



SUSTITUCIÓN Y ACTUALIZACIÓN TECNOLÓGICA DE LOS PANELES DE PROTECCIÓN DE LOS GRUPOS AUTOTRANSFORMADOR/REGULADOR T01/R01, T02/R02, T03/R03 Y DE LOS TRANSFORMADORES T06 Y T07 EN LA SUBESTACIÓN MARGEN DERECHA DE LA ITAIPU

Jorge Andrés Silva Stransky

Jose Chiaradia Siqueira

División de Ingeniería Electromecánica – ENEE.DT

ITAIPU BINACIONAL

PARAGUAY/BRASIL

Resumen

Los conjuntos autotransformador/regulador (525/241,5/13,8kV) T01/R01, T02/R02 y T03/R03, después de su repotenciación tienen una capacidad total de 1.350 MVA, y son de gran importancia para la confiabilidad y seguridad del suministro de energía al sistema eléctrico del Paraguay. Los transformadores T06 y T07 (220/66/13,8kV), son fuentes normales de los servicios auxiliares de la Subestación Margen Derecha y de las líneas LI 66kV-MD-FI (FURNAS), LI 66kV-MD-ACY-HER (ANDE) y LT 66kV-MD-IPU (fuente alternativa de los servicios auxiliares 50 Hz de la Casa de Máquinas). Sus sistemas de protección fueron puestos en servicio durante la construcción de la usina. La tecnología utilizada, de electrónica analógica, se encuentra hoy obsoleta. Los relés de protección de estos modelos ya no son fabricados, por lo que es cada vez más difícil la obtención de piezas de repuesto.

Los nuevos sistemas de protección utilizarán unidades multifuncionales de hardware (IEDs) integrados en una red de comunicaciones todos ellos compatibles con la norma IEC61850. Para integración con el sistema de control computarizado (SCC) de la SEMD se prevé la utilización de un par de gateways redundantes para conversión al protocolo IEC 60870-5-104.

Los trabajos de desmontaje, montaje, comisionamiento y puesta en servicio suponen un desafío para la programación de los servicios, pues se debe minimizar el tiempo de desconexión de equipos, debido a los compromisos de suministro de energía de la Usina de ITAIPU.

Palabras clave

IEC 61850, Protección de transformadores.



1. INTRODUCCIÓN

Las fallas en los transformadores implican elevados costos: el costo de reparar el transformador, el costo de la energía no entregada debido a la indisponibilidad del transformador, y los posibles costos adicionales de daños colaterales a equipos adyacentes, o inclusive un eventual *blackout* del sistema eléctrico. Además las fallas en los transformadores son un peligro para el personal de la empresa de energía eléctrica.

Las faltas internas y externas y otras condiciones anormales de operación como sobrecarga, sobrecitación, y sobretensión estresan a los transformadores. El sistema de protección del transformador debe desconectarlo antes que un daño mayor ocurra en el transformador y/o en el sistema eléctrico de potencia.

La protección diferencial, es el mejor principio de protección para los transformadores, opera con la suma de las corrientes entrando al elemento protegido, también llamada la corriente diferencial. La corriente diferencial es proporcional a la corriente de falta para faltas internas y tiende a cero para condiciones normales de operación. [1]

La protección de sobrecarga es aplicada para prevenir exceder la capacidad del transformador y actúa sobre un esquema de alivio de cargas.

La función de sobrecorriente en el neutro del transformador actúa con buena sensibilidad para faltas a tierra.

