	700	0,000%
	Vab [V]	2491	2496	-0,201%	2491	2491	0,000%
		2496	2491	0,200%	2500	2486	0,560%
		2500	2496	0,160%	2496	2496	0,000%
	Vbc [V]	2491	2529	-1,525%	2476	2452	0,969%
		2510	2558	-1,912%	2525	2462	2,495%
		2505	2534	-1,158%	2433	2520	-3,576%
	Vca [V]	2496	2539	-1,723%	2505	2443	2,475%
		2515	2534	-0,755%	2472	2496	-0,971%
		2486	2524	-1,529%	2443	2558	-4,707%
	TRIP	off	off	N/A	off	off	N/A
		off	off	N/A	off	off	N/A
		off	off	N/A	off	off	N/A
Corriente 700A; 5000V	Ia [A]	700	700	0,000%	700	700	0,000%
		700	700	0,000%	700	700	0,000%
		700	700	0,000%	700	700	0,000%
	Ib [A]	700	700	0,000%	700	700	0,000%
		700	700	0,000%	700	700	0,000%
		700	700	0,000%	700	700	0,000%
	Ic [A]	700	702	-0,286%	700	700	0,000%
		700	700	0,000%	700	700	0,000%
		700	700	0,000%	700	700	0,000%
	Vab [V]	4992	4992	0,000%	4996	5001	-0,100%
		4992	4996	-0,080%	4992	4953	0,781%
		4992	4992	0,000%	4996	4996	0,000%
	Vbc [V]	5006	4992	0,280%	4996	4953	0,861%
		5001	5025	-0,480%	4963	4915	0,967%
		5001	4996	0,100%	4982	4968	0,281%
	Vca [V]	4992	4939	1,062%	4992	4987	0,100%
		5006	5011	-0,100%	4920	4953	-0,671%
		4977	5001	-0,482%	4987	4977	0,201%
	TRIP	off	off	N/A	off	off	N/A
		off	off	N/A	off	off	N/A
		off	off	N/A	off	off	N/A

		ESCLAVO 9			ESCLAVO 10		
Señal		RELE	PLC	Error Relativo	RELE	PLC	Error Relativo
Corriente 700A; 10000V	Ia [A]	700	700	0,000%	700	700	0,000%
		700	700	0,000%	700	700	0,000%
		700	700	0,000%	700	700	0,000%
	Ib [A]	700	700	0,000%	700	700	0,000%
		700	700	0,000%	700	702	-0,286%
		700	700	0,000%	700	700	0,000%
	Ic [A]	700	700	0,000%	700	700	0,000%
		700	700	0,000%	700	700	0,000%
		700	700	0,000%	700	700	0,000%
	Vab [V]	9993	10003	-0,100%	10003	9998	0,050%
		10003	9988	0,150%	9993	10003	-0,100%
		9993	9998	-0,050%	10003	10003	0,000%
	Vbc [V]	9926	9988	-0,625%	10012	10012	0,000%
		10012	9984	0,280%	9960	10065	-1,054%
		10003	9984	0,190%	10046	9984	0,617%
	Vca [V]	10046	9974	0,717%	9984	10012	-0,280%
		10012	9984	0,280%	9936	10075	-1,399%
		9988	9979	0,090%	10089	10027	0,615%
	TRIP	off	off	N/A	off	off	N/A
		off	off	N/A	off	off	N/A
		off	off	N/A	off	off	N/A

Anexo B. Código Fuente Programa PLC

El programa del PLC se genera a partir de diferentes bloques estructurales, no obstante, STEP7 permite generar un único código fuente en donde se presenta toda la información del programa en un solo archivo de texto en lenguaje AWL. Es opcional utilizar los nombres absolutos o simbólicos de las variables, para el presente anexo se eligió la segunda opción; en caso de requerirse los nombres absolutos, se puede consultar la tabla de símbolos presentada en el documento del proyecto (Ver capítulo 6, Cuadro 14) (Ver archivo pdf Código fuente programa PLC)