

**PASARELA DE COMUNICACIÓN ENTRE MODBUS E IEC 60870-5-104 -
CASO DE ESTUDIO PARA EL SECTOR ELÉCTRICO**



Cristian Darío Alvira Manios

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
DEPARTAMENTO DE ELECTRONICA, INSTRUMENTACION Y CONTROL
POPAYÁN
Noviembre de 2009**

**PASARELA DE COMUNICACIÓN ENTRE MODBUS E IEC 60870-5-104 -
CASO DE ESTUDIO PARA EL SECTOR ELÉCTRICO**

Cristian Darío Alvira Manios

**Documento Final de Trabajo de Grado para optar al título de
Ingeniero en Automática Industrial**

**Director
Ing. Msc. JUAN FERNANDO FLOREZ MARULANDA**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
DEPARTAMENTO DE ELECTRONICA, INSTRUMENTACION Y CONTROL
POPAYÁN
Noviembre de 2009**

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
2. ESTADO DEL ARTE.....	4
2.1. Automatización en el Sector Eléctrico.....	4
2.1.1. Niveles de automatización en un sistema de potencia	5
2.1.1.1. Sistema SCADA	6
2.1.1.2. Centro de control nacional	8
2.1.1.3. Centro de control regional.....	8
2.1.1.4. Subestación	8
2.2. Protocolos de Comunicación Industrial	12
2.2.1 Modbus.....	13
2.3. Protocolos de Telecontrol en el Sector Eléctrico	15
2.3.1. IEC 60870-5-101.....	18
2.3.2. IEC 60870-5-104.....	19
2.3.3. DNP 3.0.....	20
2.3.4. IEC 61850	21
2.4. Pasarelas de Comunicación.....	23
3. ARQUITECTURA DE MEDIACIÓN EN UNA PASARELA DE COMUNICACIÓN..	27
3.1. Arquitectura Software	27
3.2. Modelo en Bloques	29
3.2.1. Maestro - Esclavo.....	29
3.2.2. Pasarela de Comunicación en el Sistema de Automatización.....	30
3.2.3. Bloques Internos	31
3.2.4. Componentes de Comunicación.....	32
3.2.5. Modelo en Bloques de la Arquitectura de Mediación.....	33
3.3. Vista de Procesos	35
3.4. Vista Lógica	36
3.5. Diagramas de Caso de Uso	37
3.6. Diagrama de Componentes	40
3.7. Diagramas de Secuencia	42
3.8. Modelo en Red de Petri Coloreada	44

4. CASO DE ESTUDIO: GM104.....	49
4.1. Requerimientos para una pasarela de comunicación eléctrica.....	49
4.1.1. Tiempo de respuesta.....	49
4.1.2. Datos con estampa de tiempo.....	50
4.1.3. Acceso a Datos.....	50
4.2. Diseño	51
4.3. Implementación.....	52
4.3.1 Modelo Entidad-Relación	54
4.3.2 Mapeo de información entre protocolos Modbus e IEC60870-5-104	55
Escenario 1: Actualización de variable discreta desde subestación eléctrica	58
Escenario 2: Configuración de set point en subestación eléctrica desde el centro de control.	60
Escenario 3: Actualización de variable analógica con estampa de tiempo desde subestación eléctrica.....	62
4.3.3 Interfaz de configuración	64
4.4 Validación	73
5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO	81
6. REFERENCIAS.....	I

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. TIPO DE DATOS MODBUS. TOMADA DE [8].....	15
TABLA 2. TIPO DE DATOS EN IEC 60870-5-104. TOMADO DE [29].....	20
TABLA 3. CORRESPONDENCIA ENTRE TIPO DE DATOS MODBUS E IEC60870-5-104.....	57

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. SISTEMA DE POTENCIA TÍPICO. TOMADO DE [1].....	5
FIGURA 2. NIVELES DE AUTOMATIZACIÓN EN UN SISTEMA DE POTENCIA. TOMADA DE [1]	6
FIGURA 3. SISTEMA SCADA. TOMADO DE [1]	7
FIGURA 4. ARQUITECTURA DE AUTOMATIZACIÓN DE SUBESTACIONES. TOMADO DE [1]	10
FIGURA 5. NIVELES DE CONTROL EN EL SECTOR ELÉCTRICO. TOMADO DE [1]	11
FIGURA 6. ESCENARIO PARA APLICACIÓN DE DNP 3 TOMADA DE [30].	21
FIGURA 7. CONTEXTO DE PASARELA DE COMUNICACIÓN.....	25
FIGURA 8. ESTILO ARQUITECTÓNICO PROPUESTO PARA PASARELA DE COMUNICACIÓN.	29
FIGURA 9. SISTEMA MAESTRO – ESCLAVO.....	30
FIGURA 10. PASARELA COMO SISTEMA MAESTRO Y ESCLAVO.....	30
FIGURA 11. BASE DE DATOS INTERNA.....	31
FIGURA 12. COMPONENTES DE COMUNICACIÓN.....	32
FIGURA 13. DIAGRAMA DE CONTEXTO DE LA ARQUITECTURA DE MEDIACIÓN.....	34
FIGURA 14. DIAGRAMA DE DESPLIEGUE.....	35
FIGURA 15. VISTA LÓGICA.....	37
FIGURA 16. DIAGRAMA DE CASOS DE USO GENERAL.....	38
FIGURA 17. DIAGRAMA DE CASO DE USO DE LA PASARELA DE COMUNICACIÓN.....	39
FIGURA 18. DIAGRAMA DE COMPONENTES.....	41
FIGURA 19. DIAGRAMA DE SECUENCIA PARA TRANSMISIÓN DE INFORMACIÓN DESDE UN DISPOSITIVO MODBUS.	42
FIGURA 20. DIAGRAMA DE SECUENCIA PARA TRANSMISIÓN DE INFORMACIÓN DESDE EL SCADA.....	43
FIGURA 21. ESCENARIO PARA PASARELA DE COMUNICACIÓN. CPN.....	45
FIGURA 22. DECLARACIÓN DE VARIABLES EN LA CPN.	46
FIGURA 23. MODELO EN CPN DE ARQUITECTURA DE MEDIACIÓN. GATEWAY.....	47
FIGURA 24. SIMULACIÓN CPN.....	48
FIGURA 25. MODELO ENTIDAD RELACIÓN.....	55
FIGURA 26. TRASMISIÓN DE EVENTO DESDE DISPOSITIVOS MODBUS HACIA EL CENTRO DE CONTROL.....	58
FIGURA 27. TRASMISIÓN DE VARIABLE ANALÓGICA HACIA DISPOSITIVO DE CAMPO DESDE	

CENTRO DE CONTROL.....	61
FIGURA 28. TRASMISIÓN DE VARIABLE ANALÓGICA CON ESTAMPA DE TIEMPO HACIA CENTRO DE CONTROL.....	63
FIGURA 29. DEFINICIÓN DE OBJETOS MODBUS.....	65
FIGURA 30. DEFINICIÓN DE GRUPOS DE LECTURA Y COMANDOS MODBUS.....	66
FIGURA 31. EDICIÓN AVANZADA DE VARIABLES ANALÓGICAS Y DIGITALES.....	67
FIGURA 32. DEFINICIÓN DE OBJETOS DE INFORMACIÓN IEC 104 EN GM104.....	68
FIGURA 33. CONFIGURACIÓN DE CONEXIONES MODBUS TCP.....	69
FIGURA 34. FORMATO DE EVENTO MODBUS CON ESTAMPA DE TIEMPO.....	70
FIGURA 35. EVENTO MODBUS CON ESTAMPA DE TIEMPO DE TRES CAMPOS.....	70
FIGURA 36. VENTANA DE SEGUIMIENTO A TRAMAS DE COMUNICACIÓN.....	71
FIGURA 37. ESTADO DE VARIABLES.....	72
FIGURA 38. INTERFAZ GM104.....	73
FIGURA 39. INTERFAZ DE CONFIGURACIÓN DE IECTEST.....	74
FIGURA 40. TABLA DE ACTUALIZACIÓN DE VARIABLES EN EL IECTEST.....	75
FIGURA 41. INTERFAZ DE CONFIGURACIÓN TESTHARNES.....	76
FIGURA 42. INTERFAZ MODSIM.....	77
FIGURA 43. VIRTUAL SERIAL PORT EMULATOR.....	77
FIGURA 44. INTERFAZ MODSCAN.....	78
FIGURA 45. UNITY PRO XL.....	79
FIGURA 46. S7-200. TOMADA DE [59].....	79
FIGURA 47. AXON BUILDER.....	80

RESUMEN

En la actualidad los protocolos de telecontrol están tomando cada vez mayor importancia en los procesos industriales. Esto se debe, en gran parte a que estos se encargan de transportar en largas distancias solo información relevante de los procesos, en lugar de toda la información como lo hacen los protocolos de procesos industriales. Sin embargo, los protocolos de telecontrol no logran desplazar totalmente a los protocolos locales de comunicación en los procesos industriales, puesto que estos últimos en la actualidad son vitales para establecer el estado del proceso. Debido a esta situación la importancia de una pasarela de comunicación que permita la conversión de información de los protocolos de comunicación de procesos locales a sistemas de supervisión y control remotos.

En el presente trabajo se definió una arquitectura de mediación entre dos de los protocolos de comunicación industrial más utilizados en la industria del sector eléctrico, IEC 60870-5-104 y Modbus, con esto, se facilitará la implementación de una pasarela de comunicación entre estos, para que realice un adecuado intercambio de información entre las subestaciones de energía y los centros de control. Esta arquitectura se diseñó de manera que soporte la lectura de estampas de tiempo desde las subestaciones de energía, directamente de los instrumentos y demás dispositivos de campo; con esto, los centros de control obtendrán información exacta sobre los acontecimientos en cada una de las subestaciones.

1. INTRODUCCIÓN

En el área de las comunicaciones en entornos industriales, la estandarización de protocolos es un tema en permanente discusión, donde intervienen problemas técnicos y comerciales. Cada protocolo está optimizado para diferentes niveles de automatización y en consecuencia responden al interés de diferentes proveedores.

Así, *Profibus*, *HART* y *Fieldbus Foundation*, están diseñados para procesos industriales. En cambio *DeviceNet* y *CanOpen* están optimizados para los dispositivos discretos de detectores, actuadores e interruptores, donde el tiempo de respuesta y repetibilidad son factores críticos. Así mismo DPN3 o IEC60870-5-104 son protocolos de telecontrol, especializados en la comunicación de las subestaciones eléctricas y los centros de control.

Cada protocolo tiene un rango de aplicación; fuera del mismo disminuye el rendimiento y aumenta la relación coste/beneficio. Debido a la no aceptación de un protocolo estándar único en las comunicaciones industriales, se ha dado pie al desarrollo a aplicaciones que garanticen la interoperabilidad de sistemas que cuenten con protocolos de comunicación no compatibles.

En el sector eléctrico la aparición de equipos programables de protección y control para las subestaciones, así como los equipos que hacen las veces de *Scada* (*Supervisory Control And Data Acquisition*) local y de enlace con el centro de control ha condicionado el desarrollo de muchos proyectos de ingeniería, puesto que los fabricantes de estos equipos han desarrollado en algunos casos sus propios protocolos de comunicación o han hecho uso de normas de manera descoordinada, lo que genera problemas de integración entre los equipos de diferentes fabricantes.

En este proyecto se trabajó con un protocolo para procesos industriales y un estándar de telecontrol, Modbus e IEC60870-5-104, para proponer una arquitectura de mediación entre ellos, de modo que se garantice la fiabilidad en la transmisión de información desde el nivel de planta hasta el nivel de supervisión y control en el sector eléctrico. El protocolo IEC60870-5-104 ha sido ampliamente utilizado para la automatización principalmente de subestaciones eléctricas y aún hoy sigue presentando una gran acogida en el sector. Modbus es un protocolo muy difundido por ser abierto, lo cual le permite la comunicación con gran diversidad de elementos industriales; es por eso que es de gran importancia trabajar sobre él, además, en nuestro medio no se encuentran desarrollos concernientes a este tema.

El presente trabajo se encuentra dividido en cuatro partes que abarcan las etapas en las cuales se desarrolló el proyecto.

En la primera parte se hace una breve reseña sobre la automatización en el sector eléctrico. Luego, se explora lo relacionado a protocolos de comunicación industrial, al igual que se exponen generalidades de los principales protocolos de telecontrol existentes. También se presentan algunas pasarelas de comunicación industrial comerciales haciendo un pequeño análisis sobre su funcionamiento.

En la segunda parte se presenta en detalle las características de cada uno de los elementos que conforman la arquitectura propuesta y el papel que desempeñan en el sistema completo. Se presentan diferentes modelos y diagramas con el fin de realizar una exposición exhaustiva de la arquitectura diseñada.

En la sección tres se describe la forma en que se desarrolló la aplicación que da soporte a la arquitectura propuesta, además se explica su funcionalidad y la interacción entre sus componentes software. Aquí también es presentada la validación hecha a la arquitectura utilizando una aplicación software que

implementa la arquitectura.

Para finalizar, se exponen los resultados y conclusiones del proyecto y el trabajo futuro.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. Automatización en el Sector Eléctrico

Las empresas de energía se benefician por la automatización de los sistemas eléctricos, ya que esto permite coordinar, operar y controlar los componentes de su sistema sin intervención humana. Entre estos beneficios se pueden contar [1]:

- Acciones mucho más rápidas
- Mayor confiabilidad
- Mejores condiciones de operación
- Reducción significativa de costos operativos

Un sistema de potencia típico es el mostrado en la Figura 1, allí se ilustran los elementos necesarios para llevar la energía eléctrica generada en las centrales eléctricas hasta los puntos de consumo a través de grandes distancias. En este escenario se encuentra a la salida de la central eléctrica una subestación que eleva el nivel de tensión eléctrica de 13.800 voltios hasta un rango entre los 110 y los 500 KV para poder transmitir la energía eléctrica grandes distancias. Después de esto, se encuentran subestaciones que transforman la energía con alto voltaje en energía con un voltaje medio para usuarios industriales que necesitan estos niveles, luego se transforma en energía de bajo voltaje para usuarios comerciales o residenciales que requieren este nivel de tensión.

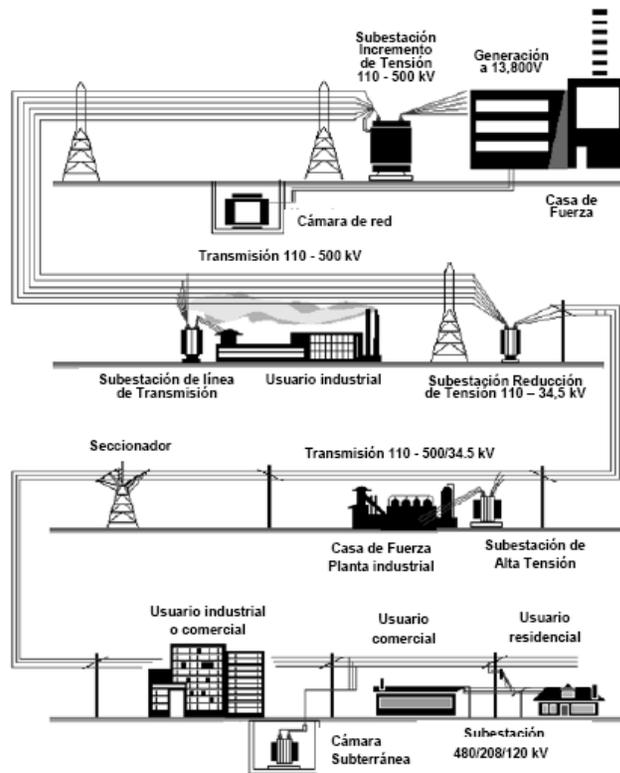


Figura 1. Sistema de potencia típico. Tomado de [1]

2.1.1. Niveles de automatización en un sistema de potencia

El sistema eléctrico tiene una estructura jerárquica que permite identificar los niveles de automatización como se puede ver en la figura 2, esta inicia con el Centro de Control Nacional y llega hasta los usuarios finales, pasando por los Centros de Control Regional o de Electrificadora, las subestaciones eléctricas y el Sistema de Distribución.

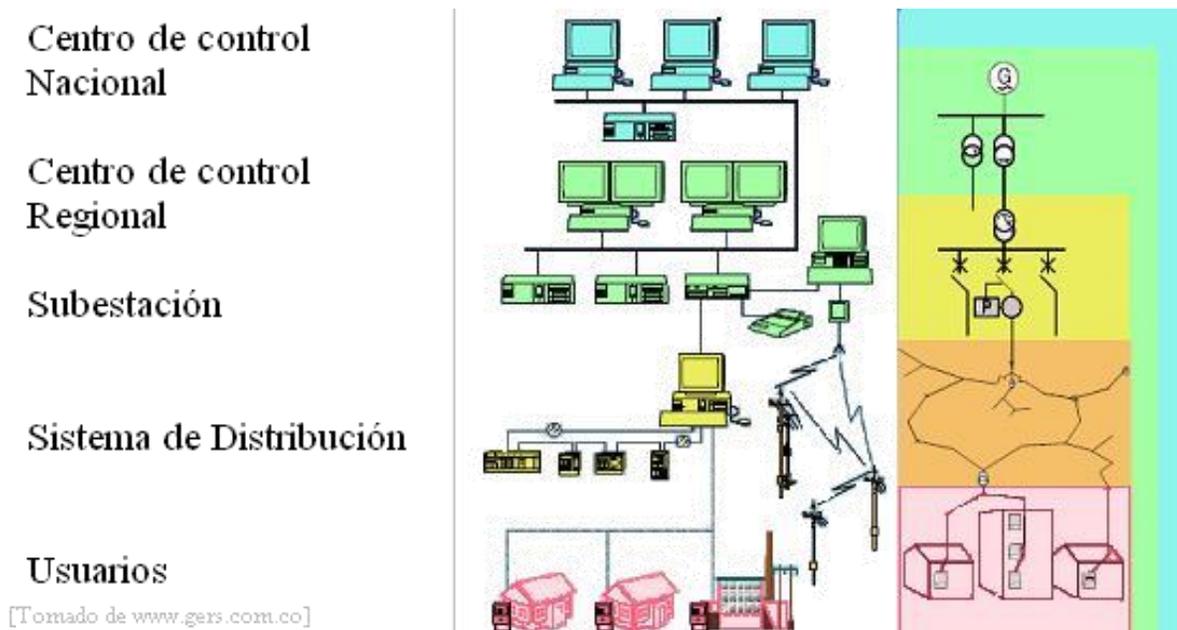


Figura 2. Niveles de automatización en un sistema de potencia. Tomada de [1]

2.1.1.1. Sistema SCADA

Las funciones de los sistemas *Scada* son fundamentales para la apropiada implementación de la automatización de un sistema eléctrico. Este permite ejecutar las operaciones de control, recolección y procesamiento de la información [1].

Son muchas las ventajas que ofrece un *Scada*, principalmente porque permite el envío eficiente de la información necesaria para el sistema. Entre los datos enviados se encuentran:

- Mediciones analógicas de magnitudes eléctricas como Voltajes, Corrientes, Megavatios y Megavares.
- Estado y medidas analógicas tales como posiciones de *taps* de transformadores
- Estado y medidas analógicas de relés.
- Conectividad de circuitos (estado de interruptores y *switches* dentro de las

subestaciones y los circuitos de distribución).

- Identificación especial de elementos de sistemas de distribución.
- Información de eventos que puedan originar la ejecución de acciones dentro del sistema de distribución.

La Figura 3 ilustra un centro de control regional donde se implementa un sistema Scada para coordinar la generación de energía eléctrica de una central eólica y una hidráulica. Esta energía debe ser transmitida hasta centros de consumo de media y baja tensión, y a uno de alta tensión. Todas las subestaciones eléctricas que están bajo la cobertura de este centro de control se conectan al sistema Scada tal como lo ilustran las líneas rojas de la Figura 3.

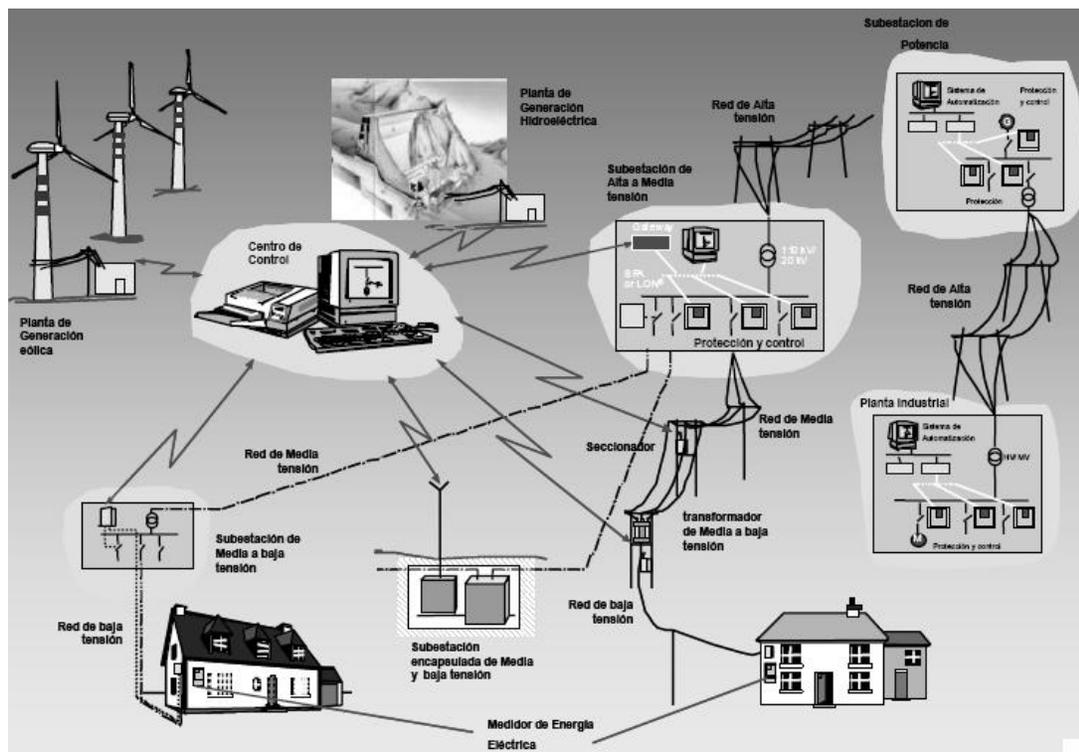


Figura 3. Sistema SCADA. Tomado de [1]

2.1.1.2. Centro de control nacional

El Ministerio de minas y energía nacional reglamenta las funciones del Centro Nacional de Despacho - *CND*, “Es responsable de la planeación, coordinación, supervisión y control de la operación integrada de los recursos de generación, interconexión y transmisión del sistema integrado nacional (...)” [2], es decir, se encarga de desarrollar funciones de gestión y automatización del sistema de generación y transmisión eléctrico.

2.1.1.3. Centro de control regional

Según reglamentación del Ministerio de minas y energía “son responsables de la planeación eléctrica de corto plazo, coordinación, supervisión y control de la operación de las redes, subestaciones y plantas de generación que se encuentren bajo su cobertura, coordinando la operación y maniobras de esas instalaciones, con sujeción a las instrucciones impartidas por el *CND*” [2].

Las funciones que lo conforman se pueden agrupar por lo tanto en dos componentes importantes, desarrollados sobre el sistema de distribución [1]:

- El *DMS (Distribution Management Systems)* que contiene las funciones de gestión. Esta componente se la asocia con la llamada integración horizontal [3].
- El *DA (Distribution Automation)* que contiene las funciones de automatización propiamente. Esta componente se la asocia con la llamada integración vertical [3].

2.1.1.4. Subestación

Uno de los niveles de automatización de un sistema de potencia eléctrico lo constituyen las subestaciones. Es allí donde se realiza la transformación de la tensión de la energía eléctrica. Se realizan funciones como [1]:

- Control de bahías y de alimentadores

- Control de secuencia
- Sincronización de reloj
- Protección de bahías y alimentadores
- Medición de parámetros de calidad
- Medición de parámetros eléctricos

En una subestación eléctrica se encuentran sistemas de supervisión y control, equipos de comunicación, Unidades Terminales Remotas (*UTRs*), relés digitales de protección, transformadores, entre otros.

El sistema de automatización en una subestación comprende un sistema totalmente distribuido basado en una arquitectura por niveles operativos y de control como se muestra en la Figura 4, estos son:

Nivel 0: Corresponde a los equipos de maniobra en patio de la subestación.

Nivel 1: Son los equipos de control primario, IDEs (*Intelligent Device Electronics*).

Nivel 2: Se encuentran los equipos de supervisión y control de la subestación.

Nivel 3: Interfaz de comunicación con el centro de control para la supervisión remota de los equipos de la subestación.