Además las protecciones intrínsecas del transformador: relé de gas o Buchholz, de temperatura y detectores de incendio operan actuando sobre el disparo de los interruptores y los relés de bloqueo de transformador. Las protecciones intrínsecas proveen detección sensitiva de faltas que los relés no pueden detectar. Por ejemplo, los elementos diferenciales son relativamente insensibles a faltas entre espiras. Sin embargo, la gran cantidad de energía disipada en el arco crea un rápido aumento de presión dentro del tanque que es detectado por el relé de gas. [2]

2. SUBESTACIÓN DE LA MARGEN DERECHA (SEMD)

Por la subestación de la margen derecha pasa la energía del sector de 50 Hz de la Central Hidroeléctrica de ITAIPU para el sistema de ANDE. Incluye sectores de 500, 220 y 66 kV en la configuración actual recibe 4 líneas de 500kV provenientes de la Casa de Máquinas y parten de ella cuatro líneas de 500kV hacia la subestación Foz de Iguazu de FURNAS y una para la Subestación Villa Hayes de ANDE. En su configuración final, la SEMD puede ser ampliada para incluir Dos líneas de 220 kV van hasta la subestación Acaray, la tercera a la subestación Itakyry y la cuarta de 220 kV sigue el trazado subestación Parque Industrial Hernandarias – subestación Itakyry. Además una línea subterránea de 66kV es fuente de emergencia de los servicios auxiliares de 50 Hz de la Casa de Máquinas, la segunda línea de 66 kV va a la subestación Foz de Iguazu de FURNAS y una tercera línea de 66kV tiene el trazado Acaray – Hernandarias.[3]

XIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
06 y 07 de Setiembre de 2018

El esquema de interruptor y medio fue adoptado en los patios de 500 y 220 kV. En la etapa inicial de la construcción fueron implantados tres grupos autotransformador/regulador de 525/241,5 kV cada uno de 375 MVA y posteriormente fueron repotenciados a 450 MVA. La sustitución de la protección de estos tres grupos (T01/R01, T02/R02, T03/R03) es objeto de este trabajo.

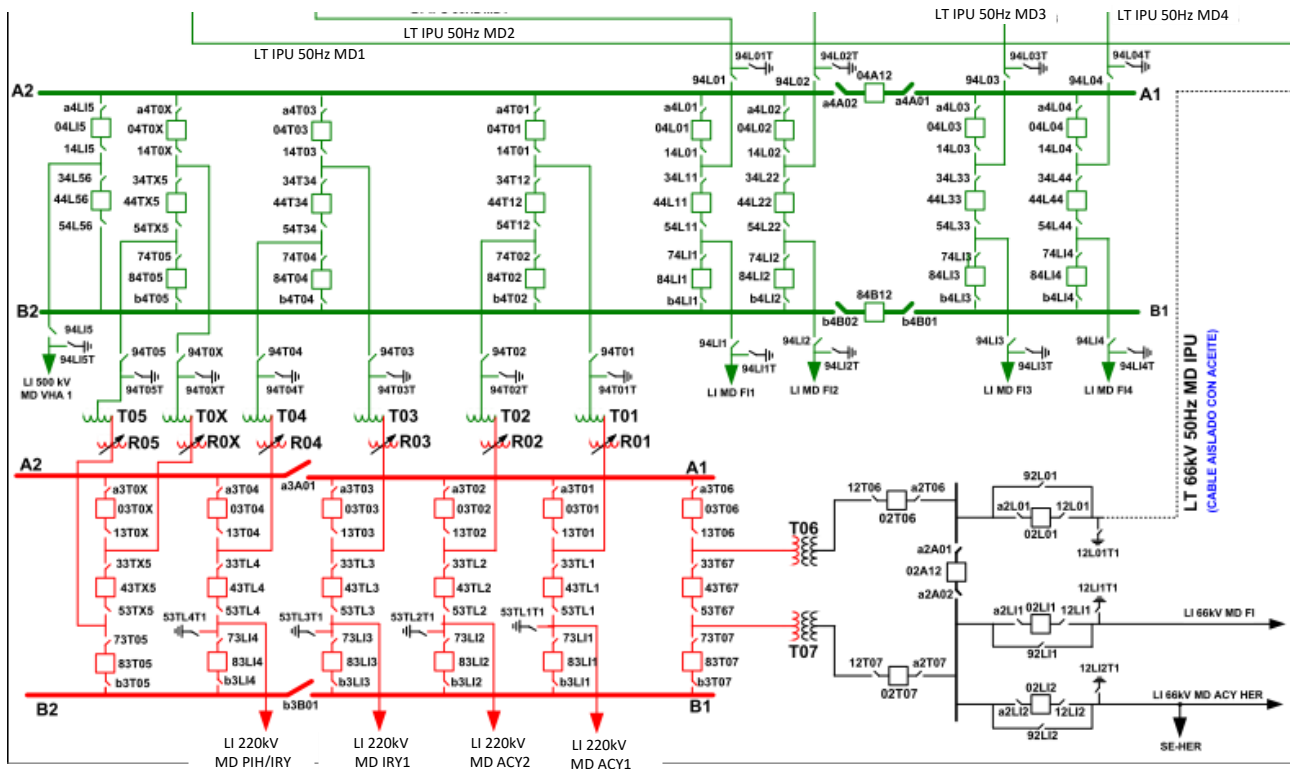


Figura 1 – Diagrama unifilar simplificado SEMD

En la década de 2000 fueron instalados los grupos T04/R04, T0X/R0X y en 2011/2012 el grupo T05/R05, todos estos tienen sistemas de protección con relés digitales.

Los transformador T06 y T07 de 220/66/13,8 kV y 25 MVA son fuentes principales de los servicios auxiliares de la SEMD, están en operación desde la etapa inicial de la SEMD y su protección también será sustituida.

3. SISTEMA DE PROTECCIÓN EXISTENTE

Actualmente cada grupo autotransformador/regulador (T01/R01, T02/R02, T03/R03) y transformador de servicios auxiliares (T06, T07) posee un sistema de protección primaria y alternativa que utiliza relés estáticos de la BBC, de los modelos DT92 y DT94 para la protección diferencial e IC91 para las protecciones de sobrecorriente.



XIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
06 y 07 de Setiembre de 2018

Fue identificada la necesidad de sustituir estos relés debido a su obsolescencia: han dejado de fabricarse y ya no se consiguen piezas de repuesto, lo cual implicará su indisponibilidad forzada en el futuro. Hoy en el mercado están disponibles relés de tecnología más avanzada, con mejor desempeño en cuanto a rapidez de actuación, seguridad y autodiagnóstico. Por otro lado, se registraron eventos de actuaciones indebidas de la protección en relés similares utilizados en los servicios auxiliares de la Casa de Máquinas.

Por este motivo se dio inicio a un proceso de adquisición de nuevos sistemas de protección para sustitución de los mismos. Como resultado de una licitación pública binacional fue contratada en 2018 la empresa Schweitzer Engineering Laboratories para suministro y montaje de los nuevos sistemas de protección.

4. DESCRIPCIÓN DEL NUEVO SISTEMA DE PROTECCIÓN

El alcance del suministro comprende los equipos, materiales y servicios para la sustitución de paneles de protección de los grupos autotransformador/regulador T01/R01, T02/R02, T03/R03 y de los transformadores T06 y T07, en la Subestación Margen Derecha de la Central Hidroeléctrica de ITAIPU, incluyendo: proyecto detallado, hardware, software, materiales, componentes, accesorios, entrenamiento, estudio de selectividad y ajustes de la protección, configuración y parametrización de todos los equipos suministrados, ensayos de modelo, ensayos en fábrica, instalación, supervisión de ensayos en campo, colocación en servicio, documentación, transporte, y garantía.

4.1 Definiciones de proyecto adoptadas

Se ha decidido no reaprovechar la chapería ni los componentes auxiliares de los paneles existentes, instalados en la Casa de Relés de la SEMD, sino que serán suministrados paneles con todos los componentes totalmente nuevos, con la ventaja que el conjunto será íntegramente ensayado en la fábrica antes de su transporte y no será necesaria retirar de servicio los paneles durante un largo tiempo, como sería en el caso de sustituir los relés de protección existentes por nuevos realizando las adaptaciones in situ. Los nuevos paneles serán montados exactamente en la misma ubicación que los existentes.