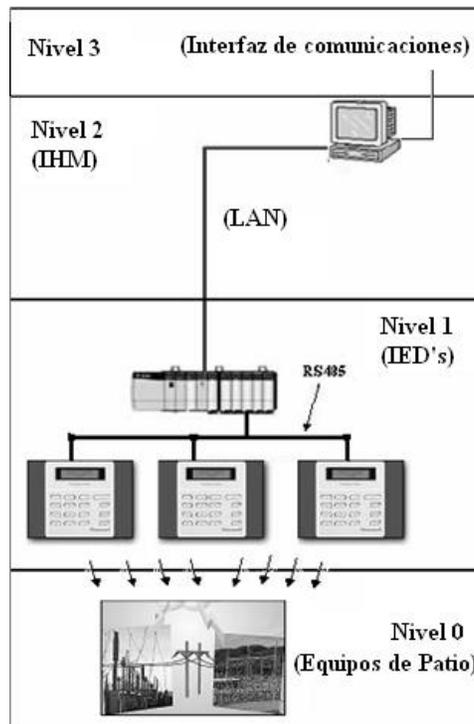


Figura 4. Arquitectura de automatización de subestaciones. Tomado de [1]

La pirámide de automatización aplicada al sector tal como se ilustra en la Figura 5, muestra en el nivel de campo los equipos primarios de la subestación, formados por seccionadores, interruptores, transformadores entre otros, además de sus interfaces con el sistema secundario de protección, control y automatización. El nivel de control corresponde a las bahías de las subestaciones, con los equipos llamados de posición, los cuales están conectados directamente al nivel de campo y realizan operaciones de protección, de control y adquisición de datos, de medida, de lógica programable, de calidad de servicio y de monitorización. El nivel de supervisión lo conforman los equipos centrales del sistema, que se comunican de forma digital con los equipos de posición y realizan funciones globales del sistema como automatismos o registro global de sucesos, además, constituyen el enlace con el centro de control que implementa las funciones de los niveles MES (*Manufacturing Execution System*) y ERP (*Enterprise Resource Planning*) sobre gestión y planeación del sistema eléctrico.

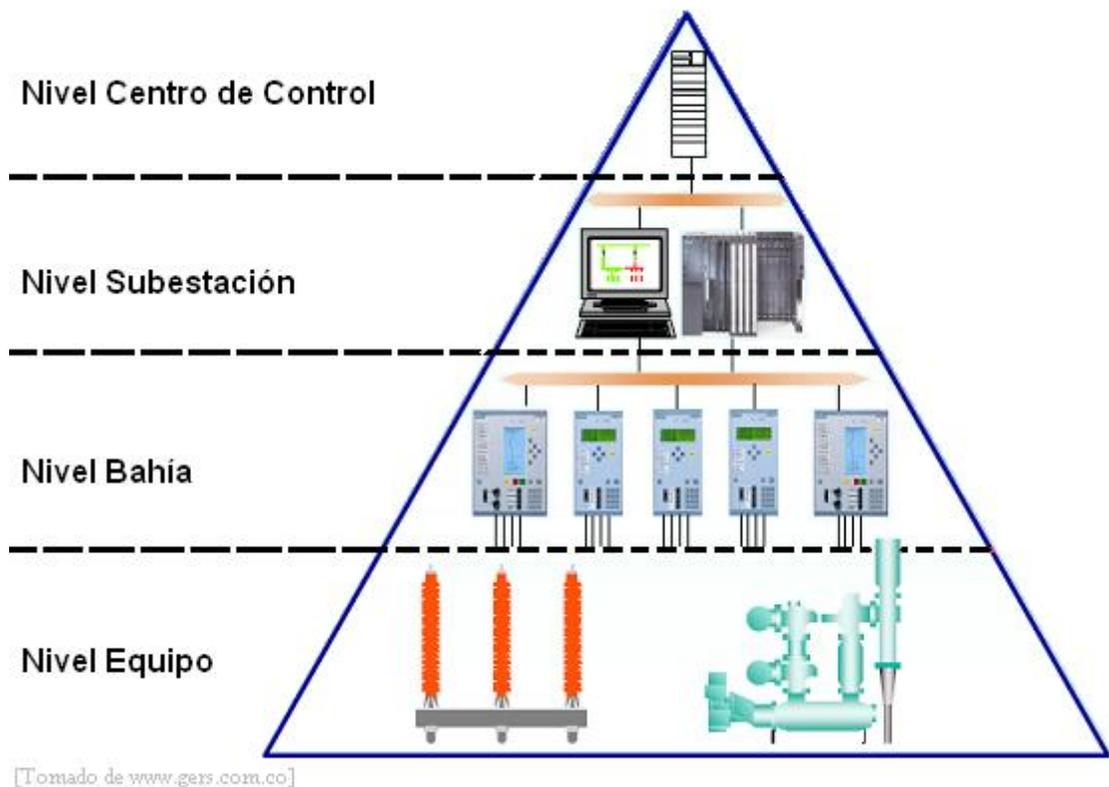


Figura 5. Niveles de control en el sector eléctrico. Tomado de [1]

En una arquitectura jerárquica es de gran importancia el sistema de comunicaciones que enlaza a los equipos de nivel de bahía y de subestación, puesto que representan el soporte de la arquitectura distribuida de funciones y sus prestaciones y por ende, determinan las propias del sistema completo. En la actualidad, los sistemas de comunicación más comunes corresponden a comunicación serie asíncrona, con protocolos multipunto basados en la norma IEC 60870-5, tal como el protocolo IEC 60870-5-104. La velocidad de comunicación es típicamente de 19000 baudios o superior. Como medio de transmisión se utiliza fibra óptica de plástico 1mm o de cristal de 62,5/125. La estructura de la red puede ser en árbol o en anillo.

Las funciones de control requieren tiempos pequeños para la transmisión de bajos volúmenes de información tales como comandos, medidas y estados. Las funciones de protección involucran un mayor volumen de datos transmitidos, pero se presenta una mayor tolerancia para los tiempos de transmisión.

Entre los requerimientos que debe cumplir la arquitectura de comunicaciones del sistema eléctrico completo, y por ende la arquitectura de medición entre dos protocolos de un dispositivo involucrado en la primera, están: *accesibilidad a los datos*, que se refiere a las facilidades para el acceso a los datos desde localizaciones remotas. *Mayor capacidad de la red de comunicaciones del sistema*, se refiere a la transmisión de eventos con tiempos de retardo de milisegundos y alta fiabilidad, así como la integridad y seguridad de los datos. *Herramientas sencillas para el diseño y configuración del sistema*. *Interoperabilidad entre equipos de diferente fabricante*.

2.2. Protocolos de Comunicación Industrial

Un protocolo de comunicación permite la transferencia y el intercambio de información entre diferentes dispositivos en una red, por medio de un conjunto de reglas que lo constituyen. La evolución de estos ha estado ligada al avance de la tecnología electrónica y especialmente al de los microprocesadores [4]. La irrupción de los microprocesadores en la industria ha posibilitado su integración a redes de comunicación con importantes ventajas, entre las cuales figuran:

- Mayor precisión debido a la tecnología digital presente en las mediciones.
- Mayor y mejor disponibilidad de información de los dispositivos de campo
- Diagnóstico remoto de componentes

Los buses de datos que permiten la integración de equipos para la medición y control de variables de proceso, reciben el nombre de buses de campo [5]. Un bus de campo es un sistema de transmisión de información que simplifica la instalación y operación de máquinas y equipos industriales utilizados en procesos de producción.

El objetivo de un bus de campo es sustituir las conexiones punto a punto entre los

elementos de campo y el equipo de control [6]. Generalmente son redes digitales, bidireccionales, multipunto, montadas sobre un bus serie, que conectan dispositivos de campo como Controladores Lógicos Programables (*Programmable Logic Controllers* - PLC), transductores, actuadores, sensores y equipos de supervisión [5].

Muchos de los protocolos patentados para dichas aplicaciones tienen la limitante de que el desarrollador no permite al usuario final la interoperabilidad de instrumentos, es decir, no es posible intercambiar los instrumentos de un fabricante por otro similar.

2.2.1 Modbus

Modbus es un protocolo de comunicaciones situado en la capa de aplicación, según el modelo de referencia OSI, su arquitectura está basada en la configuración cliente/servidor. Fue diseñado por Modicon para sus PLCs en 1979. Se ha convertido en el protocolo de comunicaciones de la industria que posiblemente soporta la mayor cantidad de dispositivos electrónicos industriales [7][8]. Algunas de las razones para esto son:

- Es público (Abierto).
- Su implementación es fácil y requiere poco desarrollo.
- Maneja bloques de datos sin suponer restricciones.

Modbus permite entre otras cosas el control de una red de dispositivos, por ejemplo un sistema de medida de temperatura y humedad, y comunicar los resultados a un computador [9]. Modbus también se usa para la conexión del computador de supervisión con una unidad terminal remota (*Remote Terminal Unit* - RTU) en sistemas Scada. Existen versiones del protocolo Modbus para puerto serie y Ethernet (Modbus/TCP).

Modbus presenta dos variaciones, las cuales difieren en la representación numérica de los datos y en algunos detalles del protocolo. La primera de ellas, Modbus RTU, es una representación binaria compacta de los datos. La segunda se conoce como Modbus ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*), es una representación legible del protocolo pero menos eficiente. Las dos implementaciones del protocolo son serie [10], es decir, se presenta un intercambio serial de datos entre un DTE (*Data Terminal Equipment*) y un DCE (*Data Circuit-Terminating Equipment*). La versión Modbus/TCP es muy semejante al formato RTU, pero estableciendo la transmisión mediante paquetes TCP/IP.

Una red Modbus se conforma por dispositivos que actúan como clientes y otros que lo hacen como servidores, cada uno posee una dirección única. Cualquiera de estos puede enviar órdenes Modbus, aunque lo habitual es permitirlo sólo a dispositivos tipo cliente. Los comandos Modbus contienen la dirección del dispositivo destinatario de la orden. Todos los dispositivos reciben la trama pero sólo el destinatario la procesa. Los comandos básicos Modbus permiten controlar un dispositivo RTU para modificar o solicitar el contenido de sus registros [10].

De otra parte está la especificación Modbus Plus, la cual define un completo bus de campo basado en la técnica de paso de testigo como método de acceso a la red, mientras que en las versiones anteriores se realiza por medio de un proceso interrogación – respuesta simple. Modbus Plus es semejante al estándar EIA/RS485 [11] aunque no son compatibles.

En la tabla 1 se muestran los modelos de datos definidos en el protocolo Modbus. Los dos primeros grupos son para variables de tipo binario, para lo cual, cada dirección apunta a un bit en el mapa de memoria que es suficiente para la representación de este tipo de dato. Los dos restantes grupos separan dos bytes en la memoria para la representación de estos datos.

Tipo de Datos Modbus	Nombre Común	Dirección de Inicio
Coils	Salidas Digitales	00001
Inputs	Entradas Digitales	10001
Input Register	Entradas Analógicas	30001
Holding Register	Salidas Analógicas	40001

Tabla 1. Tipo de Datos Modbus. Tomada de [8]

El protocolo Modbus carece de indicadores para la calidad de la información contenida en los datos, y que brinde un panorama sobre la conveniencia del uso de la información allí presentada [12]. Tampoco define una estampa de tiempo [13] que informe el momento exacto en el cual una de las posiciones de memoria del dispositivo ha cambiado. Es por esto que Modbus no soporta directamente el seguimiento de eventos marcados con una estampa de tiempo.

2.3. Protocolos de Telecontrol en el Sector Eléctrico

Un sistema de telecontrol es un conjunto de equipos que permite a un operador remoto controlar el funcionamiento de un sistema. Las primeras patentes de sistemas de telecontrol datan de finales del siglo XIX [14]. Dichos sistemas se limitaban al control remoto de dispositivos, generalmente interruptores, y a la transmisión de información relativa al estado de éstos, algunas alarmas y los valores de alguna magnitud física.

Los primeros sistemas de control automático para redes eléctricas datan de mediados de la década del cincuenta [15]. Ya a partir de los años sesenta aparecen los primeros sistemas Scada [16], que gracias al uso de los computadores y al empleo de pantallas para la presentación de la información a los operadores presentan nuevas funcionalidades [17]. Entre estas nuevas funciones están las EMS (*Energy Management System*) [18], tales como: análisis de seguridad, estimación de estado, predicciones de carga, archivo histórico de

datos, etc [15]. De esta manera los sistemas de telecontrol se han convertido en herramientas imprescindibles para la gestión de redes eléctricas o de cualquier tipo de red de proceso distribuido.

En la red de comunicaciones de un sistema de telecontrol de una red eléctrica existen dos niveles de jerarquía: la red troncal, centrada básicamente en las instalaciones de alta tensión (HV) [19] y en los centros de control; y la red de acceso, usada para comunicar las instalaciones de media (MV) y baja (LV) tensión, e incluso a los mismos clientes. Las redes troncales (que abarcan las grandes plantas generadoras, grandes subestaciones y centros de control) ejercen mayor presión sobre la integración de los medios de comunicación, la interconexión, el uso compartido de los recursos y la estandarización, lo cual hace que estas redes tiendan a evolucionar hacia mayores anchos de banda y más integración. Las redes de acceso, que engloban los sistemas de media y baja tensión, la automatización de la distribución y el DSM (*Demand Side Management*) [20] [21], no necesitan mucho ancho de banda y tienen grandes restricciones económicas.

Las redes de acceso podrían usar protocolos estándares del tipo IEC 60870-5 que siguen la pila de tres niveles EPA (*Enhanced Performance Architecture*) [22] de IEC (*International Electrotechnical Commission*). Aunque el estándar IEC 60870-5 está siendo cada vez más aceptado, no define un protocolo completamente cerrado sino, más bien, un conjunto amplio de opciones entre las cuales elegir, permitiendo diferentes funcionalidades dentro del estándar, lo cual hace necesaria la definición de perfiles o subconjuntos para aplicaciones o compañías específicas. Por ese motivo se definió en 1995 el estándar IEC 60870-5-101, que define un perfil funcional para tareas básicas de telecontrol y el IEC 60870-5-104 como una extensión del primero en el año 2000.

Algunas compañías han implementado protocolos basados en IEC 60870-5, entre

los que destaca el protocolo DNP 3.0 (*Distributed Network Protocol*) [23], usado principalmente para las funciones de SCADA y la automatización de la distribución [24]. Este es un protocolo muy aceptado a pesar de no adaptarse completamente al estándar. DNP añade un nivel de transporte que permite usar mensajes mayores que los de la especificación original. Otras implementaciones añaden una capa de red/transporte al estándar IEC 60870-5, ya que muchas veces es necesario establecer varios enlaces o hay una red entre las subestaciones y los centros de control en el sector eléctrico.

La IEC es un organismo internacional no gubernamental que genera y publica estándares internacionales para el sector eléctrico y electrónico [25]. Los estándares IEC cubren tecnologías variadas, que van desde la generación, transmisión y distribución de energía eléctrica hasta lo concerniente a electrodomésticos y equipos de oficina, semiconductores, fibra óptica, baterías, energía solar, nanotecnología entre otras.

IEC 60870-5 (IEC870-5) son especificaciones agrupadas en cinco documentos que definen los estándares para el telecontrol, la tele protección y las telecomunicaciones en los sistemas eléctricos de potencia. Aplica a equipos de telecontrol y sistemas de monitoreo. Fue desarrollado por el comité técnico IEC 57 (WG 3). [26]. Estos documentos son:

- IEC 60870-5-1 *Transmission Frame Formats*.
- IEC 60870-5-2 *Data Link Transmission Services*.
- IEC 60870-5-3 *General Structure of Application Data*.
- IEC 60870-5-4 *Definition and coding of Information Elements*.
- IEC 60870-5-5 *Basic Application Functions*.

A partir de estas especificaciones, el Comité Técnico 57 de la IEC generó cuatro estándares:

- IEC870-5-101: *Companion standard* para funciones básicas de telecontrol.
- IEC870-5-102: *Companion Standard* para transmisión de integración total.
- IEC870-5-103: *Companion standard* para interfaz de equipos de protección.
- IEC870-5-104: *Companion standard* de acceso a redes para IEC870-5-101.

2.3.1. IEC 60870-5-101

IEC 60870-5-101 (también conocido como IEC 870-5-101) es un estándar internacional, liberado a comienzos de los noventa por el IEC. El protocolo ha encontrado amplio uso en el sector de la energía, y es utilizado aún en la actualidad. Está basado en la arquitectura EPA y define solamente la capa física y las capas de aplicación del modelo OSI.

IEC 60870-5-101 es totalmente compatible con las normas IEC 60870-5-1 a IEC 60870-5-5 y su uso estándar es en serie y asíncrono para el telecontrol de canales entre DTE y DCE.

IEC 60870-5-101 [27] es un protocolo para enviar mensajes de telecontrol básicos entre una estación central de telecontrol y una subestación de telecontrol, la cual usa permanentemente conexiones directas de circuitos de datos entre la estación central y cada una de las subestaciones.

En algunas aplicaciones, se puede requerir el envío del mismo tipo de mensaje de aplicación entre estaciones de telecontrol usando una red de datos que contenga estaciones repetidoras la cual almacena y envía los mensajes y suministra un circuito virtual entre las estaciones de telecontrol. Este tipo de red retarda los mensajes en una cantidad de tiempo dependiendo del tráfico de la red. Estos retardos de carácter no determinístico son la principal razón para que no sea posible el uso de la capa de enlace definido en la IEC 60870-5-101 entre estaciones de telecontrol, donde se necesitan tiempos de retardos mínimos.

2.3.2. IEC 60870-5-104

IEC 60870-5-104 (también llamado IEC 870-5-104) es un estándar internacional, liberado en el año 2000 por la IEC. Este es una extensión del protocolo IEC 101 con cambios en los servicios de la capa de transporte, de la capa de red, de la capa de enlace y de la capa física para satisfacer la totalidad de accesos a la red [28]. Habilita la comunicación entre estaciones de control y subestaciones a través de una red estándar TCP/IP. El protocolo TCP es usado para conexiones orientadas a la transmisión segura de datos entre procesos geográficamente distanciados.

Las especificaciones del IEC 60870-5-104 son una combinación de la capa de aplicación de IEC 60870-5-101 y las funciones de transporte suministradas por TCP/IP.

Dentro de las especificaciones del protocolo IEC 60870-5-104 se encuentran un par de términos para indicar la dirección del flujo de información entre dos estaciones conectadas con este protocolo. Así, cuando se dice que es información en dirección monitor, se refiere a la transmitida desde la estación controlada hacia la estación controladora, y a la información que es transmitida por la estación controladora hacia la estación controlada se la denomina información en dirección control [28]. De esa manera se definen los tipos de información soportada para las dos direcciones de transmisión de información en el protocolo IEC 60870-5-104 tal como se observa en la tabla 2.

Dirección	Tipo de Información Soportada
Control	<i>Single Command</i>
	<i>Double Command</i>
	<i>Setpoint</i>
	<i>Regulating step command</i>
Monitor	<i>Single indication [1 Bit] with quality</i>
	<i>Single indication [1 Bit] with quality and time tag</i>

	<i>Double indication [2 bit] with quality</i>
	<i>Double indication [2 bit] with quality and time tag</i>
	<i>Measured scaled value with quality</i>
	<i>Measured scaled value with quality and time tag</i>
	<i>Measured normalized value with quality</i>
	<i>Measured normalized value with quality and time tag</i>
	<i>Measured floating point value with quality</i>
	<i>Measured floating point value with quality and time tag</i>
	<i>Bitpattern [32 bit] with quality</i>
	<i>Bitpattern [32 bit] with quality and time tag</i>
	<i>Counter value with quality</i>
	<i>Counter value with quality and time tag</i>
	<i>Step position value with quality</i>
	<i>Step position value with quality and time tag</i>
	<i>Event of protection equipment with quality and time tag</i>

Tabla 2. Tipo de datos en IEC 60870-5-104. Tomado de [29]

El estándar IEC 60870-5-104 soporta una amplia variedad de datos en las dos direcciones de transmisión de información, en dirección control y en dirección monitor. Para los datos en dirección monitor se cuenta con un indicador para la calidad de la información y puede además incluir una estampa de tiempo asociada a la variable.

2.3.3. DNP 3.0

El protocolo DNP [23] fue desarrollado para comunicación con subestaciones de telecontrol y otros dispositivos electrónicos inteligentes. Fue diseñado pensando en las aplicaciones actuales y futuras de telecontrol de la industria de energía norte americana. Inicialmente el protocolo solamente soportaba comunicación serial, pero en el presente hay versiones para operar sobre TCP/IP.

A diferencia de los protocolos relacionados tales como el IEC 60870-5-101, el DNP en su versión 3.0 establece una elaborada capa de aplicación, la cual permite decodificar los datos sin uso de parámetros implícitos. Este soporta una

variedad de modos de representación para los objetos de información, ofreciendo un alto grado de interoperabilidad en la capa de aplicación. Lograr esto supuso un alto costo en complejidad, lo cual dificulta la implementación puesto que se necesita más tiempo de implementación y prueba.

Comparando DNP con IEC 60870-5-101 se encuentran algunas diferencias, entre las cuales se puede destacar que la capa de transporte del DNP permite fragmentar la transmisión de datos en altos volúmenes. Esto tiene un efecto positivo sobre la comunicación por TCP/IP, puesto que el ancho de banda de la red puede ser totalmente utilizado.

En la Figura 6 se observa un escenario donde un sistema Scada supervisa y controla RTUs de una subestación remota utilizando DNP. Para esto, en la Figura se proponen diferentes medios físicos de comunicación entre la estación maestro y la subestación, entre las que se destacan la señal de radio y la fibra óptica.

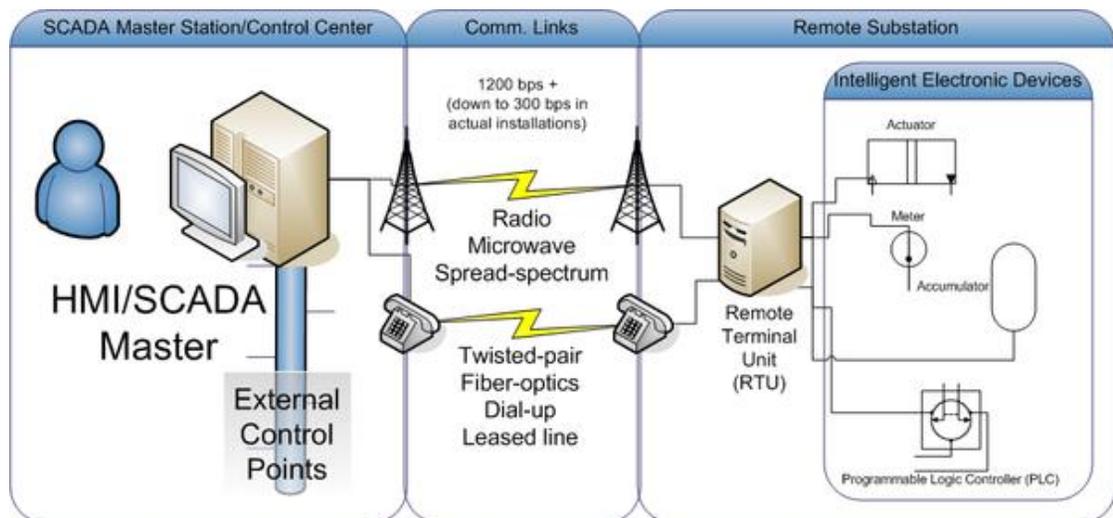


Figura 6. Escenario para aplicación de DNP 3 Tomada de [30].

2.3.4. IEC 61850

IEC 61850 [31] es un estándar diseñado para la automatización de subestaciones eléctricas. Es parte de la arquitectura de referencia para sistemas de potencia

eléctrica del comité técnico 57 (TC57) [26] de la Comisión Electrotécnica Internacional. El modelo abstracto de datos definido en IEC61850 puede ser mapeado a un número de protocolos. Los mapeos actuales en el estándar son a MMS (*Manufacturing Message Specification*), GOOSE (*Generic Object Oriented Substation Event*) [32], SMV (*Sampled Measured Values*) [33], y dentro de poco a servicios Web. Estos protocolos pueden correr sobre redes TCP/IP y/o LANs de subestaciones utilizando un *switch* de alta velocidad para obtener la respuesta necesaria en tiempos menores a 4 ms para relés de protección [31].

IEC 61850 consiste de las siguientes partes detalladas por separado en los documentos del estándar:

- IEC61850-1: Introducción
- IEC61850-2: Glosario
- IEC61850-3: Requerimientos Generales
- IEC61850-4: Sistema y administración de proyecto
- IEC61850-5: Requerimientos de comunicación para funciones y modelos de dispositivos
- IEC61850-6: Descripción del lenguaje de configuración para comunicación en subestaciones eléctricas relacionadas a IDEs
- IEC61850-7: Estructura de comunicación básica para subestaciones y equipos de alimentación
- IEC61850-8: Comunicación específica del servicio de mapeo (SCSM)
 - IEC61850-8-1: Mapeo a MMS (ISO/IEC9506-1 y ISO/IEC 9506-2)
- IEC61850-9: Comunicación específica del servicio de mapeo (SCSM)
 - IEC61850-9-1: Ejemplo de valores sobre una línea serial unidireccional con enlace punto a punto
 - IEC61850-9-2: Ejemplo de valores sobre ISO/IEC 8802-3
- IEC61850-10: Parámetros de prueba

Características de IEC 61850:

1. *Modelado de Datos* – La funcionalidad completa de una subestación es modelada dentro de diferentes nodos lógicos estándar, los cuales pueden ser agrupados bajo diferentes dispositivos lógicos. Estos son nodos lógicos para datos/funciones relacionados a dispositivos lógicos (LLN0) y dispositivos físicos (LPHD).
2. *Esquemas de Reporte* – Estos son varios esquemas de reporte (BRCB & URCB) para reportar datos desde un servidor a través de una relación cliente-servidor. Este puede ser disparado debido a unas condiciones predefinidas de disparo.
3. *Transferencia Rápida de Eventos* – Evento Genérico de Subestación (GSE) son definidos para transferencia rápida de eventos de datos para una comunicación punto a punto.
4. *Configuración de Grupos* – La configuración de bloques de grupos de control (SGCB) son definidos para manejar la configuración de grupos, así, el usuario puede alternar a otro grupo activo acorde a su requerimiento.
5. *Transferencia de Datos de Prueba* – Estos esquemas también son definidos para manejar la transferencia de valores de prueba utilizando los bloques de control de valores de prueba (SVCB).
6. *Comandos* – Varios tipos de comandos son soportados por IEC 61850 donde se incluyen directos & comandos SBO con seguridad normal y seguridad incrementada.
7. *Almacenamiento de Datos* – SCL (Lenguaje de Configuración de la Subestación) es definido para almacenamiento completo de la configuración de datos de la subestación en un formato específico.

2.4. Pasarelas de Comunicación

Una pasarela de comunicación industrial es la encargada de intercomunicar

sistemas con protocolos y/o arquitecturas diferentes, para que las aplicaciones de dichos sistemas puedan comunicarse [34]. Su propósito es traducir la información del protocolo utilizado en una red al protocolo usado en la red de destino.

Dadas las características funcionales de los protocolos de comunicación involucrados en el sector eléctrico, se hace necesario el uso de una pasarela de comunicaciones que permita la conexión de una subestación eléctrica y el centro de control. Tal como se ilustra en la Figura 7, las subestaciones eléctricas están físicamente separadas por grandes distancias de los centros de control, y un centro de control de gran tamaño en Colombia supervisa y controla el funcionamiento de alrededor de treinta subestaciones eléctricas. De cada una de estas subestaciones se monitorea cerca de tres mil variables, lo cual muestra el volumen de información que debe manejar uno de estos centros. Debido a esto, se hace necesaria la utilización de un filtro que lleve únicamente la información que ha sido actualizada en la subestación. De esta manera, es apropiada la utilización de un protocolo de telecontrol que comunique las subestaciones eléctricas y el centro de control, además, si se considera conectar directamente la subestación y el centro de control a través de un protocolo diseñado para procesos industriales tal como Modbus, este puede introducir retardos del orden de los segundos debido al volumen de información que debe transmitir.

El medio de comunicación que conecta las subestaciones y el centro de control es el soportado por el paquete de protocolos TCP/IP, es así como este puede ser por medios de transmisión guiados como fibra óptica o no guiados como los que utilizan técnicas inalámbricas.

Para lograr una comunicación eficiente con las subestaciones, el centro de control debe comunicarse con una pasarela de comunicación que convierta la información leída de los dispositivos de campo a través de un protocolo diseñado para procesos industriales y se lo entregue en el formato de protocolo de telecontrol, los

cuales debido al diseño arquitectónico a eventos transmite únicamente información relevante en el proceso o la requerida por los centros de control. Tal como se ilustra en la Figura 7, físicamente las pasarelas de comunicación se pueden encontrar dentro de las subestaciones eléctricas.

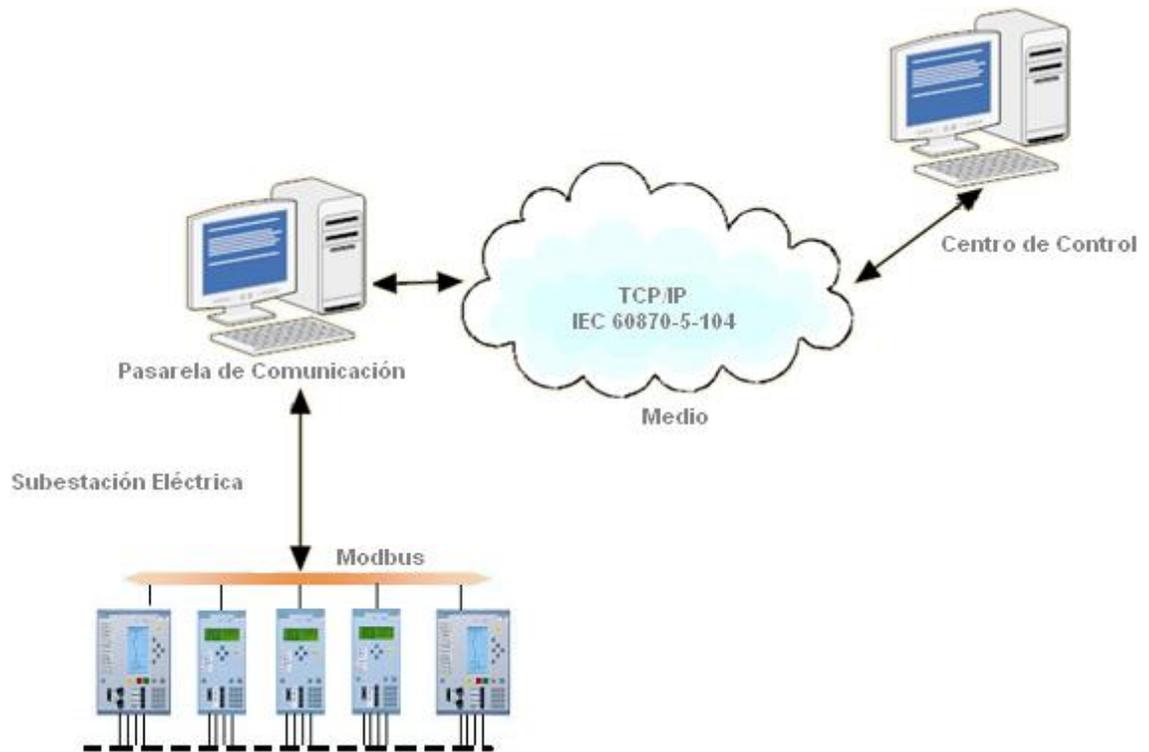


Figura 7. Contexto de pasarela de comunicación

Es realmente importante para el centro de control conocer el momento preciso en el cual se generó un evento en las subestaciones, esto para hacer una adecuada gestión de la red eléctrica. Dado que es inevitable la latencia en el canal de comunicación, los eventos vienen marcados con estampas de tiempo indicando el instante en el cual se presentó. Las pasarelas de comunicación comerciales revisadas en el presente trabajo, estampan los eventos generados en los dispositivos de campo una vez estos llegan a la pasarela, sin tener en cuenta los retardos de comunicación entre los dispositivos de campo y la pasarela.

Entre las empresas que han desarrollado hardware buscando garantizar la interoperabilidad de sistemas que cuentan con protocolos de comunicación no compatibles tal como Modbus e IEC60870-5-104, está la empresa española *Sica S.A*, quienes han desarrollado una pasarela de comunicación que permite el intercambio de información entre los protocolos de telecontrol IEC 60870-5-101, -104 y protocolos de campo como Profibus, Ethernet y Modbus a través de un servidor OPC de *Simatic Net* [35]. *SCADA Data Gateway* es la herramienta de la empresa *Triangle MicroWorks* que cumple con las funciones de cliente/Servidor OPC, traductor de protocolos y concentrador de datos que al igual que la pasarela *Sica* soporta su funcionamiento a través de la implementación de clientes y servidores OPC [36].

Así mismo, *ProLinx* es una pasarela de comunicación desarrollada por *Prosoft Technology*, a la que se le puede adaptar el módulo *104S-MCM* para la integración de dispositivos IEC 104 y Modbus [37]. En este se ha definido una base de datos interna para el almacenamiento e intercambio de datos de aplicación, información de estados y de configuración de los dispositivos conectados. Entre las funciones soportadas para dispositivos Modbus no se tienen en cuenta la lectura de eventos, estampas de tiempo ni calidad de la información.

3. ARQUITECTURA DE MEDIACIÓN EN UNA PASARELA DE COMUNICACIÓN

Para comunicar dispositivos con protocolos de comunicación diferentes, se debe definir una arquitectura de mediación entre dichos protocolos que permita obtener de manera fiable y con la menor pérdida posible en la precisión de los datos en el tránsito de información de una red a otra.

El deseo de la definición de una arquitectura de comunicaciones para el sector eléctrico ha sido abordado desde hace unos años, en principio por el EPRI (*Electric Power Research Institute*) [38] al proponer el UCA (*Utility Communications Architecture*) [39], una definición de arquitectura de comunicaciones para el sector eléctrico, tratando así de buscar un consenso en la industria para la integración de protección, control y adquisición de datos desde las subestaciones. El trabajo conjunto de la EPRI con en IEC llevó a la definición del estándar internacional IEC61850.

La arquitectura de mediación debe tener presente el sector industrial al cual va dirigido, los requerimientos que este tiene y las potencialidades y restricciones que plantean los protocolos de comunicación que hacen parte de la pasarela, además de la arquitectura software en la cual basarse.

En esta sección se describe la arquitectura propuesta para mediar entre los protocolos Modbus e IEC 60870-5-104 para el sector eléctrico.

3.1. Arquitectura Software

Entre las variadas definiciones de arquitectura software, una de las que cuenta con mayor aceptación es la dada en IEEE 1471-2000, donde dice:

“La Arquitectura de Software es la organización fundamental de un sistema encarnada en sus componentes, las relaciones entre ellos y el ambiente y los principios que orientan su diseño y evolución”.

En estilos arquitectónicos se han definido algunos como la arquitectura basada en eventos, en donde se lanzan eventos y los componentes receptores pueden asociarlos a procedimientos [40]. La arquitectura en pizarra, la cual se basa en una estructura central de datos con su estado actual; presenta un conjunto de componentes independientes que operan alrededor de dicha central de datos [41]. La arquitectura cliente-servidor es una arquitectura distribuida que proporciona una infraestructura basada en mensajes, en servicios demandados por clientes y ofertados por servidores [42]. Generalmente las aplicaciones reales utilizan diferentes estilos arquitectónicos a la hora de la implementación; este estilo se conoce como heterogéneo, dado los múltiples estilos utilizados [40].

Dado el funcionamiento de los protocolos de comunicación Modbus e IEC 104, para el presente trabajo se pensó en una arquitectura heterogénea como la mostrada en la Figura 8, para la mediación entre estos. El sistema de comunicación entre un Scada y dispositivos de campo a través de la pasarela de comunicación se puede modelar como un sistema distribuido cliente-servidor. La pasarela de comunicación presenta un comportamiento particular donde se comporta como cliente en algunos casos y como servidor en otros. Puesto que IEC 60870-5-104 es un protocolo de telecontrol que transmite información basado en eventos, la arquitectura presenta un estilo basado en eventos para el módulo de procesamiento de este protocolo. Por ser Modbus un protocolo de pregunta – respuesta, se escogió una arquitectura con estilo distribuido (cliente - servidor) para el módulo de comunicación Modbus.

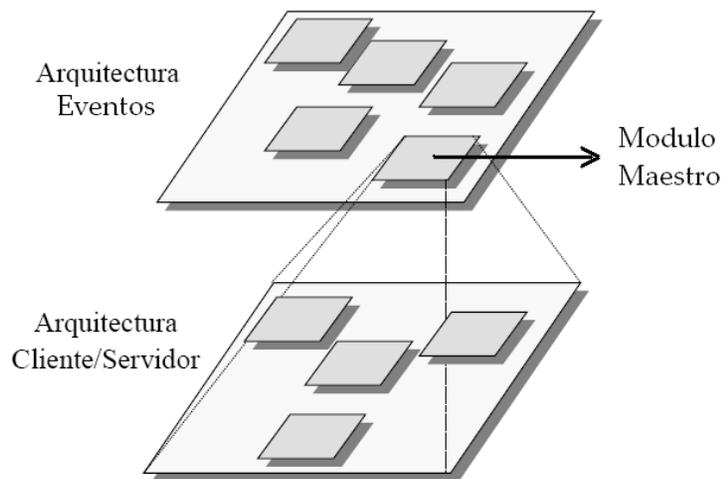


Figura 8. Estilo arquitectónico propuesto para pasarela de comunicación.

3.2. Modelo en Bloques

El contexto en el cual se hace necesaria una pasarela de comunicación y con esto una arquitectura que medie entre dos protocolos de comunicación, se presenta de manera mas clara por medio de modelos en bloques como los mostrados en las secciones siguientes.

3.2.1. Maestro - Esclavo

Un sistema de automatización típico en el sector eléctrico consiste de un sistema Scada localizado en un centro de control, el cual es conectado a dispositivos ubicados en las subestaciones. El Scada regularmente encuesta los dispositivos para conocer su estado, además, los operadores lo utilizan para desarrollar funciones de control en un dispositivo seleccionado.

Tal como se muestra en la Figura 9, el sistema de control que inicializa la adquisición de datos y las acciones de control, es considerado como el dispositivo maestro del sistema. Los dispositivos de las subestaciones que responden a la adquisición de datos y desarrollan las acciones de control son considerados como dispositivos esclavos en el sistema.



Figura 9. Sistema Maestro – Esclavo

3.2.2. Pasarela de Comunicación en el Sistema de Automatización

Cuando una pasarela de comunicación es introducida a un sistema de automatización como en el caso mostrado en la Figura 10, este actúa como esclavo y como maestro. El sistema Scada interroga la pasarela y esta a su vez a los dispositivos de la subestación. Es así como la pasarela cumple el papel de esclavo frente al Scada pero desarrolla tareas de maestro con los dispositivos de la subestación.

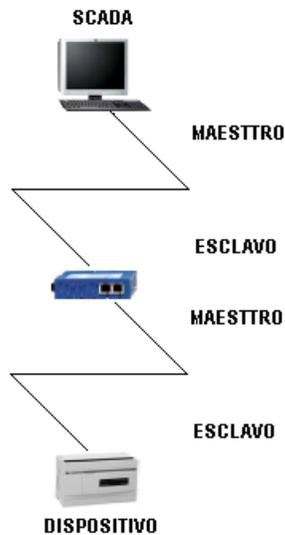


Figura 10. Pasarela como sistema maestro y esclavo

3.2.3. Bloques Internos

Los módulos internos de la pasarela de comunicación se encargan de implementar todas las funciones necesarias para la conversión de la información desde un protocolo a otro. Es así como los módulos asociados al perfil de esclavo de la pasarela, implementan todas las funciones para procesar todos los requerimientos recibidos desde un Scada o centro de control.

Los módulos del perfil maestro implementan las funciones necesarias para consultar a los dispositivos y enviarles requerimientos de control. Estos se encargan además de almacenar los datos que reciben de los dispositivos en una base de datos interna llamada Datos de Intercambio, tal como se muestra en la Figura 11.

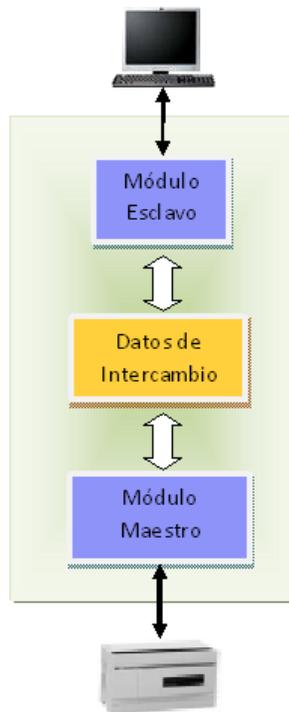


Figura 11. Base de Datos Interna

Esta base de datos almacena el valor actual de los datos de los dispositivos, así como otro tipo de información suministrada por los dispositivos o inferidos por la

pasarela, tal como la calidad de los datos y la estampa de tiempo.

3.2.4. Componentes de Comunicación

La pasarela de comunicación intercambia mensajes del centro de control y los dispositivos, sin embargo estos mensajes pueden ser transmitidos utilizando diferentes formatos, debido a los protocolos de comunicación seleccionados para el presente proyecto. El protocolo Modbus puede ser utilizado sobre una red TCP/IP o sobre un enlace serial RS-232, el protocolo IEC 60870-5-104 utiliza una conexión TCP/IP.

Por esta razón una pasarela de comunicación debe implementar las funciones requeridas para comunicarse con un dispositivo o un centro de control utilizando diferentes de tecnologías de comunicación. Estas funciones son las llamadas *Módulos de Comunicación Maestro y Esclavo*, tal como se muestra en la Figura 12.

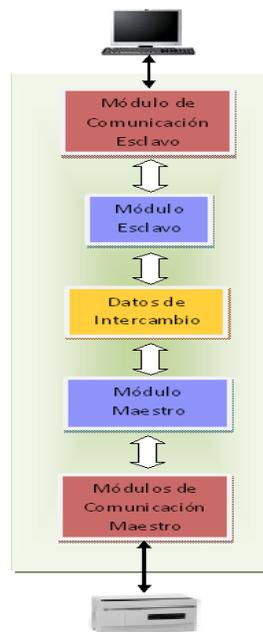


Figura 12. Componentes de Comunicación

3.2.5. Modelo en Bloques de la Arquitectura de Mediación

El diagrama de contexto para la arquitectura de mediación mostrado en la Figura 13, se determinó teniendo en cuenta los requerimientos necesarios para una pasarela de comunicación destinada al sector eléctrico, y los bloques propuestos están en capacidad de brindar la funcionalidad necesaria referente al accesibilidad de los datos, las herramientas de diseño y configuración, la fiabilidad, integridad y seguridad en los datos de los que se habla en el apartado 2.1.1.4 del presente trabajo. El módulo llamado *Módulos de Visualización* que permite la configuración de la pasarela de comunicaciones puede ser optimizado en trabajos futuros (bloque punteado), de modo que permita la visualización y posiblemente la edición remota de la información de la pasarela, por ejemplo, por medio de un servicio web.

Localmente como se observa en la Figura 13 se cuenta con los módulos *Traces* y *Logs*, los cuales permiten la visualización a los operarios locales del funcionamiento de la pasarela de comunicación. Estos módulos podrían ser enriquecidos para hacer un análisis automático de esta información por medio de herramientas de mantenimiento más elaboradas (conexión puntada).

Los módulos *comunicación maestro* y *comunicación esclavo* que se muestran en la Figura 13 contienen los driver de comunicación de los protocolos con los que cuenta la pasarela, en el presente trabajo son los drivers Modbus e IEC60870-5-104. La información entregada por estos módulos es llevada a los módulos *maestro* y *esclavo* que se encargan de tomar los objetos de información, propio de cada uno de los protocolos, y actualizar una variable genérica almacenada en la base de datos de intercambio, la cual es rastreada basados en la dirección del objeto de información que está relacionada a un identificador numérico interno de la variable.

Estos datos genéricos llamados metadatos, contienen además del identificador otra información relevante de los datos tal como: nombre, dirección, estado, calidad y tiempos. Esta información de los metadatos es obtenida desde la base de datos de intercambio para actualizar las variables asociadas en los dispositivos de campo y el centro de control. En este caso, nuevamente son los módulos esclavo y maestro los encargados de encapsular la información del metadato en el tipo de dato específico de los protocolos para que los módulos de comunicación transmitan en el formato adecuado la información actualizada. Para esto, cada vez que un metadato es actualizado, se genera un evento interno que activa al módulo esclavo o maestro según corresponda, para que este actualice a su vez el estado de los objetos de información asociados al metadato en los dispositivos de campo o en el centro de control.

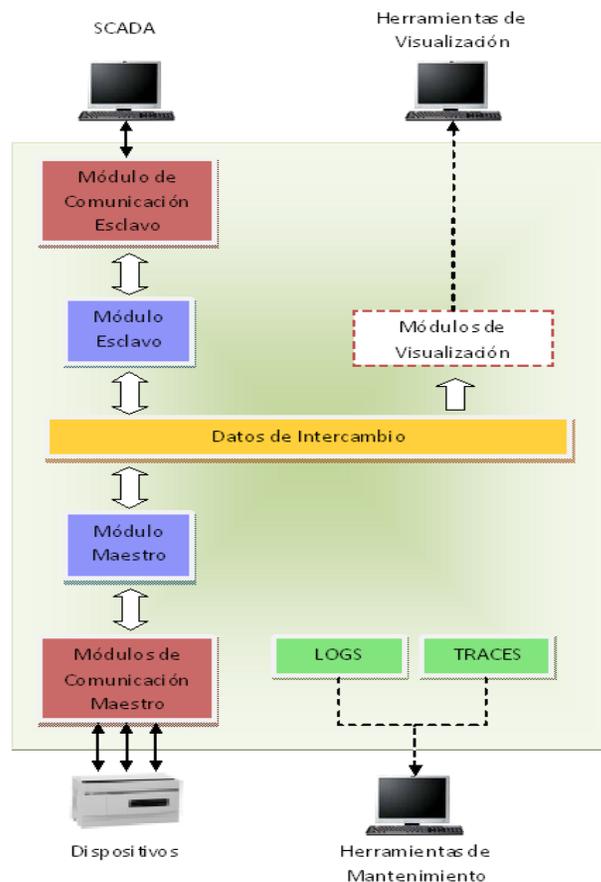


Figura 13. Diagrama de contexto de la Arquitectura de Mediación

3.3. Vista de Procesos

La pasarela de comunicación es un sistema que posee dos puntos de flujo de información, por uno de ellos fluye información codificada en un protocolo de comunicación A y por el otro extremo fluye la misma información pero codificada en un protocolo de comunicación B. Para este proyecto, los protocolos que trabaja la pasarela de comunicación son Modbus e IEC 60870-5-104, tal como lo muestra el diagrama de despliegue de la Figura 14. Allí también se observa que el dispositivo conectado a la pasarela de comunicación debe correr un servidor Modbus mientras que la pasarela corre un cliente Modbus, para lograr establecer la comunicación entre estos.

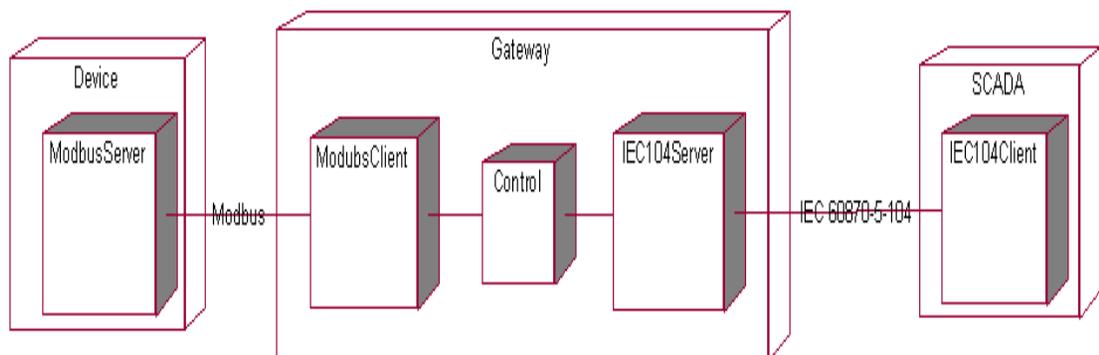


Figura 14. Diagrama de Despliegue

En el gateway mostrado en la Figura 14 hay un procesador llamado control, el cual tiene la tarea de gestionar la comunicación entre el Scada y los dispositivos. Dentro de este se encuentran procesadores internos para el registro de los eventos de la pasarela en una bitácora como archivo de texto y para visualizar las tramas de comunicación localmente.

Así como en los dispositivos hay un servidor Modbus corriendo, en el sistema Scada también debe correrse un módulo de comunicación, en ese caso debe ser

un cliente IEC 60870-5-104 para comunicarse con el servidor IEC104 de la pasarela de comunicación.

3.4. Vista Lógica

Esta vista permite entender el funcionamiento de las entradas, los controladores y las interfaces de la pasarela de comunicación. La vista lógica mostrada en la Figura 15 plantea un escenario en el que un dispositivo de campo transmite una comunicación a la pasarela de comunicación. Para esto, la pasarela cuenta con una interfaz Modbus la cual es monitoreada por un controlador para el mismo protocolo, quien basado en una definición de objetos particulares Modbus, se encarga de mapear la información a un objeto general, un metadato al que se pueden mapear los objetos de los protocolos trabajados en la pasarela, sin que esto signifique pérdida de información.

Ya con la información decodificada y mapeada en un metadato, el controlador general de la pasarela se encarga de activar la función necesaria en el controlador de comunicación IEC104, para que este mapee el metadato a un objeto IEC104 y lo transmita si es el caso hacia el Scada.