Fue definido que para este proyecto serán reutilizados los cables de interconexión con los transformadores de corriente, debido a la dificultad de lanzar nuevos cables por estar saturados los pasos de cables en varios puntos. Sin embargo dentro del suministro está prevista una cierta cantidad de cables de reserva que serán utilizados en el caso que sea necesario sustituir cables dañados en el proceso de sustitución de los paneles. Debido a que los cables existentes pueden quedar cortos para los paneles nuevos, las borneras de corriente deberán ser ubicadas lo más bajo posible dentro del panel, pues la entrada de cables es por debajo.

En este proyecto las salidas de disparo de los nuevos IEDs de protección serán direccionadas hacia las bobinas de disparo de los interruptores, a través de las reglas de bornes existentes en los paneles de control de los vanos situados en la misma Casa de Relés de la SEMD y reutilizando el cableado existente.



4.2 Características técnicas de los IEDs de Protección

Relé SEL 487-E para protección multifuncional, tipo SEL-487E para protección de transformadores y autotransformadores de hasta 5 devanados, circuitos de entrada industrial, reactores y grupo generador - transformador. Funciones de Protección disponible: 87, 87Q, 50/51, 50/51G, 50/51Q, 50/51N, 51S, 51V/C, 67/67G/67Q, 67N, 32, 50/62BF, REF (67G), 46, 24, 27/59, 59G, 59Q (47), 81, 49, 25. Número de entradas binarias y contactos de salidas digitales: 23 entradas y 24 salidas digitales (siendo 16 salidas de alta capacidad/velocidad). Integración: 1 puerta serial EIA-232 frontal; 3 puertas seriales EIA-232 traseras; 1 puerta Ethernet trasera 10/100BASE-T conector RJ45 y 1 puerta Ethernet trasera 100BASE-FX - conector LC. Sincronización horaria por IRIG-B o SNTP. Protocolos: Serial: DNP3.0 Serial, Compressed ASCII, Fast Meter, Fast SER, Fast Operate e LMD. Ethernet: IEC 61850, PRP, DNP3.0 LAN/WAN, Telnet, FTP.

4.3 Funciones de Protección

4.3.1. Función protección diferencial

La función de protección diferencial 87 será implementada como instancias del nodo lógico (LN) de la clase PDIF conforme IEC61850. Serán implementadas tres instancias de protección diferencial, tanto en la protección primaria como en la alternativa: 87T para el autotransformador, 87R para el regulador y 87TR para el grupo.

Los relés diferenciales modernos usan valores instantáneos de las corrientes o cantidades fasoriales para los cálculos de la corriente diferencial. Para las aplicaciones de protección de transformadores, el relé aplica compensaciones de escala y desplazamiento angular a las corrientes en los terminales del transformador, según la ecuación:

$$i_D = i_{W1} + i_{W2}$$

Donde:

i_D es la corriente instantánea diferencial;

i_{W1} es la corriente instantánea compensada entrando al terminal 1 del transformador medida por el relé;

i_{W2} es la corriente instantánea compensada entrando al terminal 2 del transformador medida por el relé.

El elemento diferencial porcentual genera una señal de disparo cuando la corriente de operación I_{OP} es mayor que la corriente de restricción I_{RT} y que un valor mínimo ajustado, siendo:

$$I_{OP} = | I_{W1} + I_{W2} + \dots + I_{WN} | \quad \text{magnitud de la suma fasorial de las corrientes compensadas}$$

Expresiones típicas para el cálculo de la corriente de restricción I_{RT} son:

$$I_{RT} = k (| I_{W1} | + | I_{W2} | + \dots + | I_{WN} |) \quad \text{suma de las magnitudes de las corrientes compensadas multiplicada por un factor de escala } k$$

$$I_{RT} = \text{Máx} (| I_{W1} | , | I_{W2} | , \dots , | I_{WN} |)$$

XIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
06 y 07 de Setiembre de 2018

El factor de escala se fija usualmente entre 0,5 y 1,0. Los relés 487-E de la Schweitzer utilizan el factor $k = 1,0$. El elemento diferencial genera una señal de disparo si la corriente de operación I_{OP} es mayor que la corriente mínima de ajuste I_{PU} y además es mayor que un porcentaje de la corriente de restricción I_{RT} .

$$I_{OP} > I_{PU}$$
$$I_{OP} > SLP * I_{RT}$$

Donde:

SLP es la pendiente, un ajuste del relé.