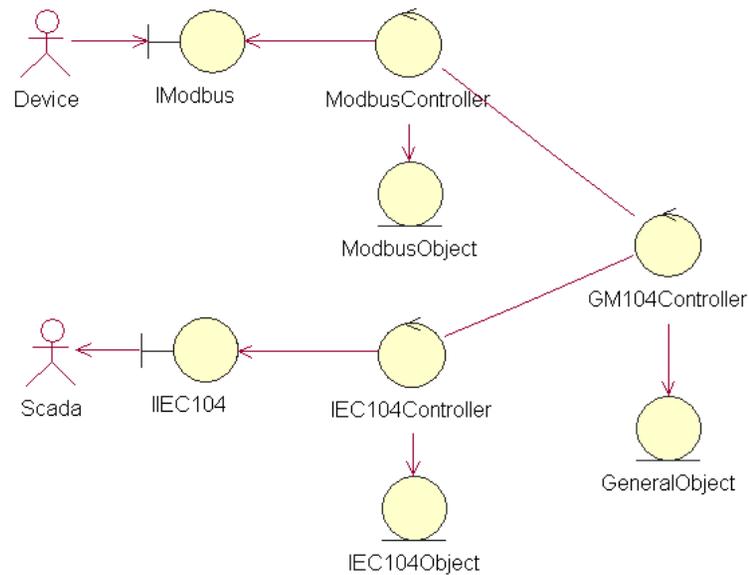


Figura 15. Vista Lógica

En el caso de la comunicación que se presenta desde el Scada hacia la pasarela de comunicación, esta última captura la información IEC60870-5-104 por medio del par interfaz y controlador IEC60870-5-104, quienes se encargan de decodificar el objeto IEC60870-5-104 y llevarlo luego a un metadato para que el controlador del sistema determine cuál es el requisito del Scada y el tipo de respuesta que debe activar, dando paso a bloques funcionales internos del controlador para que gestionen dicha tarea, y si es necesaria la comunicación con los dispositivos Modbus realizarla a través del controlador y la interfaz Modbus.

3.5. Diagramas de Caso de Uso

Para el sistema de automatización de una subestación eléctrica donde se cuenta con una pasarela de comunicación, se identifican tres actores externos a dicha pasarela, como se muestra en la Figura 16. El primero de ellos son los dispositivos de campo de la subestación eléctrica, en el caso del presente proyecto son los dispositivos Modbus. El segundo actor corresponde al Scada del centro de control o al cliente de la pasarela de comunicación. Por último se encuentra al

administrador de la pasarela de comunicación.

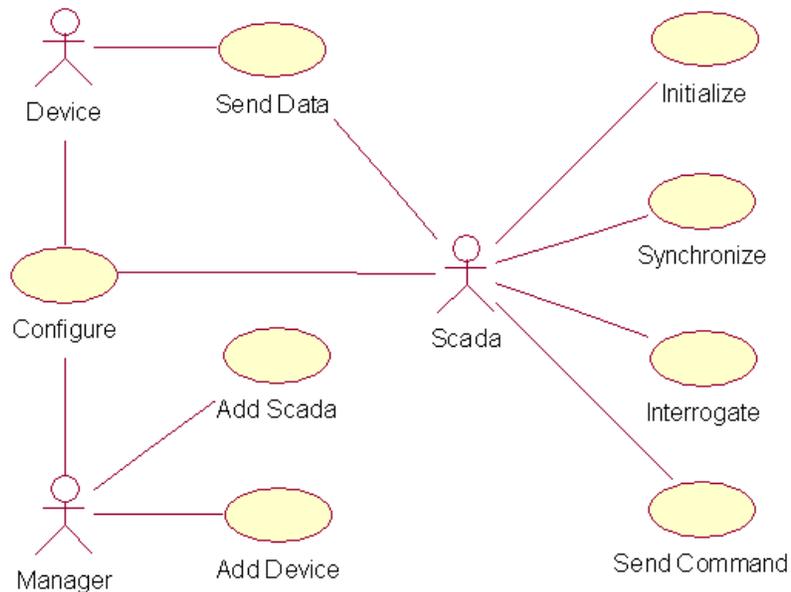


Figura 16. Diagrama de casos de uso general

Los dispositivos Modbus deben realizar una configuración para lograr conectarse al sistema de automatización. Estos también están en capacidad de enviar el estado de los objetos de información que tengan mapeados o de poder modificar dicho estado a partir de información recibida a través de la pasarela de comunicación.

El administrador de la pasarela de comunicación es el encargado de adicionar los dispositivos de campo y el Scada, para hacerlos visibles a la pasarela de comunicación, además debe configurarla de tal manera que se mapeen adecuadamente los objetos de información del protocolo Modbus en objetos IEC 60870-5-104.

El Scada ejecuta funciones tales como [43] inicialización, interrogación general, sincronización del reloj y el envío de información y de comandos a la subestación. La Figura 17 muestra los casos de uso de la pasarela de comunicaciones dentro

del sistema de automatización de la subestación eléctrica. Está en capacidad de recibir y enviar información, independiente del contenido de dicha información, es así como puede ser el estado de un objeto de información o un parámetro de configuración para el sistema.

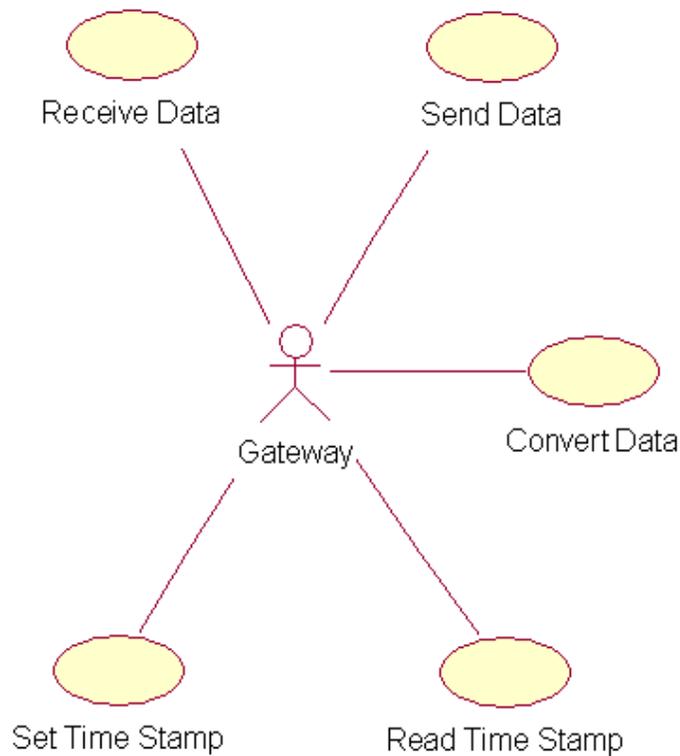


Figura 17. Diagrama de caso de uso de la pasarela de comunicación

La tarea central de la pasarela de comunicación se modeló como un caso de uso, esto es la conversión de información de objetos de información desde un modelo de datos de un protocolo de comunicación a otro, para el caso de este trabajo de grado, es entre IEC 60870-5-104 y Modbus.

Debido a la necesidad de exactitud con respecto al tiempo en que se genera un evento en las subestaciones eléctricas, en el presente trabajo se adicionó un caso de uso a la pasarela de comunicación, con el cual se captura la estampa de tiempo que indica el momento exacto en el cual se generó dicho evento en la

subestación eléctrica. Como no necesariamente los dispositivos Modbus estarán en capacidad de generar la estampa de tiempo, o se puede presentar un error en la lectura de dicha estampa, se definió el caso donde la pasarela de comunicación es quien fija esta marca de tiempo.

3.6. Diagrama de Componentes

La arquitectura propuesta es descrita por medio de un diagrama de componentes tal como se puede observar en la Figura 18. Estos componentes son descritos a continuación.

Inicialmente se propone un paquete por cada protocolo de comunicación involucrado en la pasarela para el procesamiento y codificación de la información tal como lo indica la Figura 18. Para el presente trabajo de grado, se cuenta con paquetes de procesamiento para el protocolo de comunicación industrial Modbus, a la que se ha llamado con el mismo nombre del protocolo y uno más para el protocolo de telecontrol IEC 60870-5-104, al que se le ha denominado *IEC104*. Estos son los encargados del establecimiento de la conexión de la pasarela de comunicación con los dispositivos de campo y con el centro de control.

Los paquetes de procesamiento de los protocolos son utilizados por un componente llamado *Communication*, el cual se encarga de decodificar las comunicaciones haciendo uso de los paquetes antes descritos y llevarlas hacia la definición de un metadato o viceversa, utilizando el paquete llamado *DataModel*, también visto en la Figura 18.

El paquete de comunicaciones es a su vez utilizado por el paquete de *Control*, quien toma los datos decodificados y los analiza para determinar la acción que se debe realizar.

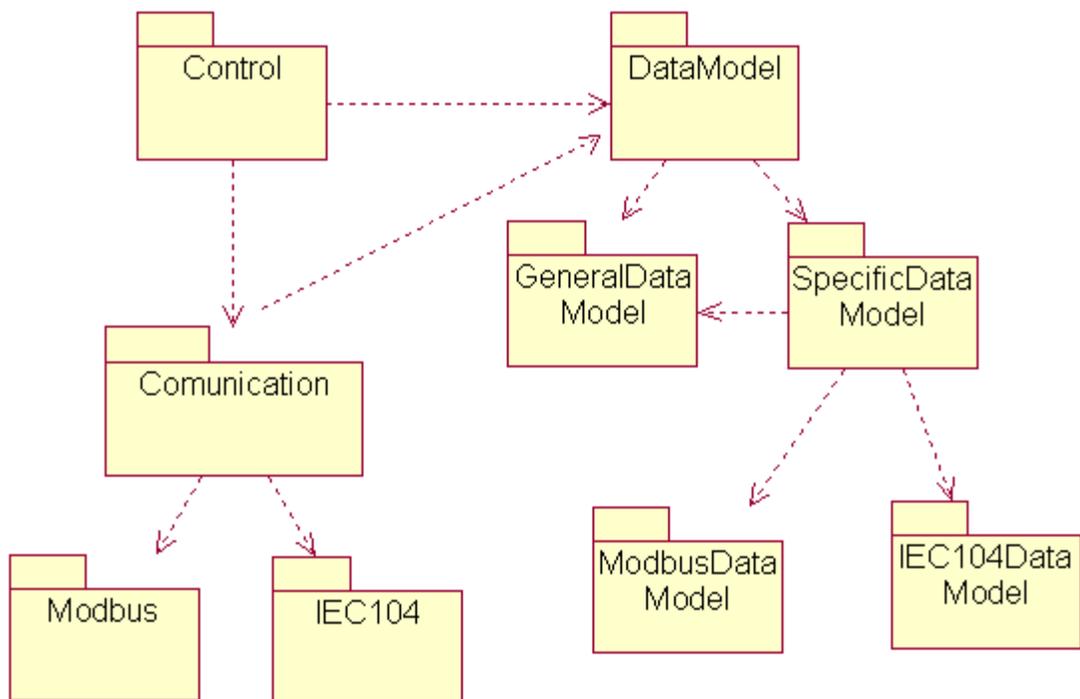


Figura 18. Diagrama de componentes

El paquete *DataModel* utiliza un par de paquetes llamados *GeneralDataModel* y *SpecificDataModel* para el mapeo de datos de un protocolo de comunicación a otro. Para esto, todo dato de información que ingrese a la pasarela de comunicación debe ser mapeado como un metadato, esto en el paquete *GeneralDataModel*. Posteriormente esta información es transformada a un modelo específico de dato en el paquete *SpecificDataModel* para su tránsito por la pasarela de comunicación.

Cada protocolo de comunicación con el que cuente la pasarela, deberá tener definido un modelo de datos, tal como los paquetes *ModbusDataModel* e *IEC104DataModel*, que hacen referencia a dichos modelos para los protocolos Modbus e IEC 60870-5-104 respectivamente, los cuales son utilizados por el paquete *SpecificDataModel*.

De esta manera, si se desea la inclusión de un nuevo protocolo de comunicación en la pasarela, se debe agregar un paquete para el procesamiento del protocolo y uno más con la definición del modelo de datos.

3.7. Diagramas de Secuencia

El diagrama dinámico mostrado en la Figura 19, representa la secuencia seguida por el sistema para el tránsito de información desde un dispositivo Modbus hacia el sistema Scada.

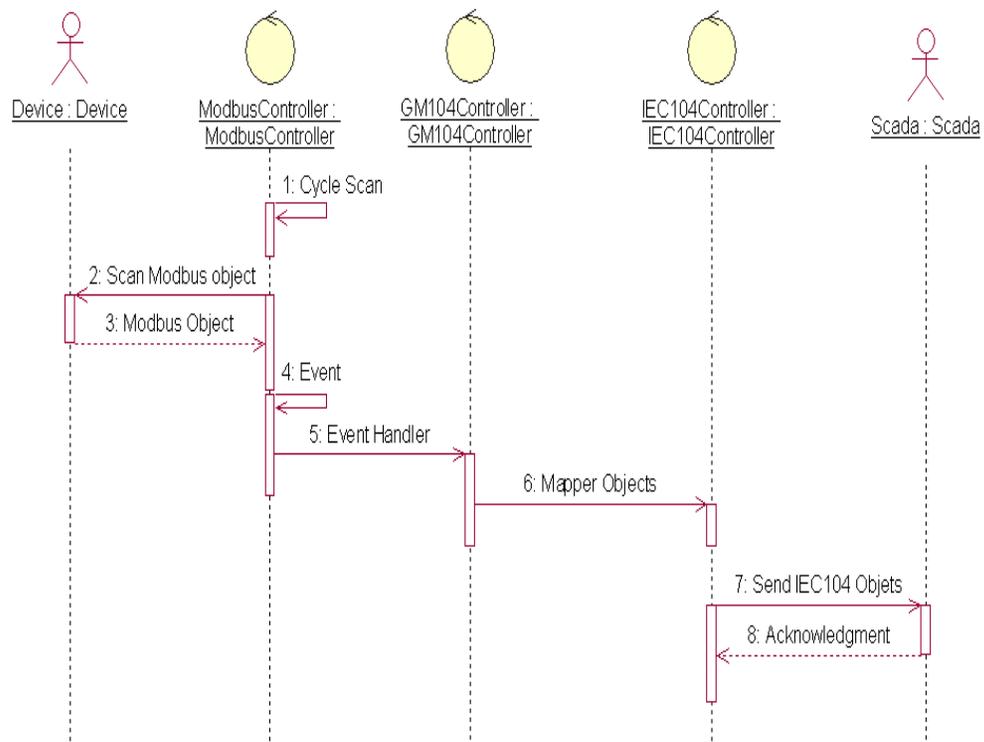


Figura 19. Diagrama de secuencia para transmisión de información desde un dispositivo Modbus.

Este tránsito de información inicia cuando se cumple el ciclo de escaneo del dispositivo Modbus y la pasarela de comunicación encuesta el estado de los objetos de información.

Una vez la pasarela tiene la información del estado de los objetos Modbus, verifica si los objetos han cambiado de valor, si es así, se genera un evento por cada objeto que haya cambiado de valor. Este evento es enviado al controlador principal de la pasarela, quien se encarga de llevarlo hasta el controlador IEC104 para que lo envíe hacia el sistema Scada, quien debe reconocer la recepción de la información.

Otro escenario es el mostrado en la Figura 20, donde el sistema Scada envía información para fijar el *set point* de una variable a un dispositivo de la subestación eléctrica a través de la pasarela de comunicación.

Aquí, el controlador de la pasarela para el protocolo IEC 60870-5-104 desempaqueta la información enviada por el Scada, para que el control general la procese y encargue al controlador Modbus del envío de esta consigna al dispositivo indicado.

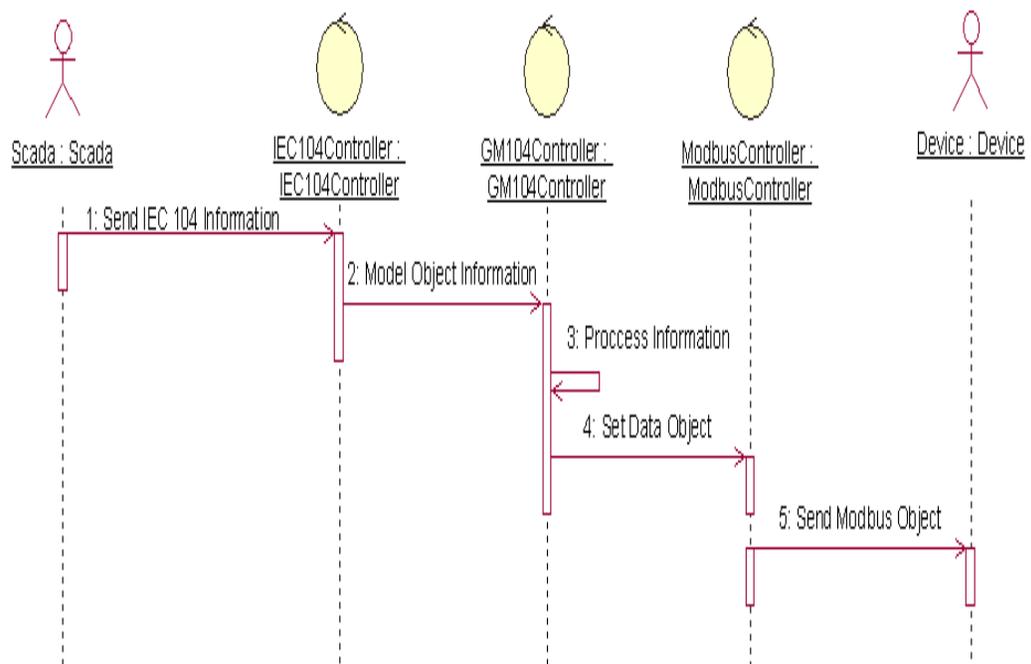


Figura 20. Diagrama de secuencia para transmisión de información desde el SCADA

3.8. Modelo en Red de Petri Coloreada

Las redes de Petri [44] han sido ampliamente utilizadas en el modelado de sistemas cuyo comportamiento es guiado por un patrón de reglas complejas como es el caso de los sistemas software. Las PN (Petri Nets) también llamadas redes de Petri clásicas son una herramienta gráfica que provee un método unificado para el diseño de sistemas a eventos discretos [45], estas tienen dos tipos de nodos: lugares y transiciones. Mediante círculos se representan los lugares y mediante rectángulos las transiciones. Tanto los lugares como las transiciones permiten anotaciones para modelar estáticamente el sistema; de otro lado, a los lugares se les puede adicionar marcas para modelarlo dinámicamente [46]. Típicamente los lugares corresponden con estados o condiciones y las transiciones con eventos del sistema modelado.

Entre los diferentes tipos de redes de petri están las coloreadas (CPN) cuya principal característica es que las marcas ubicadas en los lugares son de un tipo determinado. Este tipo de red presenta un mayor potencial de modelado que las redes de petri clásicas, y presenta modelos más compactos que su equivalente en las PN [47].

Se modeló la arquitectura de mediación propuesta como una CPN por dos razones fundamentales: los requisitos del software actúan como un patrón complejo de reglas que refleja aspectos estáticos y dinámicos del sistema [48], estos se pueden modelar con redes de petri coloreadas [49].

Las CPN ofrecen un sólido soporte formal y se han utilizado con éxito en el modelado de diferentes productos del ciclo de vida del software [47].

CPNTools es una herramienta de edición, simulación y análisis de redes de petri coloreadas desarrollada en la universidad de Aarhus en Dinamarca [50], presenta las características necesarias para la elaboración del modelo en CPN de la

arquitectura de mediación propuesta en el este trabajo.

En la Figura 21 se presenta una visión general y simple del comportamiento de la arquitectura de mediación. El centro de control y los dispositivos Modbus han sido modelados como lugares, cada uno con una definición diferente; PROCxDATA para el centro de control y FUNT_MODBUS para los dispositivos Modbus, esto porque los datos y la forma de comunicación son diferentes. Las definiciones de los tipos de lugares y marcas son mostrados en la Figura 22. Allí se observan las declaraciones de variables y constantes utilizadas para la realización del modelo en CPN.



Figura 21. Escenario para pasarela de comunicación. CPN

A la transición llamada GATEWAY que aparece en el primer modelo de la CPN y que es mostrado en la Figura 21 se le aplicó el principio de transición de sustitución y su representación aparece en la Figura 23, como una subpágina del modelo principal mostrado en la Figura 21. Esto permite tener dos visiones del sistema modelado, el primero corresponde una vista general (centro de control – dispositivos) tal como está en la Figura 21 y una vista del funcionamiento interno de la arquitectura de mediación como se ilustra en la Figura 23.

```
▼ GM104_4.cpn
  Step: 0
  Time: 0
  ▶ Options
  ▶ History
  ▼ Declarations
    ▶ Standard declarations
    ▼ My Declarations
      ▼ colset DATA = product STRING * INT;
      ▼ colset FUNTION = product STRING * DATA;
      ▼ colset FUNT_MODBUS = product STRING * DATA;
      ▼ colset PROCxDATA = product STRING * FUNTION;
      ▼ colset LIST = STRING;
      ▼ var p,t,adr,dir:STRING;
      ▼ var f:FUNTION;
      ▼ var v,c,s:INT;
      ▼ var da:DATA;
      ▼ val test = "test_config";
      ▼ val cmd = "cmd";
      ▼ val iec = "iec";
      ▼ val modb = "mod";
      ▼ val value = "val";
    ▼ Monitors
    ▼ GM104
      GATEWAY
```

Figura 22. Declaración de variables en la CPN.

En el modelo de la arquitectura mostrado en la Figura 23 se identifican cuatro bloques principales, el primero de ellos (A) corresponde al módulo de comunicación IEC 104 de la pasarela. Las marcas de tipo PROCxDATA indican el protocolo de comunicación IEC104, el procedimiento que se desea realizar y los datos involucrados en dicho procedimiento. En este módulo se hace uso interno de la definición del modelo específico de datos IEC104 mencionado en el diagrama de componentes en la sección 3.6, puesto que la información que llega desde el centro de control es mapeada como metadato para el tránsito a través de la pasarela.

El bloque C corresponde al módulo de comunicación Modbus de la pasarela. Las marcas intercambiadas aquí son de tipo FUNT_MODBUS, donde se indica el protocolo de comunicación, la dirección de la variable y el valor. El lugar llamado SCAN es el encargado de realizar las lecturas periódicas de la información Modbus de acuerdo a los tiempos de escaneo definidos en la pasarela.

El bloque D, con el lugar llamado EVENT y el arco de entrada a este lugar es el encargado de determinar los eventos que se han generado en los dispositivos Modbus y que deben ser transmitidos hacia el centro de control. Para esto compara el valor almacenado en la base de datos interna de la pasarela y el valor leído desde los dispositivos.

El bloque B es el control central de la aplicación, quien se encarga de gestionar la información que circula por la pasarela de comunicación. Es así como ante un requerimiento del centro de control, en este bloque se discierne el tipo de función que se debe realizar, diferenciando si es de configuración o de prueba de la conexión, el requerimiento del valor de una variable o el envío de un comando hacia un dispositivo Modbus.

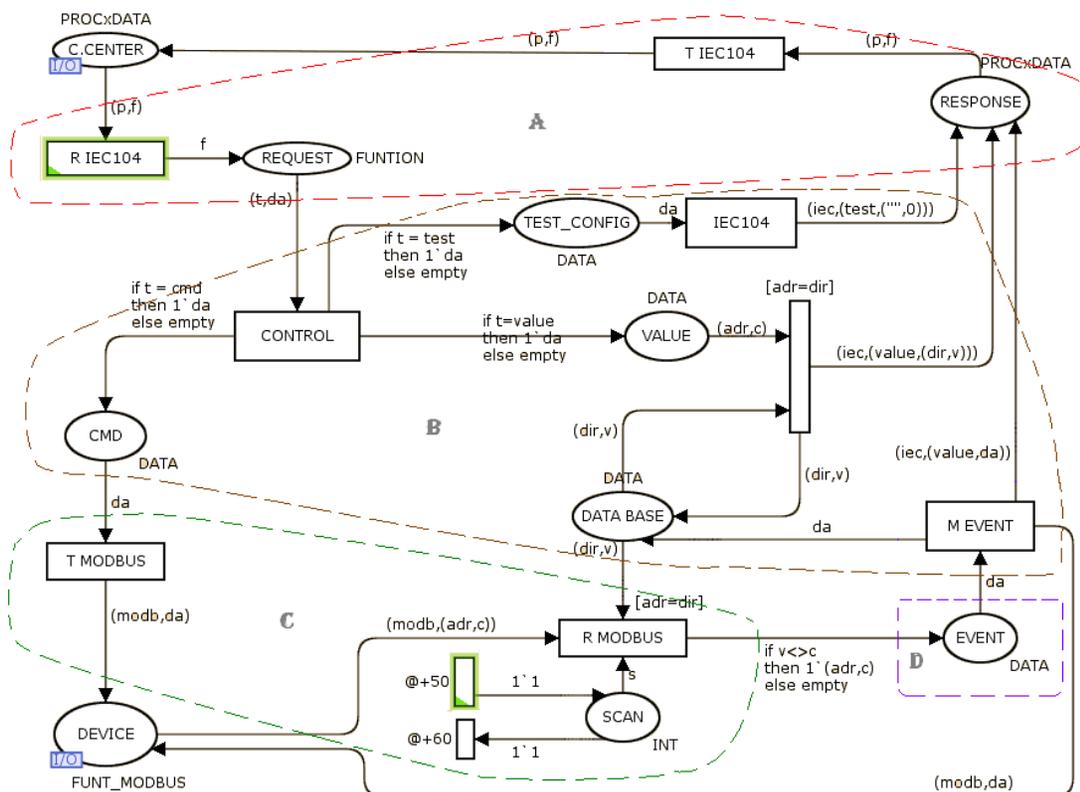


Figura 23. Modelo en CPN de arquitectura de mediación. Gateway

En la Figura 24 se muestra una simulación del funcionamiento de la pasarela de

comunicación modelada en una red de petri coloreada. Para este ejemplo, se han definido los objetos A, B y C y el comando cmd en el dispositivo Modbus. Estos mismo objetos han sido definidos en el centro de control, donde las marcas además tienen definido el tipo de procedimiento que se desea realizar cuando cada marca es transmitida hasta la GATEWAY. En este ejemplo, el centro de control ha solicitado el valor de la variable “B”, el módulo de control extrae el valor de esta variable desde la base de datos interna y lo envía hacia el centro de control.

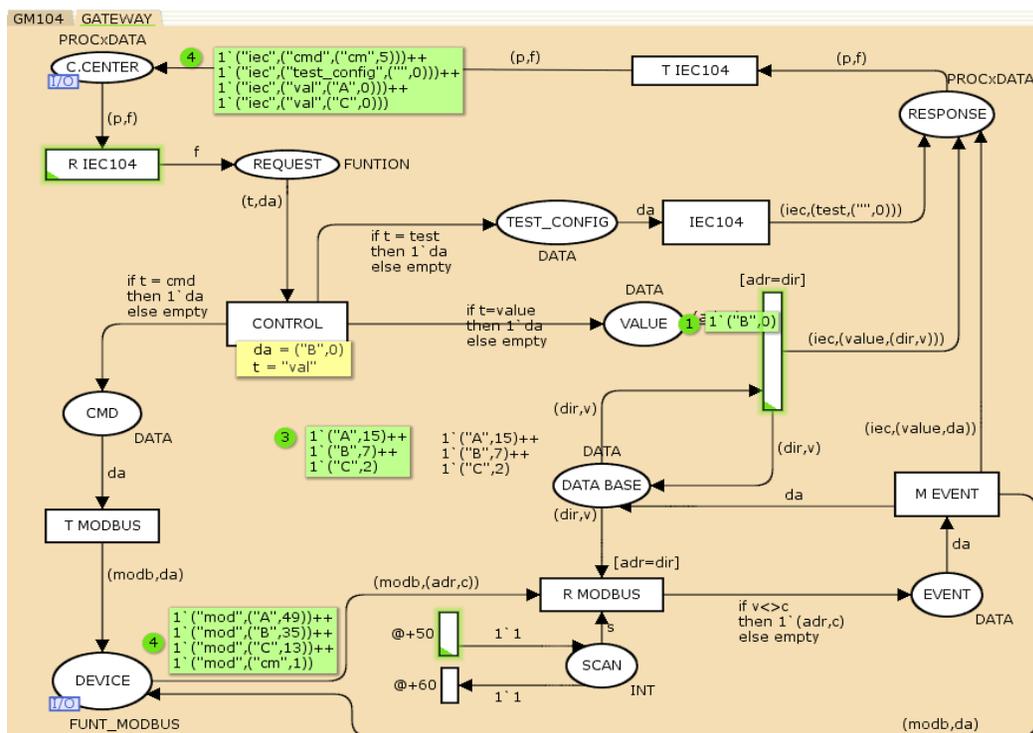


Figura 24. Simulación CPN

De esta manera se puede verificar el funcionamiento del modelo teniendo en cuenta los requerimientos estáticos y dinámicos de la pasarela de comunicación. Además se puede por medio de este único modelo en CPN verificar el funcionamiento de los diferentes casos de uso y escenarios planteados con el modelo en UML.

4. CASO DE ESTUDIO: GM104

Con el propósito de validar la arquitectura de mediación propuesta en el capítulo 3 de este trabajo, se implementó una pasarela de comunicación entre Modbus e IEC 60870-5-104 que se soporta en la arquitectura de mediación propuesta. Esta pasarela de comunicación cumple con los requerimientos de accesibilidad y fiabilidad en la transmisión de datos, necesarios en la automatización de una subestación eléctrica donde los dispositivos de campo estén conectados a una red Modbus y el centro de control que supervisa la subestación implemente el protocolo de telecontrol IEC 60870-5-104. La pasarela de comunicación fue denominada *GM104* (Del inglés *Gateway Modbus IEC 60870-5-104*, Pasarela Modbus IEC 60870-5-104).

4.1. Requerimientos para una pasarela de comunicación eléctrica

La arquitectura sobre la cual se soporta la pasarela de comunicación denominada GM104 cumple a cabalidad, gracias al diseño de cada uno de sus componentes, los requerimientos para la automatización de una subestación de energía eléctrica, mencionados en el apartado 2.1.1.4. Además, tiene una arquitectura abierta que permite adicionar nuevos protocolos, dispositivos, redes de área local y redes de área amplia. A continuación se mencionan algunos de los principales requerimientos de una pasarela de comunicación para el sector eléctrico.

4.1.1. Tiempo de respuesta

Para que el centro de control pueda realizar las funciones de gestión y automatización de la red eléctrica, es necesario que conozca el estado actual de las subestaciones; para esto se requiere que el tiempo de procesamiento y

trasmisión de datos en un dispositivo intermedio entre el centro de control y la subestación, tal como una pasarela de comunicación, sea del orden de los milisegundos [39]. Este tiempo se puede ver afectado por la definición de un periodo grande para realizar el ciclo de escaneo a los dispositivos Modbus desde la pasarela de comunicación, puesto que ante la generación de un evento en dichos dispositivos, estos serán reportados a la pasarela solamente hasta el siguiente ciclo de escaneo y en consecuencia se retrasa el reporte hacia el centro de control.

4.1.2. Datos con estampa de tiempo

Como es inevitable la latencia en los canales de comunicación, se requiere que ciertas señales críticas lleven estampado de tiempo que indique el momento exacto en el cual ha cambiado el estado una variable.

Para confiar en las estampas de tiempo es necesario que el centro de control sincronice el reloj interno de las subestaciones, de otra forma, se pueden presentar confusiones [51]. Una estampa de tiempo en el protocolo IEC 60870-5-104 cuenta con la siguiente información: año, mes, si es tiempo de verano, día del mes, día de la semana, hora, minuto y milisegundos. Esta última variable puede alcanzar un valor de 59999 milisegundos, con lo cual se hace la equivalencia de los segundos en milisegundos. También incluye un campo para especificar la calidad de la estampa, determinando si es un tiempo válido o inválido, la cual puede verse afectada por lecturas incorrectas de la estampa de tiempo.

4.1.3. Acceso a Datos

Una pasarela de comunicación para el sector eléctrico debe ofrecer diferentes alternativas para la actualización de la información en el centro de control. Así como la subestación eléctrica envía información, esta también debe recibir

órdenes de control, las cuales deben ser procesadas y en algunos casos ejecutadas por la pasarela de comunicación.

4.2. Diseño

GM104 es el prototipo de una pasarela de comunicación entre Modbus y el protocolo IEC 60870-5-104. Cuenta con la funcionalidad necesaria para la supervisión y el control de una subestación eléctrica desde un centro de control, comunicados con el protocolo de telecontrol IEC 60870-5-104.

Entre estas funciones requeridas por las pasarelas de comunicación que soportan el protocolo IEC60870-5-104, y que han sido implementadas en GM104, se encuentran:

- Inicialización de la subestación: Función que permite iniciar el funcionamiento de la subestación, durante la cual se puede o no dar la carga de los parámetros de configuración.
- Sincronización de reloj: El centro de control puede por medio de esta función propia del protocolo IEC 60870-5-104, sincroniza el reloj interno de la GM104. El gateway de comunicación de la empresa *Cybetec* utiliza la definición del código de tiempo IRIG-B (*Inter Range Instrumentation Group*) [52] para la sincronización del Gateway desde un GPS.
- Adquisición de datos por encuesta: Permite al centro de control conocer el estado de un objeto de información de tipo comando definido en la subestación eléctrica.
- Transmisión cíclica de datos: El administrador del GM104 puede definir algunos objetos de información, para que su estado sea reportado periódicamente al centro de control, aunque dicho estado no haya cambiado con respecto al último reporte.
- Adquisición de eventos: El cambio en una de las variables definidas en la

pasarela de comunicación es reportada al centro de control como un evento. Adicionalmente, en la implementación del GM104 se creó un módulo software para la lectura de eventos directamente reportados por los dispositivos Modbus.

- Interrogación general: GM104 envía el estado, la calidad de los datos y las estampas de tiempo definidas por el administrador, cuando el centro de control realice una interrogación general. También puede responder con una selección específica de datos.
- Transmisión de comandos: Para las tareas de control que realiza el centro de control sobre la subestación, en el GM104 se ha establecido la recepción de comandos, como está definido en las especificaciones de la norma IEC 60870-5-5. Estos comandos son procesados en la pasarela para su ejecución en los dispositivos Modbus.
- Interrogación de contadores: Similar a la interrogación general, hay un tipo de interrogación con la cual el centro de control indaga sobre el estado de contadores de la pasarela de comunicación. También puede ser selectiva y está definido en la petición hecha desde el centro de control.

4.3. Implementación

La comunicación Modbus con los dispositivos de campo se facilitó debido a que se modificó una librería llamada nModbus [53], esta hace parte de un proyecto de software libre con desarrollo en C#. Implementa las variaciones RTU, ASCII y TCP/IP de este protocolo. Esta librería fue modificada adicionándole un nuevo módulo software para gestionar la lectura y la escritura de la estampa de tiempo.

El módulo de lectura de la marca de tiempo se trabajó basado en la definición hecha en la norma ISO8601 [54], la cual tiene una notación totalmente numérica *big-endian* [55], esto facilita su lectura desde los dispositivos Modbus.

Igualmente se permite la edición de la estampa de tiempo al definir los campos que esta tiene, por ejemplo, se puede definir que el GM104 lea desde un dispositivo x la estampa de tiempo con solamente tres campos, los cuales corresponderían a las horas, minutos y milisegundos; para esto, el GM104 configura el año, mes y el día para completar los campos necesarios. Esto se hace para facilitar la programación de los dispositivos Modbus, confiando en que se ha sincronizado correctamente el GM104 por parte del centro de control. Es de aclarar que los milisegundos tienen un rango desde 0 hasta 59999, con lo cual se cubren los segundos. Así mismo se encuentran algunas definiciones para estampas de tiempo, tal como la hora universal UNIX [56] o la definida en las normas IEC 60870-5, las cuales podrían ofrecer otro tipo de formato para leer marcas de tiempo en dispositivos Modbus.

La implementación de la librería IEC 60870-5-104 se hizo en C# basándose en la estructura del nModbus, con esto se trató de aprovechar la experiencia y las pruebas realizada a esta última, además la estructura modular facilitaría la implementación de un cliente IEC 60870-5-104 o del protocolo IEC 60870-5-101. Se elaboraron módulos para el manejo de las funciones básicas especificadas en la norma IEC 104, las cuales permiten la comunicación con dispositivos IEC 104 de tipo cliente, tal como los centros de control.

Para la comunicación con los dispositivos Modbus, la pasarela de comunicación GM104 tiene implementados procedimientos para la lectura y escritura de datos binarios y analógicos. Con estas funciones básicas es suficiente para la conexión entre la pasarela de comunicación y los dispositivos Modbus.

Dado la importancia de la transmisión de la información en el momento adecuado, la aplicación ha sido implementada de manera que da prevalencia a los módulos de control de la aplicación, relegando a un segundo plano la visualización local de la información.

4.3.1 Modelo Entidad-Relación

En la implementación de la arquitectura de mediación se elaboró un modelo entidad relación como se puede observar en la Figura 25. Allí se muestra la interacción de los objetos definidos en este desarrollo, además, modela e implementa la base de datos interna de la aplicación.

Una de las entidades definidas en este modelo entidad relación es la llamada *MetaTag*. Contiene los atributos necesarios para instanciar objetos de tipo IEC60870-5- 104 y Modbus, además de atributos que ayudan a la edición de estas variables, tales como nombre y descripciones.

Con la entidad *QualityDescriptor* se instancian objetos con la definición de la calidad de una *metaTag*.

Timestamp modela estampas de tiempo asociadas a *metaTags*, incluyendo atributos que indican la validez de la estampa y otro para conocer si el tiempo corresponde a horario de verano.

Tagset permite definir los grupos de variables Modbus, esto es, grupos de lectura a un determinado periodo o comandos con un tipo de salida determinado.

La entidad *Communication* instancia los diferentes tipos de comunicación que soporta la pasarela, en este caso Modbus e IEC60870-5-104. Una instancia de la entidad *Device* corresponde a uno de los dispositivos conectados a la pasarela de comunicación. Para el presente desarrollo únicamente se permite un dispositivo de tipo IEC60870-5-104 y 63 Modbus, es decir, un centro de control y 63 dispositivos esclavos de tipo Modbus.

ComProperty es el modelo de cada una de las propiedades asociadas a los

dispositivos de la pasarela de comunicación.

EventModbus permite la instanciación de eventos de tipo Modbus, puesto que estos no se modelaron como una *MetaTag* convencional.

Por último está la entidad *Project* la que permite guardar y recuperar la información de los proyectos elaborados con el GM104.

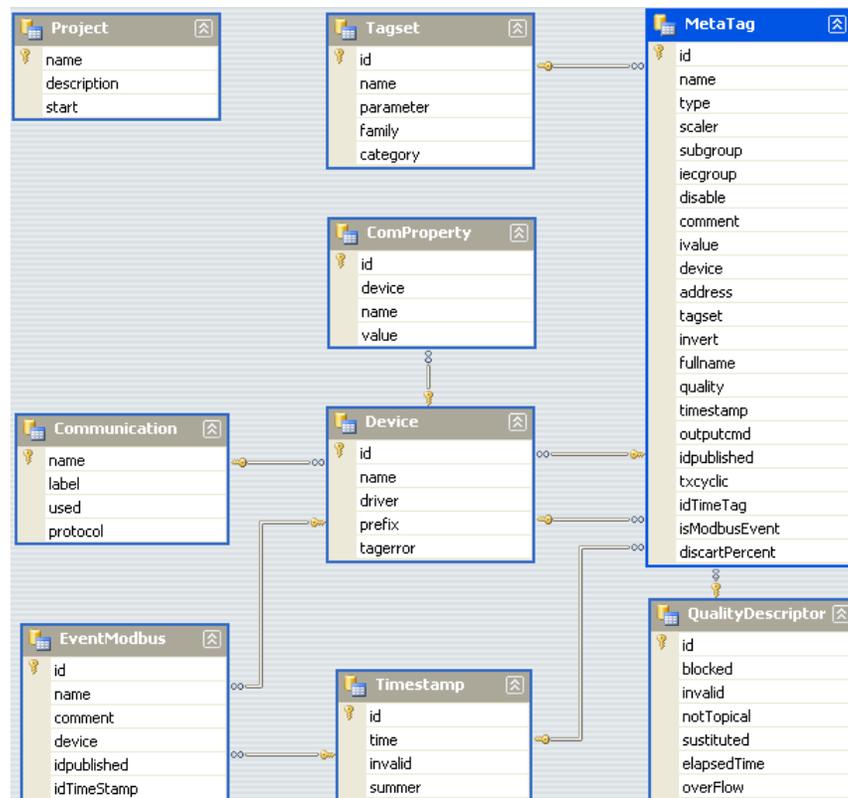


Figura 25. Modelo entidad relación

4.3.2 Mapeo de información entre protocolos Modbus e IEC60870-5-104

Dado que el protocolo Modbus permite definir bloques de información para la definición de un dato, se puede a partir de registros y bits la representación de diferentes tipos de variables. Por ejemplo, se pueden representar variables de tipo

doble (conjunto de 2 bits) utilizando dos *coils*, o variables en punto flotante corto (formado por 4 bytes) utilizando dos registros. Fue así como se soportó al manejo de tipos de datos no incluidos directamente en el protocolo Modbus, buscando siempre no perder precisión en la conversión de los datos y preservar así su integridad.

En el presente trabajo se hizo corresponder tal como lo muestra la tabla 3 los datos definidos en el estándar IEC60870-5-104 con el tipo de variables soportadas en Modbus. Por ejemplo, un bit definido como *Single Command* es mapeado a registros de tipo *Coil* o *Input* de Modbus, los cuales permiten lectura y escritura.

Con los *Holding Register* y los *Input Register* se representan los valores analógicos. Por ejemplo valores enteros como la medida del valor escalizado del IEC60870-5-104 se mapean con un registro Modbus.

En GM104 están soportados los tipos de datos básicos definidos en el estándar IEC60870-5-104 para la comunicación entre las subestaciones y el centro de control, con esto fue suficiente para la validación de la arquitectura de mediación. Si posteriormente se desea enriquecer el paquete de datos soportados por GM104, se deben definir los bloques de datos y el tipo de variables Modbus requeridos para su representación. Los tipos no soportados son marcados en la tabla 3 por un guión.

IEC60870-5-104 \ Modbus	<i>Coil</i>	<i>Input</i>	<i>Holding Register</i>	<i>Input Register</i>
<i>Single Command</i>	X	X		
<i>Double Command</i>	X	X		
<i>Setpoint</i>			X	X
<i>Regulating step command</i>	-	-	-	-
<i>Single indication [1 Bit] with quality</i>	X	X		
<i>Single indication [1 Bit] with quality and time tag</i>	X	X		
<i>Double indication [2 bit] with quality</i>	X	X		

<i>Double indication [2 bit] with quality and time tag</i>	X	X		
<i>Measured scaled value with quality</i>			X	X
<i>Measured scaled value with quality and time tag</i>			X	X
<i>Measured normalized value with quality</i>			X	X
<i>Measured normalized value with quality and time tag</i>			X	X
<i>Measured floating point value with quality</i>			X	X
<i>Measured floating point value with quality and time tag</i>			X	X
<i>Bitpattern [32 bit] with quality</i>	-	-	-	-
<i>Bitpattern [32 bit] with quality and time tag</i>	-	-	-	-
<i>Counter value with quality</i>	-	-	-	-
<i>Counter value with quality and time tag</i>	-	-	-	-
<i>Step position value with quality</i>	-	-	-	-
<i>Step position value with quality and time tag</i>	-	-	-	-
<i>Event of protection equipment with quality and time tag</i>	-	-	-	-

Tabla 3. Correspondencia entre tipo de datos Modbus e IEC60870-5-104

Como se mencionó en el apartado 3.2.5 del presente documento, la conversión de la información entre los protocolos de comunicación se hace a través del mapeo de la información hacia un metadato. Para hacer claridad sobre la mediación entre los protocolos Modbus e IEC60870-5-104, a continuación se presentan tres escenarios donde se presenta el intercambio de comunicaciones entre un dispositivo Modbus en una subestación eléctrica y un centro de control. El primero consiste en el reporte de la actualización de una variable discreta sin estampa de tiempo al centro de control, mientras que el segundo consiste en la configuración de un *set point* de tipo entero desde el centro de control en un dispositivo de campo de la subestación eléctrica. Por último, a través de un diagrama de flujo se muestra el procedimiento para la lectura de una estampa de tiempo asociada a una variable analógica.

Escenario 1: Actualización de variable discreta desde subestación eléctrica

En la Figura 26 se muestra el proceso que se establece desde la generación de un evento discreto en los dispositivos Modbus hasta su respectivo reporte al centro de control. En este escenario, la subestación eléctrica posee en campo un dispositivo Modbus con dirección 2, allí tiene publicada la dirección 00003 asociada a una variable discreta en el centro de control, donde la dirección del objeto de información es la 1.

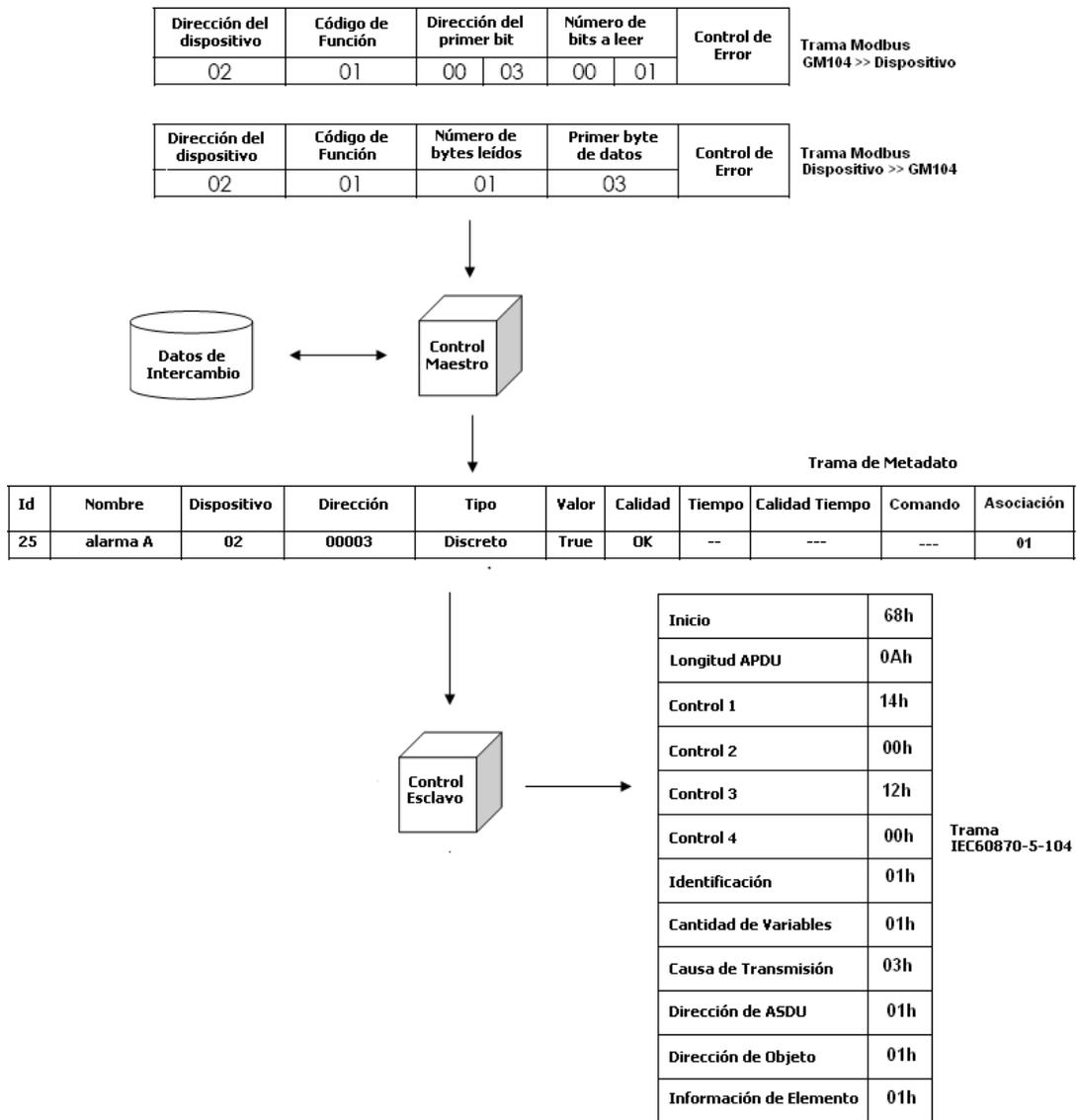


Figura 26. Trasmisión de evento desde dispositivos Modbus hacia el centro de control

El proceso ilustrado en la Figura 26 se inicia con una petición de la pasarela GM104 al dispositivo Modbus con dirección 2, donde se le solicita el valor del bit 3. Esta petición es la vista en la trama Modbus GM104 – Dispositivo que se muestra en la Figura 26. Para ampliar más sobre las tramas de comunicación Modbus se puede referir al anexo B del presente documento, donde se explican con más profundidad.

El proceso de lectura es realizado por el componente que se ha llamado Control Maestro, el cual está conformado por el módulo de comunicación maestro y el módulo maestro, los cuales, además de establecer la comunicación con los dispositivos Modbus, son los encargados, una vez se tiene el valor actual de la variable, de buscar entre los datos de intercambio, el metadato relacionado con la variable leída desde el dispositivo de campo y determinar si ha cambiado su valor con respecto a la última lectura. En la Figura 26 se muestra que esta búsqueda entregó el metadato con el identificador 25, el cual es una variable asociada a un dispositivo Modbus con identificador 3. La dirección de la variable dentro del dispositivo es la 00003. Es una variable de tipo discreto cuyo valor digital es *true* y no hubo fallas en la adquisición de su actualización desde el dispositivo de campo dado el valor de la calidad en *ok*. Es una variable que no tiene estampa de tiempo y no está asociada a un comando Modbus. Este metadato está relacionado con el objeto de información con dirección 01 en el centro de control, por esto, ese objeto debe ser actualizado.

Para el reporte del evento hacia el centro de control, el componente llamado Control Esclavo, que está constituido por los módulos de comunicación esclavo y el módulo esclavo, es el encargado de mapear el metadato en una trama IEC60870-5-104 para posteriormente trasmitirlo hacia el centro de control.