I_{PU} es la corriente mínima de ajuste

La figura 2 muestra la característica de operación correspondiente a una pendiente simple, en color rojo. Esta característica aparece como una línea recta con pendiente igual a SLP y una línea recta horizontal definida por la mínima corriente de pickup del elemento diferencial. La región de operación se localiza arriba de la característica, y la región de restricción está por debajo de la característica.

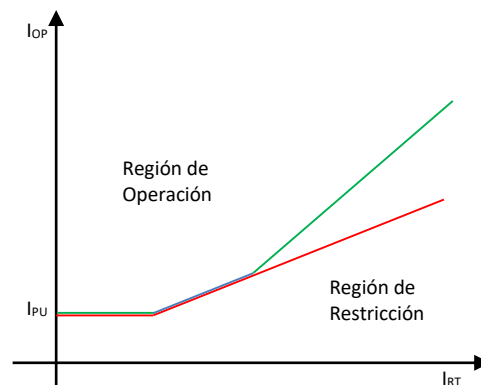


Figura 2 – Característica de operación de la protección diferencial

Idealmente, la corriente de operación I_{OP} debe sólo exceder a I_{PU} y al producto $SLP * I_{RT}$ para faltas dentro de la zona de protección del elemento diferencial, que está definida por la ubicación de los transformadores de corriente. El elemento diferencial no debe operar para faltas externas a esta zona, o para condiciones normales de operación. Si uno o más de los transformadores de corriente se satura, debido a faltas externas con valores elevados, la corriente diferencial resultante puede causar una operación indebida de la protección diferencial. La pendiente característica del elemento diferencial porcentual provee seguridad para faltas externas que causan saturación de transformadores de corriente. Una característica con doble pendiente incrementa aún más la seguridad del relé frente a faltas externas con altas corrientes, conforme se muestra en la característica de color verde. El relé SEL-487E provee además una característica adaptativa, donde la pendiente simple se incrementa cuando la lógica detecta una falta externa, agregando seguridad al esquema y sensibilidad para faltas internas.

La saturación de los transformadores de corriente no es la única causa de corrientes diferenciales indeseadas. Las corrientes de magnetización o *inrush*, la sobreexcitación de los transformadores, retraso en la conmutación entre fases del conmutador automático de derivaciones y la variación de



las relaciones de transformación causadas por un regulador de tensión que cambia las derivaciones en carga, producen corrientes diferenciales.

Las posibles causas de corrientes de *inrush* incluyen energización del transformador, recuperación de la tensión después de la eliminación de una falta externa y energización de un transformador en paralelo con el transformador que ya está en servicio. Las características de la corriente de magnetización son: elevada intensidad, que a menudo excede la nominal del transformador, elevado contenido de armónicos y de componente de corriente continua. Los valores de pico de la corriente de *inrush* decrecen muy lentamente. Típicamente, la constante de tiempo de la corriente de *inrush* es mucho mayor que la de la componente de corriente continua de la corriente de falta. El flujo magnético en el núcleo del transformador es directamente proporcional a la tensión aplicada e inversamente proporcional a la frecuencia del sistema eléctrico de potencia. Condiciones de sobretensión y/o subfrecuencia pueden causar sobreexcitación que satura el núcleo del transformador, e incrementa la corriente de excitación, ruido y vibración. La operación de la protección diferencial debe ser bloqueada durante condiciones de sobreexcitación. La protección diferencial debe aplicar métodos basados en el contenido de armónicos o la forma de onda para diferenciar las faltas internas a la zona protegida de las condiciones de *inrush* o sobreexcitación. Los relés usan el segundo y cuarto armónicos de la corriente diferencial para bloquear o restringir la operación de la protección diferencial en condiciones de *inrush*. Para condiciones de sobreexcitación se utiliza el quinto armónico para bloquear o restringir la operación del elemento diferencial.