La trama de comunicación IEC60870-5-104 mostrada en la Figura 26 muestra como cabecera el identificador de trama, luego la longitud de la trama indicando

que está compuesta de 10 bytes además del byte de cabecera y el de longitud. Los campos de control indican que el GM104 ha enviado 10 tramas con formato I recibiendo confirmación de 9 de ellos. Para profundizar un poco más en la interpretación de estos campos se puede referir al Anexo A del presente documento, donde se explican cada uno de los campos de la trama IEC60870-5-104.

Dado que el evento que se generó en los dispositivos Modbus corresponde a una variable discreta, el identificador de trama indica que se trasmite la información de un objeto de información *single*, relación que se ilustró en la tabla 3.

La causa de transmisión indica que se ha generado un evento relacionado con el objeto de información con dirección 1, el cual tiene calidad óptima y se ha actualizado al valor *true*.

Escenario 2: Configuración de set point en subestación eléctrica desde el centro de control.

De manera similar, el tránsito de información desde el centro de control hacia los dispositivos de campo se realiza haciendo uso de los metadatos, tal como se ilustra en la Figura 27. En este segundo escenario el centro de control actualiza el *set point* mapeado en el objeto de información con dirección 100, el cual está asociado a la dirección 40001 del dispositivo de campo con dirección 2 en la subestación eléctrica.

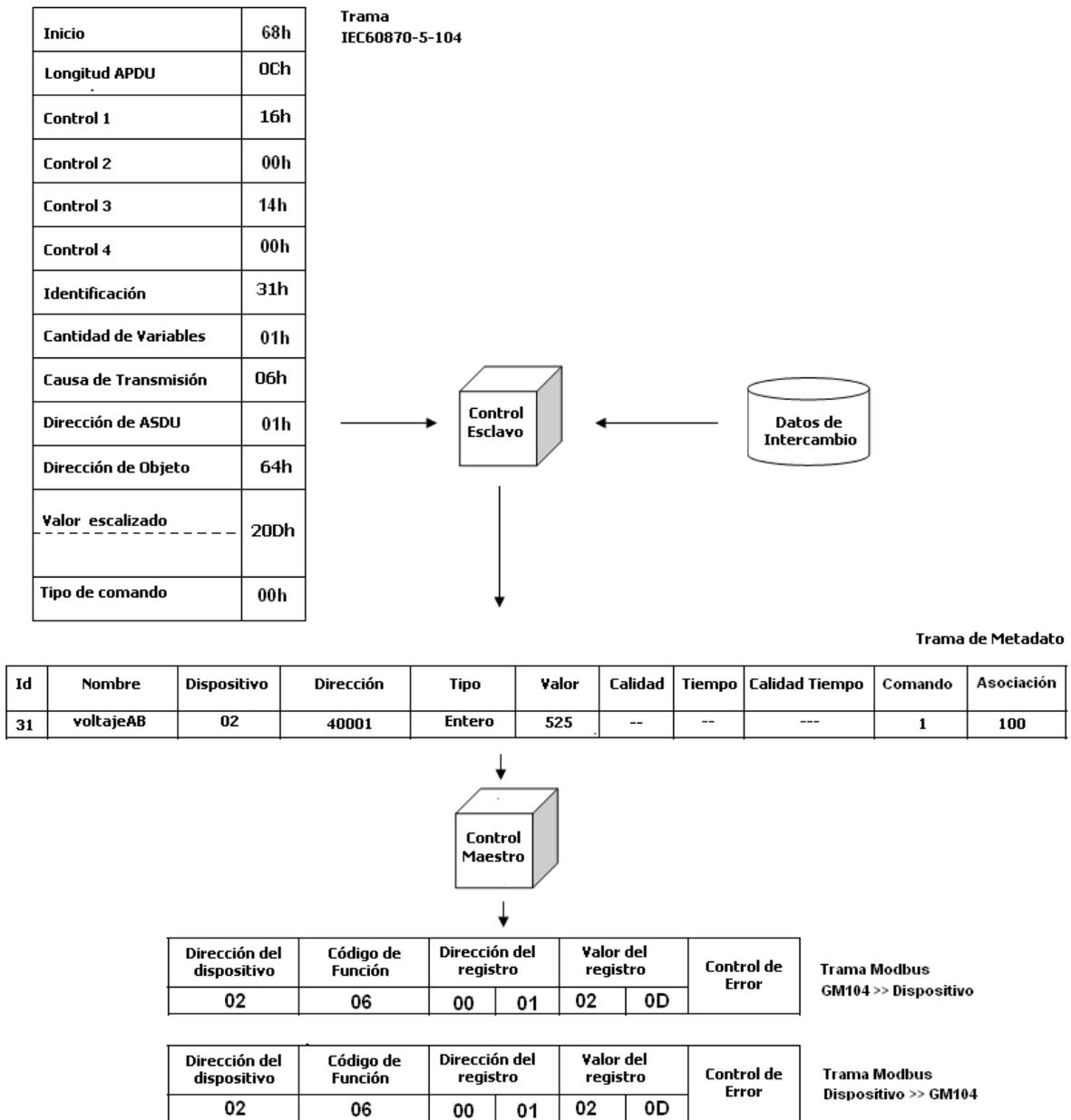


Figura 27. Trasmisión de variable analógica hacia dispositivo de campo desde centro de control

Allí, el centro de control envía un *set point* con valor escalizado de 525 a los dispositivos de campo sin especificar el tipo de comando para su ejecución. El identificador de trama 49 (31h) indica que la trama contiene un objeto de información de tipo *set point command, scaled value* sin estampa de tiempo y cuya dirección es 100 (64h). La causa de trasmisión 06h activa el *set point*.

Esta trama IEC60870-5-104 es leída por el componente Control Esclavo, quien basado en la dirección del objeto de información busca en los datos de intercambio el metadato que tenga asociación con este. De la Figura 27 se puede ver que el metadato con identificador 31 es el asociado al objeto de información 100. Este metadato con nombre “voltajeAB” está relacionado con el dispositivo Modbus cuya dirección es la 2, en la dirección de la variable ese dispositivo es la 40001. Es una variable de tipo entero, donde el campo de calidad no aplica debido a que corresponde a un comando, tal como lo muestra el campo con el mismo nombre en la trama metadato de la figura en mención.

Este metadato con identificador 31 es enviado al dispositivo campo de dirección 2 una vez ha sido empaquetado en una trama Modbus tal como se muestra en la Figura 27. Allí, la pasarela GM104 envía la orden de escritura al registro 40001 del dispositivos 2, con el valor de 525 (20Dh). Posteriormente el dispositivo Modbus retorna un reconocimiento de la escritura de la variable.

Escenario 3: Actualización de variable analógica con estampa de tiempo desde subestación eléctrica

En este escenario se muestra por medio del diagrama de flujo mostrado en la Figura 28, la trasmisión de una variable analógica con estampa de tiempo desde uno de los dispositivos de campo de la subestación eléctrica, hacia el centro de control. Dado que el mapeo en las tramas de comunicación de los dos protocolos, Modbus e IEC60870-5-104, es similar al presentado en el escenario 1 visto anteriormente, no se profundiza en ese aspecto en el presente.

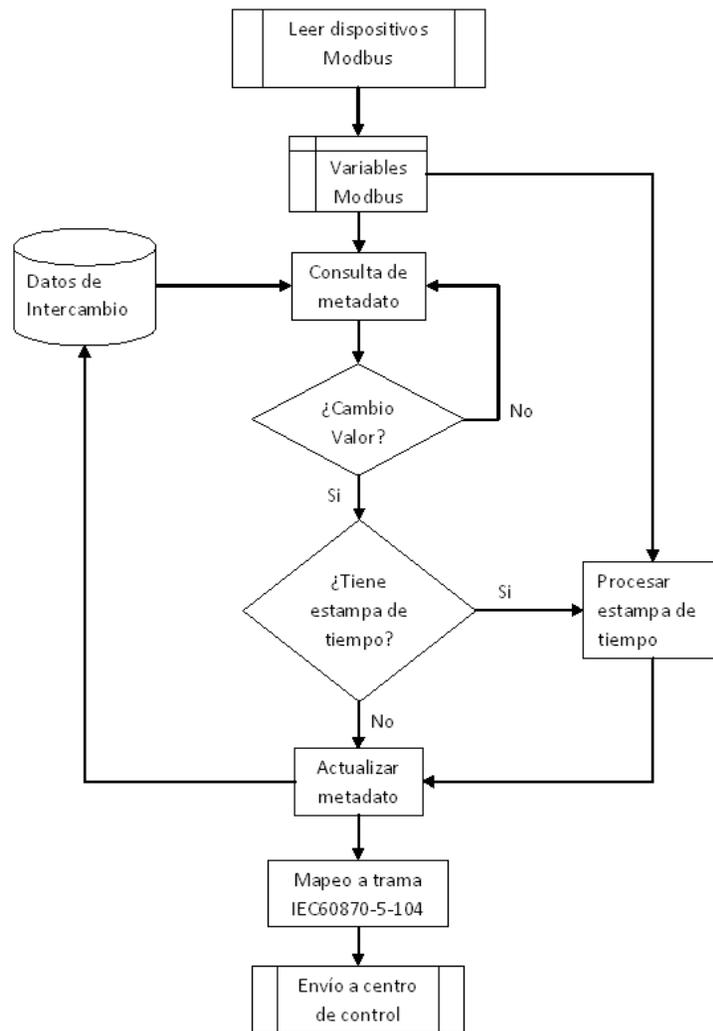


Figura 28. Trasmisión de variable analógica con estampa de tiempo hacia centro de control

La trasmisión se inicia con el proceso periódico de lectura de las variables Modbus mapeadas en la pasarela de comunicación. Esta información es almacenada temporalmente en la memoria interna de la aplicación, representada en el diagrama por el módulo *Variables Modbus*; desde allí son extraídos uno a uno para buscar entre los datos de intercambio el metadato asociado y de esta manera verificar si el valor debe ser actualizado, en caso contrario se continua con el procesamiento de otra variable.

Cuando el metadato indica que es una variable con estampa de tiempo y el valor

de la variable asociada en el dispositivo Modbus ha cambiado, se consultan entre las variables almacenadas en la memoria de la aplicación los campos que definen la estampa de tiempo para la variable en cuestión. En el diagrama de la Figura 28, este proceso es representado por el componente llamado *procesar estampa de tiempo*, el cual es encargado además de definir la calidad de la marca de tiempo, definiéndola como inválida si alguno de los valores de los campos no es correcto.

Después de verificar si el metadato tiene estampa de tiempo y de procesarla en ese caso, se actualiza el valor del metadato en la base de datos interna de la aplicación, llamada *Datos de Intercambio*. Luego, la información del metadato es adecuadamente mapeada a una trama IEC60870-5-104 tal como se muestra en la Figura 28 para su posterior transmisión al centro de control.

4.3.3 Interfaz de configuración

La configuración de la pasarela de comunicación por parte del usuario se hace a través de tablas y formularios como lo muestra la secuencia de Figuras 29 a 33, donde se ilustran algunas de estas tablas y los formularios. Con estos elementos se buscó hacer amigable la configuración del GM104.

La primera de las tablas de configuración vista en la Figura 29 permite la configuración de los objetos de información definidos para un dispositivo de campo en la subestación eléctrica. Cada dispositivo Modbus tendrá su propia tabla de configuración para objetos de información y su tabla de configuración de las características de la comunicación con GM104. En el momento de la edición de una variable Modbus, es necesario configurar un nombre para la variable, esto para poder mapearla al centro de control. Entre los tipos de datos soportados en esta implementación están: discreto, doble, entero y flotante. En la aplicación se hacen las asociaciones necesarias para dar soporte a la lectura de este tipo de datos, es así como un objeto de tipo doble requiere dos *coils* para su

representación, al igual que los de tipo flotante que requieren dos registros. En las variables de tipo discreto y entero son necesarios un *coil* y un registro respectivamente para representarlos.

Aunque Modbus no tiene una definición para objetos de tipo doble, se soportan directamente para facilitar la configuración de estas variables necesarias en el seguimiento a una subestación eléctrica. En el campo llamado Grupo de la tabla de edición de las variables, se configura el *tagset* asociado a la variable, con esto se define si la variable está asociada a un comando o por el contrario es una variable de la cual se quiere recuperar su valor.

Configuración de comandos		Grupos de Información		TCP: TCP		▼ X	
	Nombre	Tipo	Dirección	Grupo	Deshabilitar	Descripción	Avanzado
▶ 1	Iab	Flotante	▼ 40100	Defecto ▼	<input type="checkbox"/>	Corriente línea con estampa de tiempo	
2	Vab	Flotante	▼ 40102	Defecto ▼	<input type="checkbox"/>	Voltaje de línea con estampa de tiempo	
3	Pab	Flotante	▼ 40104	Defecto ▼	<input type="checkbox"/>	Potencia de línea con estampa de tiempo	
4	Int	Doble	▼ 00001	Defecto ▼	<input type="checkbox"/>	interruptor de línea	
5	SeAc	Doble	▼ 00003	Defecto ▼	<input type="checkbox"/>	seccionador de acople	
6	SeLi	Doble	▼ 00005	Defecto ▼	<input type="checkbox"/>	seccionador de línea	
7	SeBa	Doble	▼ 00007	Defecto ▼	<input type="checkbox"/>	seccionador de barra	
8	cmdSimple	Discreto	▼ 00100	cmd-Per ▼	<input type="checkbox"/>	comando simple	
9	cmdSetPoint_A	Entero	▼ 40200	cmd-Per ▼	<input type="checkbox"/>	Set Point A	
10	cmdSetPoint_B	Flotante	▼ 40201	cmd-Per ▼	<input type="checkbox"/>	Set Point B	
*			▼	▼	<input type="checkbox"/>		

Figura 29. Definición de objetos Modbus

La edición de los grupos de lectura Modbus, requieren una etiqueta y un periodo dado en milisegundos para leer el estado de las variables que tengan asociado este grupo de escaneo, tal como se puede ver en las tablas mostradas en la Figura 30. Para los comandos se debe definir el tipo de salida que se ejecuta, estos tipos son persistente o pulso.

El comando con salida persistente configura el estado de la variable de acuerdo a

la orden llegada desde el centro de control y es responsabilidad del dispositivo Modbus regresarla a su estado original o dejarla en ese valor, mientras que la salida pulso, envían dos comandos al dispositivo Modbus, uno para configurar el valor de la variable y otro después del periodo definido para enviar otro comando con el valor inicial de la variable.

Grupos de Información		Nombre	Intervalo de Actualización
▶	Defecto		1000
	dos		2000
	tres		3000
	cuatro		4000
	cinco		5000
*			

Configuración de comandos			
Nombre		Tipo	Tiempo de Duración
▶	cmd-Per	Persistente	100
	cmd-Pulso	Pulso	500
*			

Figura 30. Definición de grupos de lectura y comandos Modbus.

Dentro de las configuraciones avanzadas que se pueden realizar a las variables de los dispositivos Modbus, se encuentra la definición de la estampa de tiempo, tal como se observa en la Figura 31 donde están condensados los formularios de edición avanzada para variables discretas y analógicas. Allí, teniendo en cuenta la longitud programada para la estampa de tiempo, en la configuración del dispositivo; se habilitan los campos que el usuario debe configurar, definiendo las direcciones Modbus de las cuales se leerá la estampa de tiempo asociada a esta variable.

Para los datos de tipo analógico se habilita un filtro con el que se pueden descartar cambios en las variables presentados por ruido y no necesariamente por un cambio de la variable, tal como se ve en la Figura 31; puesto que los cambios

que se generen en las variables son reportados al centro de control como un evento. Con esto se previene la falsa generación de eventos en los dispositivos Modbus.

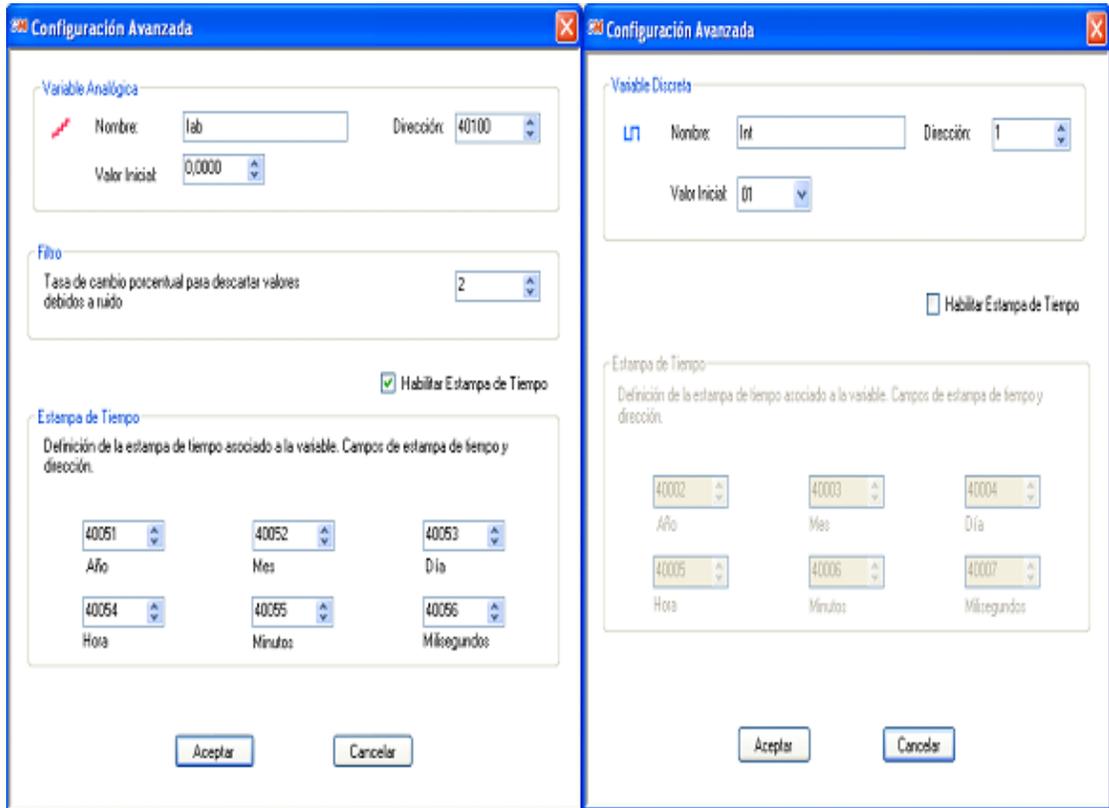


Figura 31. Edición avanzada de variables analógicas y digitales

De manera similar a la configuración de las variables Modbus se pueden editar las variables que serán mapeadas hacia el centro de control por medio de la tabla mostrada en la Figura 32. Todas las variables definidas en los dispositivos Modbus se pueden publicar; haciendo esto ya podrán ser accedidas desde el centro de control y se hacen visibles en las tablas de edición de variables IEC104. Adicionalmente, al crear un dispositivo Modbus se crea una variable discreta que modifica su valor de acuerdo al estado de la conexión con el dispositivo, colocándose en true cuando hay una falla de comunicación o en false en otro caso. Este tipo de variable también se puede publicar.

IEC: IEC, Objetos de Información							
	Nombre	Tipo	Dirección	Grupo	Estampa de Tiempo	Deshabilitar	Descripción
▶ 1	TCP_Iab	FLOAT	501	0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Corriente linea con estampa de tiempo
2	TCP_Vab	FLOAT	502	0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Voltaje de linea con estampa de tiempo
3	TCP_Pab	FLOAT	503	0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Potencia de linea con estampa de tiempo
4	TCP_Int	DOUBLE	201	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	interruptor de linea
5	TCP_SeAc	DOUBLE	202	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	seccionador de acople
6	TCP_SeLi	DOUBLE	203	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	seccionador de linea
7	TCP_SeBa	DOUBLE	204	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	seccionador de barra
8	TCP_Evento 0	SINGLE	101	0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Evento modbus 0
9	TCP_Evento 1	SINGLE	102	0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Evento modbus 1
*					<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

	Nombre	Tipo	Salida	Dirección	Deshabilitar	Valor Inicial	Descripción
▶ 1	TCP_cmdSimple	SINGLE	No definido	1000	<input type="checkbox"/>	False	comando simple
2	TCP_cmdSetPoint_A	SCALED	No definido	1001	<input type="checkbox"/>	0	Set Point A
3	TCP_cmdSetPoint_B	FLOAT	No definido	1002	<input type="checkbox"/>	0	Set Point B
*					<input type="checkbox"/>		

Figura 32. Definición de objetos de información IEC 104 en GM104

Las variables que se crean automáticamente en la conexión IEC104 al publicar las variables Modbus, configuran automáticamente el tipo, la estampa de tiempo, la descripción y el nombre dependiendo de la configuración hecha en el dato asociado en el dispositivo Modbus. Cuando el dato corresponde a un comando, a este se debe configurar el tipo de salida de acuerdo a lo establecido en la norma IEC60870-5-104, donde se define un valor por defecto, un pulso corto, un pulso largo o persistente.

En la Figura 33 se puede ver el panel de configuración de un dispositivo Modbus de tipo TCP, la cual guarda similitud al de configuración de uno RTU o del dispositivo IEC104. Allí se editan todos los parámetros requeridos para lograr la conexión del GM104 con cada uno de estos.

Los dispositivos Modbus tienen además la opción para configurar los eventos, para esto es necesario habilitarlos y configurar dos direcciones. Una de ellas es para escribir el reconocimiento cuando se haya leído los eventos, en ese momento

el dispositivo puede borrar los eventos o actualizar nuevos.

La otra dirección que se debe configurar para los eventos Modbus indica el inicio de la lectura de los eventos. Esta dirección es un totalizador de eventos, cuando este contador es diferente al del GM104, se lee la siguiente dirección, en esta se lee la cantidad de eventos que se deben registrar en ese momento. Luego ya se inicia con la lectura de los registros asociados a los eventos.

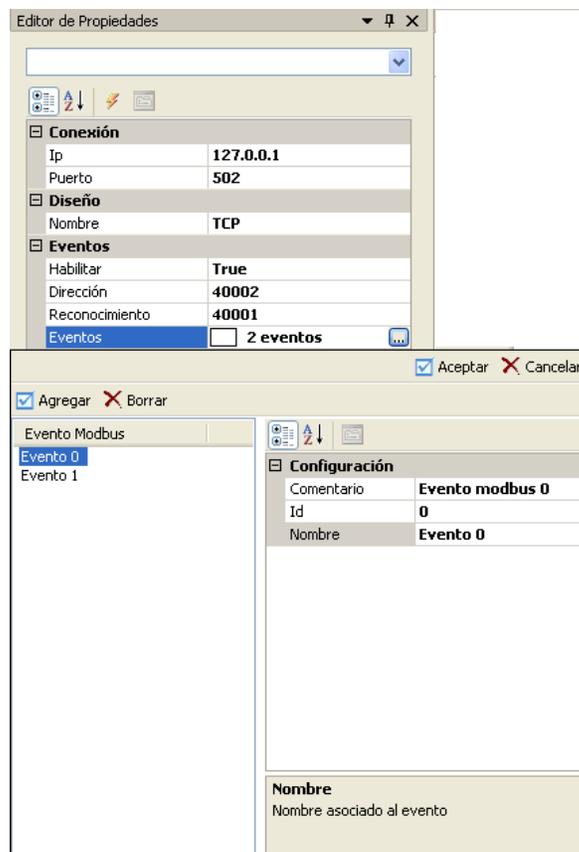


Figura 33. Configuración de conexiones Modbus TCP

En las Figuras 34 y 35 se presentan dos tramas que corresponden al formato de los eventos con estampa de tiempo Modbus. La trama mostrada en la Figura 34 tiene una definición de estampa de tiempo de 6 espacios, adicionalmente de los campos de definición del evento. Como la estampa tiene una longitud de 6 espacios, esto indica que desde el dispositivo Modbus se obtienen todos los

campos que conforman la estampa, mientras que la trama de la Figura 35 tiene tan solo 3 espacios.

Ack	*	Total	Now	Id	Value	Year	Month	Day	Hour	Minute	Milli	Id	Value	Year	Month	...
-----	---	-------	-----	----	-------	------	-------	-----	------	--------	-------	----	-------	------	-------	-----

Figura 34. Formato de evento Modbus con estampa de tiempo.

Para completar la estampa de tiempo mostrada en la Figura 35 el GM104 utiliza el año, mes y día que tenga el Gateway. La cantidad de eventos que se escanean depende del valor indicado en el espacio "Now". A partir de la dirección del espacio "Total" todos los campos son consecutivos, es decir, la única dirección que no se toma consecutiva es la dirección de reconocimiento "Ack", para esto el administrador del GM104 debe configurarla manualmente.

Ack	*	Total	Now	Id	Value	Hour	Minute	Milli	Id	Value	Hour	Minute	Milli	Id	...
-----	---	-------	-----	----	-------	------	--------	-------	----	-------	------	--------	-------	----	-----

Figura 35. Evento Modbus con estampa de tiempo de tres campos

La implementación GM104 permite observar las tramas de comunicación intercambiadas entre los dispositivos Modbus, el centro de control y la pasarela de comunicación, tal como se observa en la Figura 36. Esto puede ser de utilidad en el caso que se presente alguna falla en la comunicación.

Estado de variables		Tramas de comunicación	
Tiempo	Trama de comunicación		
05/10/2009 11:22:44:968	01 01 01 02		
05/10/2009 11:22:45:15	01 03 00 01 00 68		
05/10/2009 11:22:45:46	01 03 d0 00 02 00 02 00 00 07 d9 00 09 00 17 00 10 00 22 00 04 00 b9 00 01 07 c1 00 0a 00 17 00 05 00 0f 00 2b 01 64 00 02 07 c4 00 02 00 1c 00 0a 00 1e		
05/10/2009 11:22:45:171	68 04 43 00 00 00		
05/10/2009 11:22:45:171	68 04 83 00 00 00		
05/10/2009 11:22:45:937	01 01 00 00 00 08		
05/10/2009 11:22:45:968	01 01 01 02		
05/10/2009 11:22:46:15	01 03 00 01 00 68		
05/10/2009 11:22:46:46	01 03 d0 00 02 00 02 00 00 07 d9 00 09 00 17 00 10 00 22 00 04 00 b9 00 01 07 c1 00 0a 00 17 00 05 00 0f 00 2b 01 64 00 02 07 c4 00 02 00 1c 00 0a 00 1e		
05/10/2009 11:22:46:937	01 01 00 00 00 08		
05/10/2009 11:22:46:968	01 01 01 02		
05/10/2009 11:22:47:0	01 03 00 01 00 68		
05/10/2009 11:22:47:31	01 03 d0 00 02 00 02 00 00 07 d9 00 09 00 17 00 10 00 22 00 04 00 b9 00 01 07 c1 00 0a 00 17 00 05 00 0f 00 2b 01 64 00 02 07 c4 00 02 00 1c 00 0a 00 1e		
05/10/2009 11:22:47:937	01 01 00 00 00 08		
05/10/2009 11:22:47:968	01 01 01 02		
05/10/2009 11:22:48:0	01 03 00 01 00 68		
05/10/2009 11:22:48:46	01 03 d0 00 02 00 02 00 00 07 d9 00 09 00 17 00 10 00 22 00 04 00 b9 00 01 07 c1 00 0a 00 17 00 05 00 0f 00 2b 01 64 00 02 07 c4 00 02 00 1c 00 0a 00 1e		
05/10/2009 11:22:48:937	01 01 00 00 00 08		
05/10/2009 11:22:48:968	01 01 01 02		
05/10/2009 11:22:49:0	01 03 00 01 00 68		
05/10/2009 11:22:49:46	01 03 d0 00 02 00 02 00 00 07 d9 00 09 00 17 00 10 00 22 00 04 00 b9 00 01 07 c1 00 0a 00 17 00 05 00 0f 00 2b 01 64 00 02 07 c4 00 02 00 1c 00 0a 00 1e		

Figura 36. Ventana de seguimiento a tramas de comunicación

En el GM104 se puede observar los cambios presentados en las variables tal como lo indica la Figura 37: Allí, por medio de una tabla se indica el tiempo dado por la pasarela de comunicación en que la variable cambió de valor, y si tiene asociada estampa de tiempo la muestra también. Adicionalmente, se presenta una columna que indica la calidad de los datos Modbus según consideraciones propias de la aplicación. Esta calidad de los datos Modbus se manejó solamente a nivel visual en la pasarela de comunicaciones, a modo de prueba. Para esto se definieron tres niveles de calidad: Óptima, Buena y Mala identificándola cada una con un color: verde, naranja y rojo respectivamente. Adicionalmente se definió un color y una leyenda (gris, T. Inválida) para indicar que hubo un error en la lectura de la estampa de tiempo de la variable, por lo cual se le asignó la hora del sistema pero indicando que es inválida.

Los parámetros para determinar el nivel de calidad solamente tienen en cuenta la estampa de tiempo de las variables, si no la tiene, se considera que tiene una calidad óptima. Cuando se actualiza una de estas variables, se compara con unos

umbrales definidos por el administrador del GM104, para de esta forma identificar el nivel de calidad de la información. Es claro que si el dispositivo tiene un periodo de escaneo superior a estos umbrales de calidad, se verá posiblemente afectado negativamente el nivel de calidad de los datos.

Hora	Variable	Valor	Tipo	Dispositivo	Estampa de Tiempo	Calidad
05/10/2009 11:57:59:265	Evento 0	True	Evento Modbus	TCP	05/10/2009 11:45:00:185	Óptima
06/10/2009 12:01:29:953	TCP_Evento 1	False	SINGLE	IEC	23/10/1985 5:15:00:356	Óptima
06/10/2009 12:01:33:62	Evento 1	False	Evento Modbus	TCP	23/10/1985 5:15:00:356	Mala
06/10/2009 12:02:34:109	Evento 0	True	Evento Modbus	TCP	05/10/2009 11:45:00:185	Óptima
06/10/2009 12:03:29:218	Iab	0	Flotante	TCP	06/10/2009 12:03:24:828	T. Invá...
06/10/2009 12:03:29:250	Iab	0	Flotante	TCP	06/10/2009 12:03:24:828	T. Invá...
06/10/2009 12:03:29:265	Int	0	Doble	TCP		Óptima
06/10/2009 12:03:29:281	Int	0	Doble	TCP		Óptima
06/10/2009 12:03:29:312	SeAc	0	Doble	TCP		Óptima
06/10/2009 12:03:29:343	SeAc	0	Doble	TCP		Óptima
06/10/2009 12:03:29:359	SeLi	0	Doble	TCP		Óptima
06/10/2009 12:03:29:406	SeLi	0	Doble	TCP		Óptima
06/10/2009 12:03:29:437	SeBa	0	Doble	TCP		Óptima
06/10/2009 12:03:29:500	SeBa	0	Doble	TCP		Óptima
06/10/2009 12:03:29:546	TCP_Evento 1	False	SINGLE	IEC	23/10/1985 5:15:00:356	Óptima
06/10/2009 12:03:29:609	TCP_Evento 1	False	SINGLE	IEC	23/10/1985 5:15:00:356	Óptima
06/10/2009 12:03:29:671	Evento 0	False	Evento Modbus	TCP	05/10/2009 11:45:00:185	Óptima
06/10/2009 12:03:29:765	Evento 0	False	Evento Modbus	TCP	05/10/2009 11:45:00:185	Óptima
06/10/2009 12:03:29:875	TCP_Evento 1	False	SINGLE	IEC	23/10/1985 5:15:00:356	Óptima
06/10/2009 12:03:29:984	TCP_Evento 1	False	SINGLE	IEC	23/10/1985 5:15:00:356	Óptima
06/10/2009 12:03:30:93	Evento 1	False	Evento Modbus	TCP	23/10/1985 5:15:00:356	Mala
06/10/2009 12:03:30:203	TCP_Evento 1	False	SINGLE	IEC	23/10/1985 5:15:00:356	Óptima
06/10/2009 12:03:30:312	TCP_Evento 1	False	SINGLE	IEC	23/10/1985 5:15:00:356	Óptima
06/10/2009 12:03:30:421	Evento 1	False	Evento Modbus	TCP	23/10/1985 5:15:00:356	Mala
06/10/2009 12:03:33:562	TCP_Iab	456	FLOAT	IEC	06/10/2009 12:03:33:562	Óptima
06/10/2009 12:03:33:625	Iab	456	Flotante	TCP	06/10/2009 12:03:33:562	T. Invá...
06/10/2009 12:03:33:687	Iab	456	Flotante	TCP	06/10/2009 12:03:33:562	T. Invá...
06/10/2009 12:03:33:796	TCP_Int	2	DOUBLE	IEC		Óptima
06/10/2009 12:03:33:921	Int	2	Doble	TCP		Óptima
06/10/2009 12:03:34:46	Int	2	Doble	TCP		Óptima
06/10/2009 12:03:34:171	TCP_SeAc	0	DOUBLE	IEC		Óptima
06/10/2009 12:03:34:296	SeAc	0	Doble	TCP		Óptima
06/10/2009 12:03:34:421	SeAc	0	Doble	TCP		Óptima

Figura 37. Estado de variables

La Figura 38 muestra la interfaz de la implementación de la arquitectura de mediación entre IEC60870-5-104 y Modbus que se llamó GM104. En esta figura se observan algunas de las tablas de configuración y el explorador de proyectos que permite la edición de los componentes de cada proyecto generado en la aplicación.

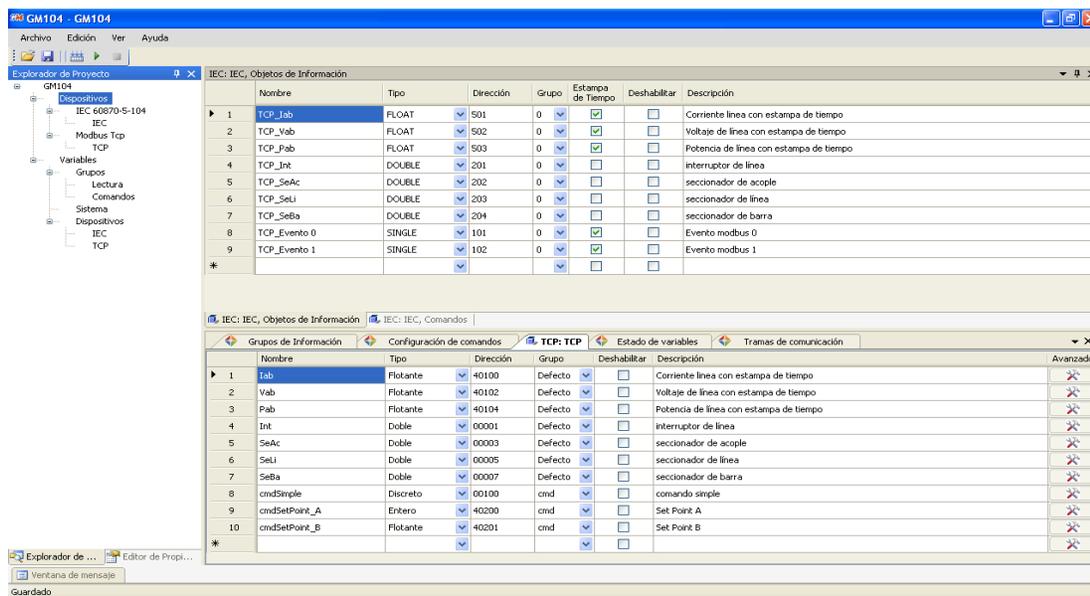


Figura 38. Interfaz GM104

4.4 Validación

Para la validación de la funcionalidad de la pasarela de comunicación implementada, la cual se basa en la arquitectura de mediación propuesta en el presente trabajo, se hizo uso de diferentes simuladores de los protocolos de comunicación involucrados y algunas herramientas industriales y dispositivos Modbus.

El primer simulador con el que se validó la pasarela GM104 se llama *IECTest*, su interfaz de edición y ejecución es la mostrada en la Figura 39. Este simulador fue desarrollado por la empresa alemana *Siemens* y se trabajó con la versión 1.0.22 Beta del 15 de marzo del 2006. Dadas las limitaciones de este simulador, solamente lograron probarse las funciones de recepción de comandos y el envío de cierta información con y sin estampa de tiempo. Funciones como la inicialización de la subestación no fue posible validarla, puesto que el simulador no permite el envío de esta función, como tampoco el de interrogación general, ni de sincronización del reloj.

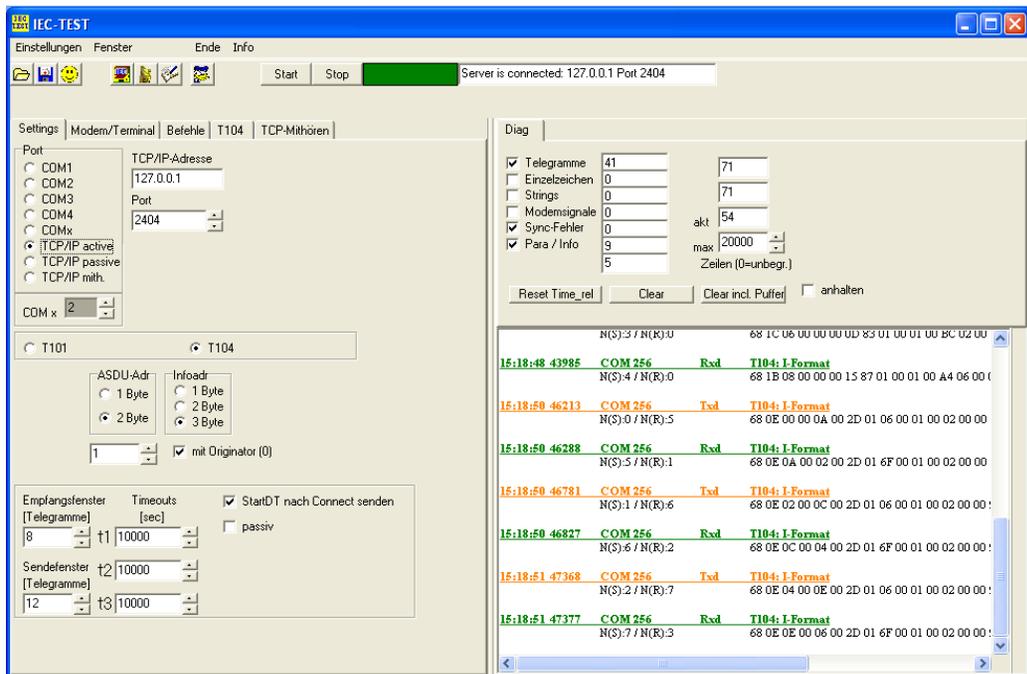


Figura 39. Interfaz de configuración de IECtest

Las Figuras 39 y 40 muestran el simulador *IECTest* conectado con el GM104. En la primera, se muestran las tramas de comunicación intercambiadas con el Gateway. De color verde están las tramas recibidas desde el GM104 y en color naranja las enviadas por el *IECTest*.

La tabla de variables del *IECTest* mostrada en la Figura 40, permite verificar el valor de las variables Modbus a través del GM104. En esta tabla se observa la actualización de las variables dada por el servidor IEC 60870-5-104, en este caso es el GM104, conectado al simulador. Esta actualización de variables incluye la calidad de los datos y las estampas de tiempo asociadas. Debido que el presente trabajo no modifica la calidad de los datos, siempre aparecen con buena calidad.

Richtun	TK Telegrammty	Übertragungsursach	ASDU	Info -/	Wert	Status	Zeitst.	Name
04/10/2009 11:05	R 256 (R) TK36: MW Gleitk.+v	spon (3 d)	1	502	145,0010	00(h) o.k	Z(G) W :01:01.01001(ms) - 01.10.08 (WOT 3)	???
04/10/2009 11:05	R 256 (R) TK36: MW Gleitk.+v	spon (3 d)	1	503	78,0000	00(h) o.k	Z(G) W :05:35.03035(ms) - 01.08.09 (WOT 6)	???
04/10/2009 11:05	R 256 (R) TK3: DM	spon (3 d)	1	201	STÖR 11	o.k		???
04/10/2009 11:05	R 256 (R) TK3: DM	spon (3 d)	1	201	EIN	o.k		???
04/10/2009 11:05	R 256 (R) TK36: MW Gleitk.+v	spon (3 d)	1	501	15724,0000	00(h) o.k	Z(G) W :23:02.12345(ms) - 04.10.09 (WOT 0)	???
04/10/2009 11:05	R 256 (R) TK3: DM	spon (3 d)	1	201	STÖR 11	o.k		???
04/10/2009 11:05	R 256 (R) TK36: MW Gleitk.+v	spon (3 d)	1	501	29358,0000	00(h) o.k	Z(G) W :23:02.12345(ms) - 04.10.09 (WOT 0)	???
04/10/2009 11:05	R 256 (R) TK3: DM	spon (3 d)	1	201	EIN	o.k		???
04/10/2009 11:05	R 256 (R) TK36: MW Gleitk.+v	spon (3 d)	1	501	24464,0000	00(h) o.k	Z(G) W :23:02.12345(ms) - 04.10.09 (WOT 0)	???
04/10/2009 11:05	R 256 (R) TK3: DM	spon (3 d)	1	201	STÖR 11	o.k		???
04/10/2009 11:05	R 256 (R) TK36: MW Gleitk.+v	spon (3 d)	1	501	28145,0000	00(h) o.k	Z(G) W :23:02.12345(ms) - 04.10.09 (WOT 0)	???
04/10/2009 11:05	R 256 (R) TK36: MW Gleitk.+v	spon (3 d)	1	501	16827,0000	00(h) o.k	Z(G) W :23:02.12345(ms) - 04.10.09 (WOT 0)	???
04/10/2009 11:05	R 256 (R) TK3: DM	spon (3 d)	1	201	EIN	o.k		???
04/10/2009 11:05	R 256 (R) TK36: MW Gleitk.+v	spon (3 d)	1	501	491,0000	00(h) o.k	Z(G) W :23:02.12345(ms) - 04.10.09 (WOT 0)	???
04/10/2009 11:05	R 256 (R) TK3: DM	spon (3 d)	1	201	STÖR 11	o.k		???
04/10/2009 11:05	R 256 (R) TK36: MW Gleitk.+v	spon (3 d)	1	501	11942,0000	00(h) o.k	Z(G) W :23:02.12345(ms) - 04.10.09 (WOT 0)	???
04/10/2009 11:05	R 256 (R) TK3: DM	spon (3 d)	1	201	EIN	o.k		???
04/10/2009 11:05	R 256 (R) TK36: MW Gleitk.+v	spon (3 d)	1	501	5436,0000	00(h) o.k	Z(G) W :23:02.12345(ms) - 04.10.09 (WOT 0)	???
04/10/2009 11:05	R 256 (R) TK3: DM	spon (3 d)	1	201	STÖR 11	o.k		???
04/10/2009 11:05	R 256 (R) TK36: MW Gleitk.+v	spon (3 d)	1	501	153,0000	00(h) o.k	Z(G) W :23:02.12345(ms) - 04.10.09 (WOT 0)	???
04/10/2009 11:05	R 256 (R) TK3: DM	spon (3 d)	1	201	EIN	o.k		???
04/10/2009 11:05	R 256 (R) TK36: MW Gleitk.+v	spon (3 d)	1	501	12382,0000	00(h) o.k	Z(G) W :23:02.12345(ms) - 04.10.09 (WOT 0)	???

Figura 40. Tabla de actualización de variables en el IECTest

Otro simulador con el que se logró validar el presente trabajo se llama *TestHarness* de la empresa *TriangleWorks*. Esta empresa permite la descarga del simulador en versión trial por 21 días [36]. El *TestHarness* es un simulador bastante elaborado que permite ser configurado al igual que el *IECTest* como cliente o como maestro. Para el caso de este trabajo, se trabajó como cliente, quedando así una estación de trabajo que permitió validar en su totalidad la comunicación de la pasarela de comunicación con un supuesto sistema Scada o un centro de control. En la Figura 41 se observan de fondo las tramas de comunicación que se establecen entre este simulador y el servidor GM104. En el primer plano de esta figura se presenta un formulario para la edición de la configuración de la estación IEC 60870-5-104 del *TestHarness*.

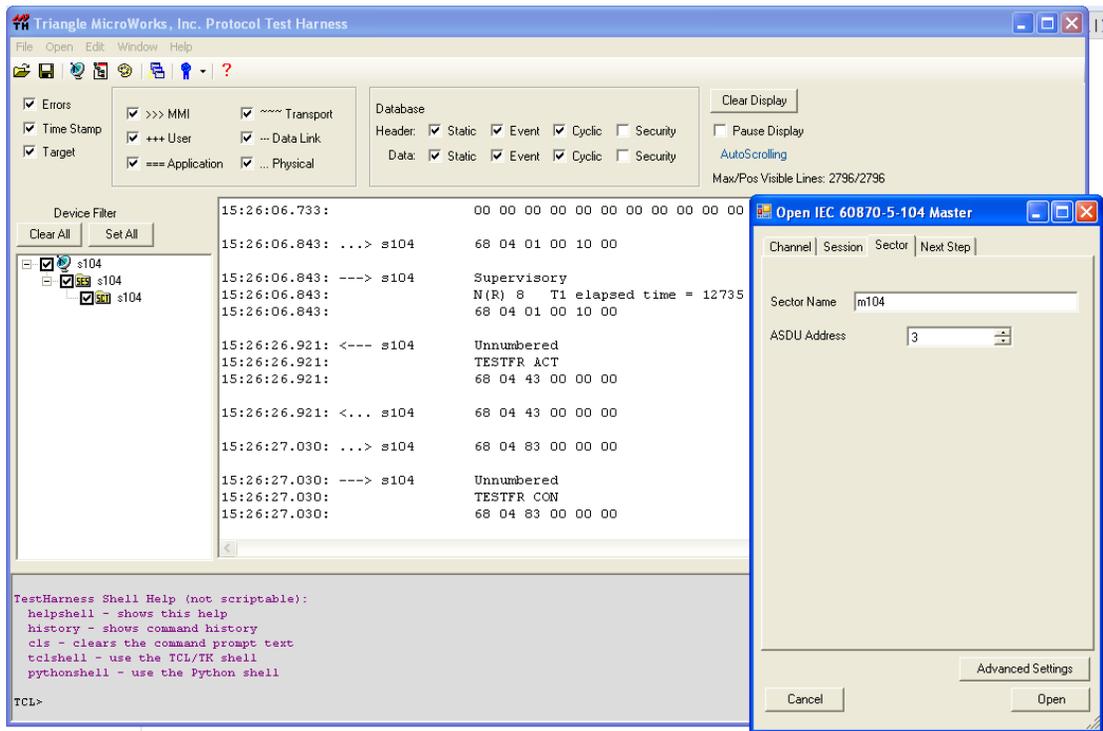


Figura 41. Interfaz de configuración TestHarness

El *TestHarness* permitió verificar las funciones requeridas por el centro de control, para esto brinda una sencilla interfaz gráfica, donde se permite ejecutar una a una las funciones allí definidas, por ejemplo interrogaciones, sincronización de reloj, comandos.

Para la generación de datos Modbus inicialmente se contó con el simulador *ModSim32*, mostrado en la Figura 42, el cual permite conexión serial y TCP. Ofrece diferentes formas de simular cambios en las variables, tal como incrementos, decrementos, valores aleatorios para señales analógicas. Para las señales discretas la simulación es manual, aleatoria o de cambio de valor. Con *ModSim32* se puede verificar la lectura y escritura de variables Modbus hechas por el GM104, además, fue de gran ayuda para comprobar el funcionamiento de la lectura de las estampas de tiempo y de eventos.

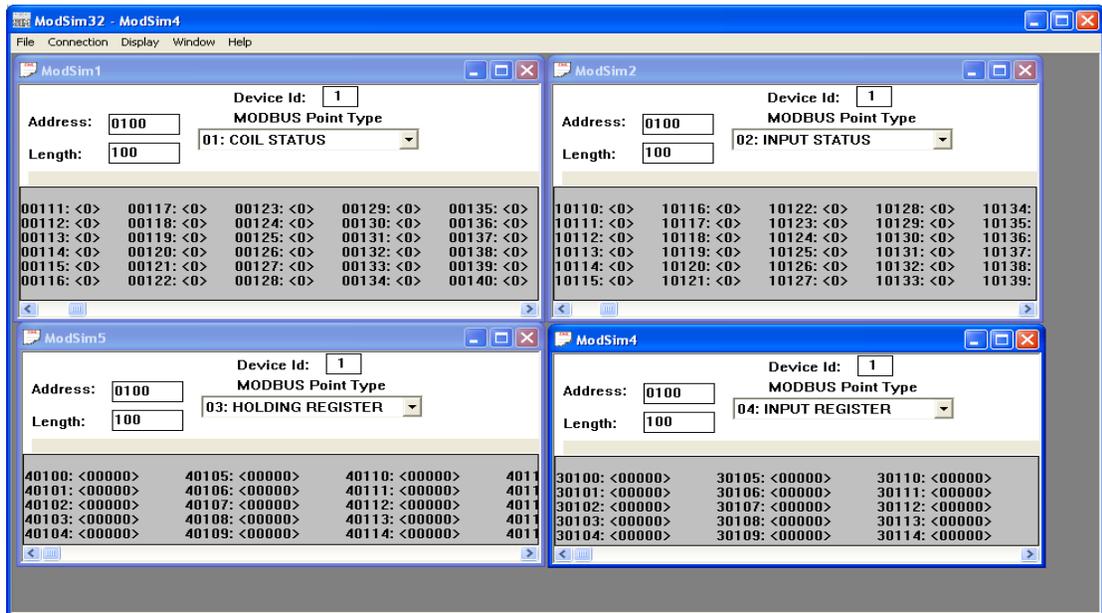


Figura 42. Interfaz ModSim

Para simular la conexión de dispositivos Modbus RTU y ASCII se utilizó el simulador *ModSim32* para la generación de las variables, pero además utilizó una herramienta llamada *Virtual Serial Port Emulator* [57], con la que se emula el comportamiento del puerto serial tal como lo muestra la Figura 43.