El bloqueo o restricción de estos armónicos es utilizado para evitar actuaciones indebidas de la protección diferencial durante la energización o sobreexcitación de transformadores de potencia.

La restricción consiste en la suma de los 2°, 4° e 5° armónicos de corriente a la corriente de operación del IED para que la característica de operación permanezca operativa durante el *inrush* o sobreexcitación.

La elección entre un método u otro (o ambos cuando el IED lo permite) debe quedar a criterio del ingeniero de protección o de la filosofía de protección adoptada por la empresa.

4.3.2. Protección de falla de interruptor (50/62BF)

Los IEDs de protección de barras serán suministrados con funciones de protección de falla de interruptor implementada como una instancia del nodo lógico (LN) de la clase RBRF conforme IEC61850, para cada uno de los interruptores vinculados al grupo autotransformador/regulador, con redundancia entre protección primaria y alternativa. La falla de un interruptor deberá llevar al disparo y bloqueo de todos los interruptores adyacentes.

5. ARQUITECTURA DE COMUNICACIÓN

Las redes de comunicación se basan sobre una topología estructurada en dos niveles: el nivel de la estación y el nivel de los vanos. Las redes de acceso local - LAN serán del tipo mixto (en parte anillo óptico y en parte estrella óptica), estructurada sobre la base de switches Ethernet. Dichas

XIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
06 y 07 de Setiembre de 2018

redes de acceso local LAN utilizan fibras ópticas para interconexión de los diferentes IEDs. Las redes implementan los servicios, modelos de objetos, interfaces de comunicación, etc., conforme definido en la norma IEC 61850 siendo de esta manera las arquitecturas totalmente compatibles con la referida norma.

El nivel de la estación está constituido por una estación de ingeniería con doble función:

- configuración/parametrización del sistema y de los IED's;
- Recuperación y análisis de datos de oscilografía almacenados en los IED's de protección de las líneas de transmisión de 500 kV