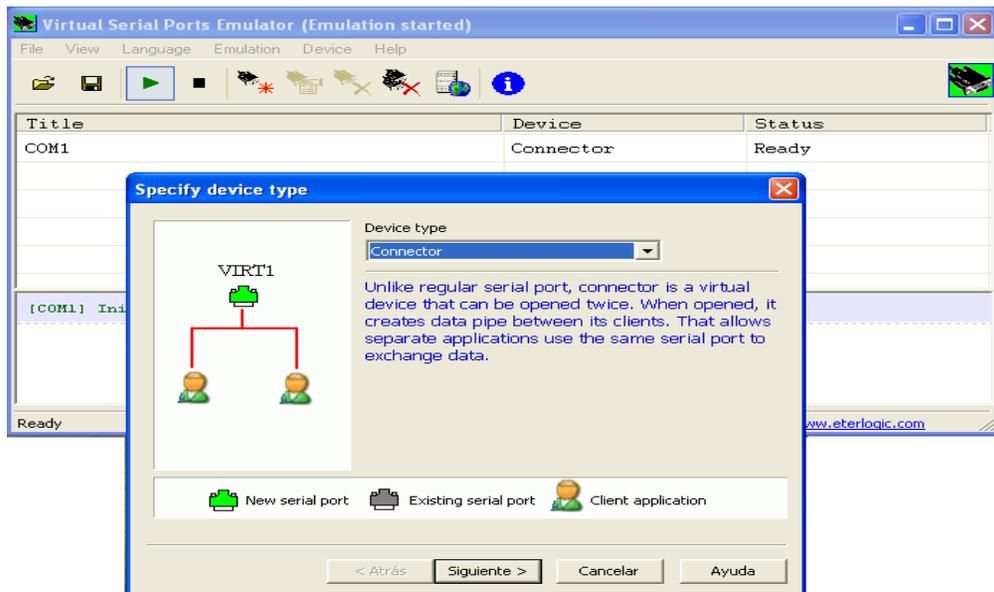


Figura 43. Virtual Serial Port Emulator

El simulador *ModScan32* permite leer los datos Modbus enviados por un canal de comunicación, fue por esta razón utilizado para la validación del envío de información desde GM104 hacia los dispositivos Modbus. En la Figura 44 se puede observar la interfaz de este simulador mostrando el tráfico en un canal TCP.

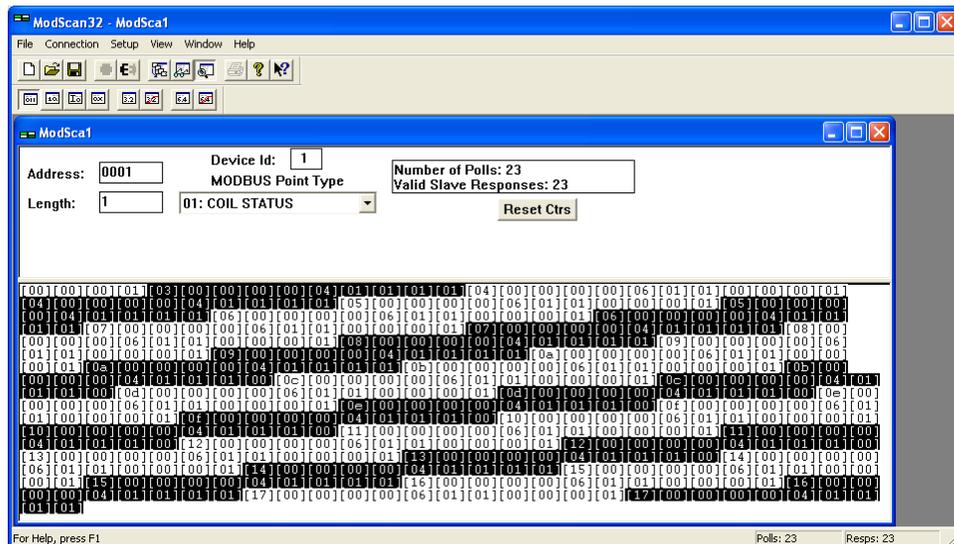


Figura 44. Interfaz ModScan

También se validó la generación de datos Modbus con la herramienta de simulación y programación de PLCs *Modicon Premium*, *Atrium* y *Quantum* de la empresa *Schneider Electric*, el *Unity Pro XL* [58]. Allí se elaboró un sencillo programa para que modificara el valor de algunas variables y la generación de eventos Modbus, como se muestra en la Figura 45. Únicamente se probó en modo simulación, ya que no se contaba con PLCs de este fabricante para programarlos y probarlos directamente con el GM104.

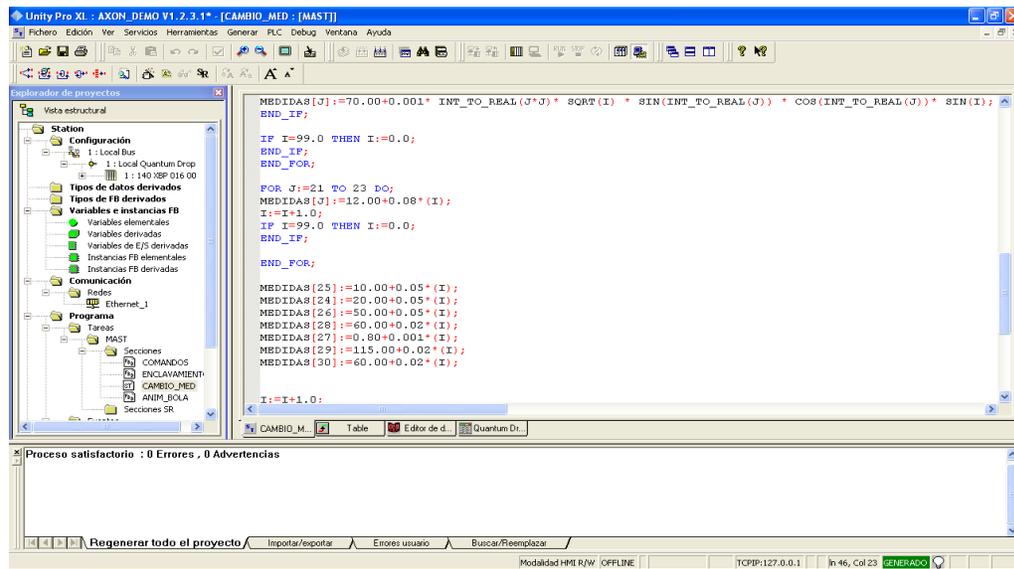


Figura 45. Unity Pro XL

Se conectó el GM104 con el micro PLC S7 200 de *Siemens* [59], mostrado en la Figura 46, donde un pequeño desarrollo logró comprobar la correcta comunicación con este dispositivo serial. Allí se realizó la lectura de variables discretas y el envío de comandos con salida persistente.



Figura 46. S7-200. Tomada de [59]

Las pruebas realizadas con el S7 200 permitieron identificar el problema que se presenta cuando en un dispositivo Modbus se trata de leer espacios que no han sido publicados como de lectura. Tratar de leer una de estas variables genera una excepción Modbus con código 2, la cual indica que se trata de acceder a una dirección inválida o no disponible. Por esto, es responsabilidad del administrador

del GM104 y de los programadores de los dispositivos Modbus la adecuada configuración de las variables.

Finalmente se comprobó el funcionamiento de GM104 al conectarse con el Scada *Axon Builder* desarrollado por la empresa colombiana *Axon Group Ltda.*, el cual soporta la comunicación por IEC60870-5-104. Allí se probaron funciones como la interrogación general, la sincronización del reloj, el envío de comandos y la lectura de variables al elaborar una pequeña animación de una bahía eléctrica como lo muestra la Figura 47.

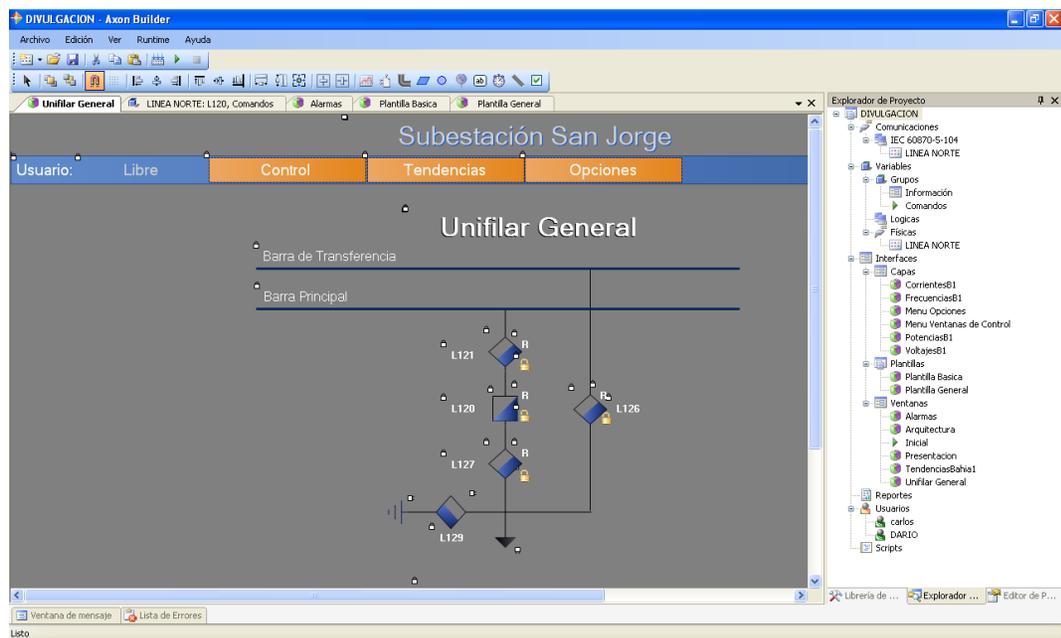


Figura 47. Axon Builder

Aunque se presentaron algunos *bugs* propios de la implementación de la pasarela de comunicación a la hora de la validación, tal como el incremento en recursos computacionales luego de tiempos prolongados de la ejecución en segundo plano de la pasarela, se puede afirmar que la arquitectura de mediación entre los protocolos IEC 60870-5-104 y MODBUS funciona adecuadamente y que el GM104 es un buen prototipo de *gateway* para el sector eléctrico.

5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

La industria colombiana presenta desafíos que las universidades pueden abordar, con esto, se genera nuevo conocimiento en el ambiente universitario y se contribuye a la rentabilidad de esta industria.

La ingeniería automática puede realizar aportes a la industria de la automatización, si se profundiza un poco más en el conocimiento de la ingeniería de software, ya que esto representaría el conocimiento necesario para el diseño y desarrollo de soluciones a algunas de las necesidades expresadas por la industria local. Prueba de esto es la realización del presente trabajo, el cual surgió como una necesidad expresada por la empresa colombiana Axon Group, donde se desarrollan proyectos de automatización para el sector eléctrico entre otros. Ellos han identificado propuestas como la de este proyecto que ayudan al desarrollo de la empresa nacional al estrechar los vínculos entre la industria y las universidades.

Se considera que a través de la experimentación hecha, la arquitectura cumplió las expectativas que se tenían en el momento de su desarrollo, referentes a los requerimientos de las pasarelas de comunicación del sector eléctrico, ya que los resultados que arrojaron estas pruebas fueron bastante dicientes acerca del correcto funcionamiento en cuanto a la accesibilidad y la fiabilidad en la transmisión de los datos haciendo uso de la arquitectura propuesta. De cualquier modo, para obtener resultados más precisos será necesario elaborar una fase de experimentación más profunda, donde se cuente con dispositivos hardware de otros fabricantes y diversas herramientas software.

Es importante destacar que con el diseño de la arquitectura de mediación propuesta en el presente trabajo, no fue necesario un módulo especializado

para el manejo de estampas de tiempo. Con esto, se adiciona una funcionalidad importante para el sector eléctrico en las pasarelas de comunicación, lo cual no significa que no pueda resultar de gran ayuda en otros casos de estudio donde se vea involucrado un protocolo diseñado para procesos industriales y uno de telecontrol.

Posteriormente, se podrían desarrollar otras aplicaciones de tipo industrial que se basen en la arquitectura de comunicación propuesta y que cuente con un mayor tipo de formatos de estampas de tiempo para confirmar los resultados obtenidos con el formato con el que cuenta la aplicación actual.

En un futuro la arquitectura propuesta puede ser redefinido y refinado para estar en capacidad de soportar la comunicación a través de otros protocolos industriales.

En trabajos futuros se puede tener en cuenta otros medios para el acceso a la información de la pasarela de comunicación, tales como servicios web, para hacer una gestión remota del comportamiento del Gateway.

6. REFERENCIAS

- [1] J. Gers, L. E. Aragón, “Guías para la Implementación de Sistemas de Distribución automatizados”. [Online]. Disponible: <http://www.gers.com.co/pdf/> [Accedido Sept. De 2009].
- [2] Comisión de Regulación de Energía y Gas. Ministerio de Minas y Energía, “Resolución número 102 de 19 de noviembre de 1996. Por la cual se reglamentan las funciones de los Centros de Control, en especial las que deben desarrollar el Centro Nacional de Despacho (CND) y los Centros Regionales de Despacho (CRD's),” Ministerio Colombiano de Minas y Energía, 1996.
- [3] E. A. Chacón, J. M. Velasco, O. Rojas. “Principio de una metodología para la integración empresarial bajo un enfoque holónico”. [Online]. Disponible: <http://www.docstoc.com/docs/5467782/PRINCIPIOS-DE-UNA-METODOLOGIA-PARA-INTEGRACION-EMPRESARIAL-BAJO-UN> [Accedido Sept. De 2009].
- [4] I. Morandé. “Protocolos de Comunicaciones Industriales”. [Online]. Disponible: <http://www.alumnos.usm.cl/~ignacio.morande/descargas/> [Accedido Julio De 2008].
- [5] H. Kaschel y E. Pinto. “Análisis Del Estado Del Arte De Los Buses De Campo Aplicados Al Control De Procesos Industriales,” *Ciencia Abierta*, vol. 19, Septiembre 2002. [Online]. Disponible: <http://cabierta.uchile.cl/revista/19/articulos/> [Accedido Julio De 2008].
- [7] ABB. “Las Comunicaciones en la Automatización industrial”. [Online]. Voltimum ES. Disponible: <http://www.voltimum.es/news/722//Las-Comunicaciones-en-la-Automatizaci-n-Industrial.html?fullsize=yes> [Accedido Abril De 2008]
- [8] E. Hague. “Modbus RTU Protocol Overview,” *FieldServer Technologies*. [Online]. Disponible: http://www.processor.com/technical/Modbus_RTU_Protocol_Overview.html [Accedido Julio de 2008].
- [9] CAREL. “El control de la humedad en las aplicaciones textiles”. [Online]. Disponible: http://www.carel.com/carelcom/web/download?nome_file=/carelcom/web/@extsrc/@esp/@catalogo/@documenti/@depliant/302235439.pdf [Accedido Mayo De 2008].

- [10] MODBUS. "Modbus Application Protocol Specification v1.1B," [Online]. Disponible: http://www.Modbus.org/docs/Modbus_Application_Protocol_V1_1b.pdf [Accedido Mayo De 2008].
- [11] Material Docente – Sistemas Electrónicos Digitales. "RS-232 / RS-485," *Universidad politécnica de Cataluña, Departamento de Ingeniería Electrónica*. [Online]. Disponible: <http://studies.ac.upc.edu/EPSC/SED/Apuntes/RS-232%20Y%20RS-485.ppt> [Accedido Julio de 2008].
- [12] R. Wang, E. Pierce; S. Madnick, C. Fisher. *Information Quality. Advances in Management Information System*. 2005. Vladimir Zwass: Series Editor. [E-book]. Disponible: Google e-book.
- [13] International Organization for Standardization. "ISO 8601," International Organization for Standardization, 1988.
- [14] W. Ackerman y W. Block. "Understanding supervisory systems," *IEEE Applications in Power*, vol 15, Issue 4. 2002.
- [15] G. Sánchez, I. Gómez, F. Pérez y J. Luque. "Nuevos sistemas de telecontrol de redes eléctricas en Europa: Arquitectura y protocolos". [Online]. Disponible: <http://www.personal.us.es/jluque/> [Accedido Abril De 2008]
- [16] R. Zafra, "Programa Scada," Proyecto Final de Carrera, Escola Tècnica Superior Enginyeria, Universitat Rovira I Virgili, Tarragona, España, 2008. [Online]. Disponible: <http://sauron.etse.urv.es/public/propostes/pub/pdf/542pub.pdf> [Accedido Julio De 2008].
- [17] ABB. "New features of MicroSCADA Pro". [Online]. Disponible: http://www.chsystem.co.kr/pdf_down/MicroSCADA%20Pro%20Technical%20Overview.pdf [Accedido Junio De 2008].
- [18] KALKITECH. "Energy Management System Solutions". [Online]. Disponible: <http://www.kalkitech.com/ems.htm> [Accedido Junio De 2008].
- [19] General Cable. "Glosario". [Online]. Disponible: http://www.trans4.motionpoint.net/generalcable/enes/24/ www_generalcable_com/GeneralCable/en-US/Resources/Glossary/ [Accedido Abril De 2008].
- [20] Energy Information Administration. "Electric Utility Demand-Side Management 1999". [Online]. Disponible: http://www.eia.doe.gov/cneaf/electricity/dsm99/dsm_sum99.html [Accedido Junio De 2008].

- [21] International Energy Agency. , “Demand Side Management”. [Online]. Disponible: <http://dsm.iea.org/> [Accedido Mayo De 2008].
- [22] F. Masís. “Tendencias de las comunicaciones en sistemas eléctricos de potencia (I parte)”. [Online]. Disponible: <http://www.siicecr.org/boletin/2006/02/enterese.htm> [Accedido Abril De 2008].
- [23] DPN. “Distributed Network Protocol”. [Online]. Disponible: <http://www.dnp.org/> [Accedido Abril De 2008].
- [24] KYBER. “Compañía de Tecnologías de Automatización, Productividad e Innovación. Principales Proyectos SCADA y Automatización de Subestaciones y Sistemas de Distribución realizados”. [Online]. Disponible: <http://www.kyber.cl/Scada/> [Accedido Julio De 2008].
- [25] IEC. “International Electrotechnical Commission”. [Online]. Disponible: <http://www.iec.ch/> [Accedido Abril De 2008].
- [26] IEC. “List of technical committees and subcommittees”. [Online]. Disponible: <http://www.iec.ch/cgi-bin/procgi.pl/www/iecwww.p?wwwlang=e&wwwprog=dirlst.p&committee=ALL> [Accedido Abril De 2008].
- [27] IEC. “Telecontrol equipment and systems - Part 5-101: Transmission protocols - Companion standard for basic telecontrol tasks,” International Electrotechnical Commission, 1990.
- [28] IEC. , “Telecontrol equipment and systems - Part 5-104: Transmission protocols - Network access for IEC 60870-5-101 using standard transport profiles,” International Electrotechnical Commission, 2000.
- [29] IPCOMM. “Protocols: IEC 60870-5-104” [Online]. Disponible: <http://www.ipcomm.de/protocol/IEC104/en/sheet.html> [Accedido Febrero De 2009].
- [30] Wikipedia. “DNP3”. In The Free Encycloedia [Online]. Disponible: <http://en.wikipedia.org/wiki/DNP3> [Accedido Febrero De 2009].
- [31] T. Sümmerer. *IEC 61850: Standardization of electric power delivery systems*. Vogel Industrie Medien, 2008. [E-book]. Disponible: Google e-book.
- [32] Industrial Networking Solutions. “What is Goose (Generic Object Oriented

Substation Event),” NETEON. [Online]. Disponible: http://www.neteon.net/PDFFiles/Goose_Generic-Object-Oriented-Substation-Event.pdf [Accedido Sept. De 2009].

[33] K. Schwarz, “IEC 61850, IEC 61400-25, and IEC 61970: Information models and information exchange for electric power systems,” Schwarz Consulting Company, SCC. [Online]. Disponible: http://nettedautomation.schwarz-interactive.de/download/Paper_IEC61850_Distributech_2004-02-10.pdf [Accedido Sept. De 2009].

[34] Alegsá. “Definición de Gateway”. En Diccionario Informático de Internet. [Online]. Disponible: <http://www.alegsa.com.ar/Dic/gateway.php> [Accedido Mayo De 2008].

[35] SICA S.A. “GATEWAY- Pasarela Comunicaciones,” SICA S.A. [Online]. Disponible: <http://www.sica.es/esp/gateway.htm> [Accedido Sept. De 2009].

[36] Triangle MicroWorks .INC. “Solutions for Communication Protocol Development”. [Online]. Disponible: <http://www.trianglemicroworks.com/> [Accedido Sept. De 2009].

[37] ProSoft Technology. “Where Automation Connects”. [Online]. Disponible: <http://www.prosoft-technology.com/prosoft> [Accedido Sept. De 2009].

[38] Electric Power Research Institute. “EPRI”. [Online]. Disponible: <http://my.epri.com/portal/server.pt?> [Accedido Sept. De 2009].

[39] J. McDonald. *Electric Power Substations Engineering, Second Edition*. 2007. [E-book]. Disponible: Google e-book.

[40] D. Garlan, M. Shaw. “An introduction to software architecture”. Escuela de Ciencias de la Computación. Universidad Carnegie Mellon, 1994. [Online]. Disponible: http://www.cs.cmu.edu/afs/cs/project/vit/ftp/pdf/intro_softarch.pdf [Accedido Sept. De 2009].

[41] M. Ramos. “Una arquitectura para sistemas inteligentes adaptativos basada en el modelo de pizarra”. Ph.D. dissertation, Universidad de Vigo, España, 2000. [Online]. Disponible: <http://tvdi.det.uvigo.es/tesispdfs/tesis-manuel.pdf> [Accedido Sept. De 2009].

[42] L. Chung. “Dallas. Client-Server Architecture,” Programa de Ciencias de la Computación, Universidad de Texas. [Online]. Disponible: <http://www.utd.edu/~chung/SA/2client.pdf> [Accedido Sept. De 2009].

- [43] IEC. "Telecontrol equipment and systems - Basic applications functions. International Electrotechnical Commission". [Online]. Disponible: <http://webstore.iec.ch/webstore/webstore.nsf/artnum/019293> [Accedido Sept. De 2009].
- [44] J. Cortadella, W. Reisig. *Applications and Theory on Petri Nets 2004. 25th International Conference, ICATPN 2004 Bologna, Italy*, June 2004. [E-book]. Disponible: Google e-book.
- [45] M. Zhou, F. Dicesare. *Petri Nets Synthesis for Discrete Event Control of Manufacturing Systems*. Kluwer Academic Publisher, 1993. [E-book]. Disponible: Google e-book.
- [46] O. López, M. Laguna, F. García. "Representación de requisitos mediante redes de petri coloreadas," Departamento de Informática, universidad de Valladolid España. [Online]. Disponible: <http://www.infor.uva.es/Investigacion/Descargas/IT-DI-2002-0001.pdf> [Accedido Sept. De 2009].
- [47] K. Jensen. *Coloured Petri Nets – Basic Concepts, Analysis Methods and Practical Use*. Volume 1. 1997. [E-book]. Disponible: Google e-book.
- [48] D. Bjorner. *Software Engineering 3. Domains, Requirements, and Software Desing*. 2006. [E-book]. Disponible: Google e-book.
- [49] A. Kent, J. Williams. *Encyclopedia of Microcomputeres*. Volume 20. 1997. [E-book]. Disponible: Google e-book.
- [50] M. Beaudouin, W. Mackay, P. Andersen, P. Janecek, M. Jensen, M. Lassen, K. Lund, K. Mortensen, S. Munk, A. Ratzer, K. Ravn, S. Christensen, K. Jensen. *CPN/Tools: A Post-WIMP Interface for Editing and Simulating Coloured Petri Nets. Applications and Theory of Petri Nets 2001. 22nd International Conference, ICATPN 2001, Newcastle upon Tyne, UK*, June 2001. [E-book]. Disponible: Google e-book.
- [52] Microsystemes. "General description of IRIGB standard. Inter Range Instrumentation Group mod B". [Online]. Disponible: http://irigb.com/IRIGB_standard.html [Accedido Sept. De 2009].
- [53] NModbus. "Implementation of the Modbus protocol". [Online]. Disponible: <http://www.nModbus.com/> [Accedido Junio De 2008].
- [54] M. Kuhn. "A summary of the international standard date and time notation".

[Online]. Disponible: <http://www.cl.cam.ac.uk/~mgk25/iso-time.html> [Accedido Sept. De 2009].

[55] C. Brown and M. Barr. "Introduction to Endianness". [Online]. Disponible: <http://www.netrino.com/node/149> [Accedido Sept. De 2009].

[56] B. Sintay. "Unix Time Stamp". [Online]. Disponible: <http://www.unixtimestamp.com/> [Accedido Sept. De 2009].

[57] Eterlogic. "Virtual Serial Port Emulator". [Online]. Disponible: <http://www.eterlogic.com/Products.VSPE.html> [Accedido Sept. De 2009].

[58] Schneider Electric. "Unity Pro". [Online]. Disponible: <http://200.57.159.226/toolkits/unity/download/index.htm> [Accedido Sept. De 2009].

[59] Siemens. "The SIMATIC S7-200 Micro PLC". [Online]. Disponible: <http://www.automation.siemens.com/en/s7-200/index.htm> [Accedido Sept. De 2009].