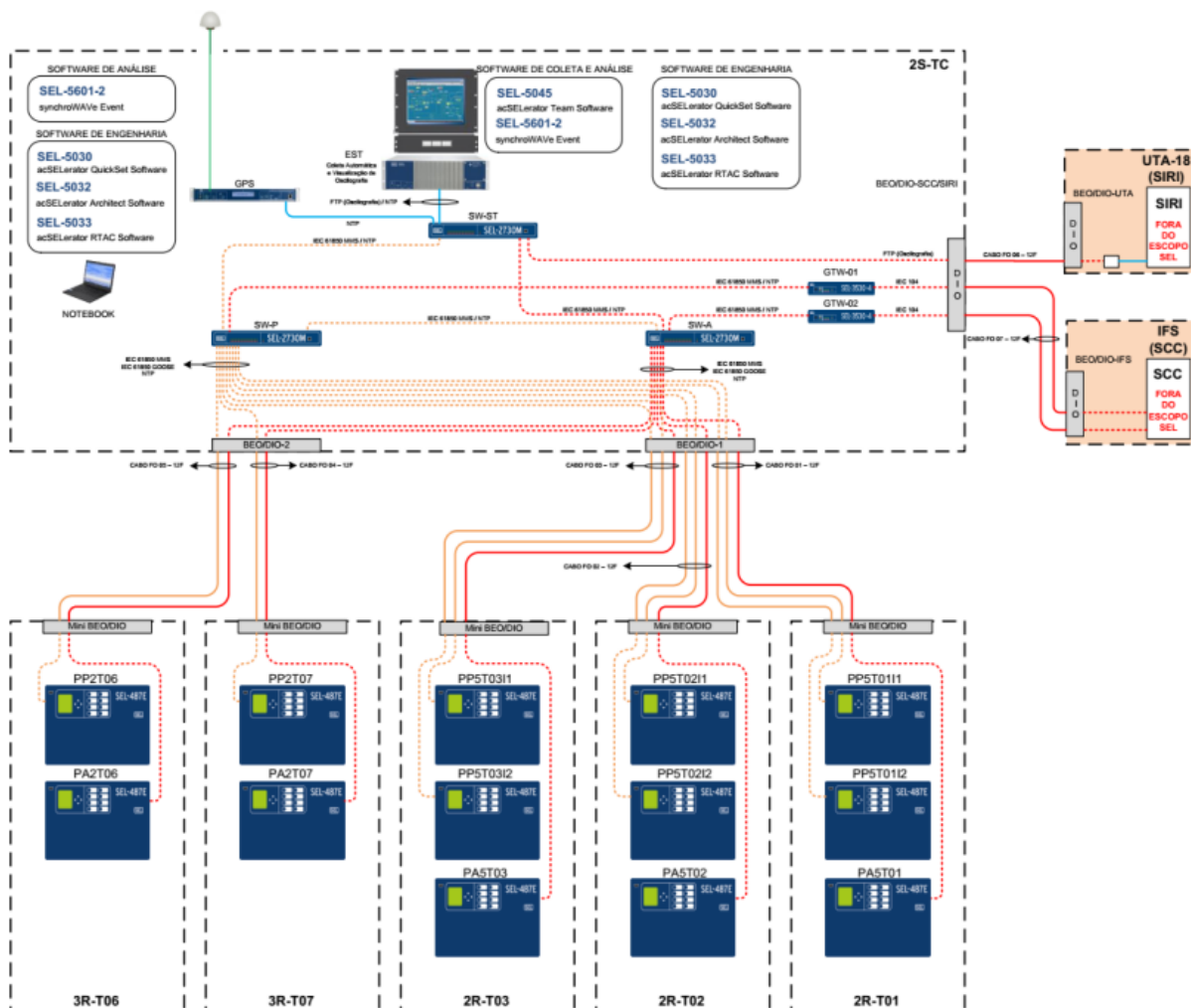


Figura 3 – Arquitectura lógica de la red de comunicaciones

Será suministrado un panel de ingeniería y comunicaciones, que será instalado en la Casa de Relés de la SEMD y contendrá los switches, los gateways de comunicación redundantes, reloj GPS y la estación donde serán instalados los software de ingeniería y mantenimiento.



Comité Nacional Paraguayo



Unión de Ingenieros de ANDE

XIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
06 y 07 de Setiembre de 2018

Será implantada una red de fibra óptica multimodo para integración del panel de ingeniería y comunicaciones con los nuevos paneles de protección y también con los sistemas SCC (Sistema de Control Computadorizado de supervisión de la SEMD) y SIRI (sistema de redes industriales para acceso remoto a los archivos de oscilografía).

El panel de ingeniería y comunicaciones cumplirá con las siguientes funcionalidades:

- Red de comunicación IEC61850 de alta disponibilidad apropiada para el tráfico de mensajes MMS y GOOSE generados por los IEDs de protección.
- Señalización para el Sistema de Control Centralizado (SCC), sistema de supervisión local de la SEMD, usando mensajes MMS vía gateways de comunicación donde será hecha la conversión para el protocolo IEC 60870-5-104;
- Los mensajes GOOSE serán utilizados para intercambio de señales de bloqueo y liberación de bloqueo;
- Registro, colecta automática y acceso remoto a los archivos de oscilografía generados por los IEDs de protección;
- Registro de eventos (SOE) de los IEDs de protección;
- Interface Hombre-Máquina (IHM) para ejecución local de tareas de ingeniería y de mantenimiento, incluyendo configuración, parametrización y ajustes de los IEDs de protección;
- Fuente primaria de sincronismo de tiempo para los IEDs de protección;

En este proyecto se dará especial importancia a la seguridad cibernética, algunas de las medidas que serán adoptadas:

En el proyecto será tomado especial cuidado en tomar medidas relacionadas a las cuestiones de seguridad cibernética, como ser:

Para los computadores con sistema operacional Windows/Linux

- Deshabilitar "Auto Run" y "Auto Play" para todos los drives en sistemas Windows;
- Utilizar señas complejas (mínimo 7 caracteres con combinación de números, letras y caracteres especiales);
- Deshabilitar cuenta "Guest";
- Deshabilitar opción de compartir archivos. Ajustar los permisos de seguridad correctamente: no seleccionar las opciones "Everyone" o "World";
- Aplicar actualizaciones de seguridad en el sistema operacional;
- Aplicar actualizaciones de seguridad em los softwares;
- Utilizar políticas "anti-malware", ejemplo: Whitelist, Anti-Virus, o "restricting endpoints" (USB);
- Generar un backup del sistema de forma que pueda ser restaurado;



XIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
06 y 07 de Setiembre de 2018

- Habilitar el firewall padrón del sistema operacional y bloquear puertas utilizadas por malware conocidos.

Dispositivos de red

- Restringir el acceso en el nivel de red y cuentas;
- Habilitar el registro "Logging" de seguridad en todos los dispositivos de red;
- No utilizar señas padrón o sistema sin seña para todos los dispositivos de red. Asegurar que las señas sean únicas en los dispositivos.
- Deshabilitar protocolos con texto simple (ejemplo: telnet, http) y utilizar protocolos seguros (ejemplo: HTTPS, SSH, SFTP);
- Restringir la conexión directa con internet o utilizar un firewall con la política "deny by default";
- Aplicar actualizaciones de seguridad en todos los dispositivos de red.

Procesadores de comunicación e IED's

- No utilizar señas padrones; (ejemplo: "OTTER", "TAIL");
- Deshabilitar todas las puertas no utilizadas;
- Definir y habilitar el nivel máximo de acceso a las puertas.

6. Servicios de ingeniería, ensayos e instalación

6.1 Proyecto constructivo y ejecutivo

El proyecto constructivo incluye los diagramas unifilares, trifilares, funcionales, lógicos, listas de materiales y diseños de montaje y cableado interno de los paneles nuevos a ser suministrados, que deberán ser aprobados por la ITAIPU antes de su fabricación.

En el proyecto ejecutivo deberán ser elaborados planos de montaje, diagramas de interconexión, y planillas de comisionamiento necesarios para la instalación, comisionamiento y puesta en servicio de los sistemas de protección de barras. Además deberá ser actualizada toda la documentación de proyecto existente con la información relativa a los nuevos paneles.

6.2 Ensayos en fábrica

Los paneles pasarán por una etapa de ensayos en fábrica con la presencia de inspectores de la ITAIPU antes de su transporte. Previamente la contratada presentará para aprobación un plan de inspección y ensayos. Se realizarán en dos etapas: en la primera los paneles se ensayarán individualmente y luego en el ensayo de plataforma se verificará la operación y comunicación integrada entre ellos.



XIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
06 y 07 de Setiembre de 2018

6.3 Ensayos de modelo en simulador de tiempo real

Los IEDs de protección, serán sometidos a ensayos dinámicos en simulador digital en tiempo real de sistemas eléctricos (RTDS), donde las diversas condiciones operativas deberán ser reproducidas en un entorno que modela el sistema eléctrico de potencia en el que serán instalados.

Antes de los ensayos será modelado el sistema eléctrico en software de simulación de transitorios ATP/EMTP para validación del modelo que será utilizado en el ensayo dinámico. Después de esta verificación, será implementado el modelo validado en el software RSCAD propio del simulador.

En los ensayos serán considerados escenarios de máxima y mínima generación y faltas internas y externas a la barra, monofásicas, bi y trifásicas con y sin contacto a tierra y con ángulo de desfasaje de la tensión de 0° y 90° en el instante de la falta y con baja y alta resistencia de falta. Además se verificará la correcta operación de los IEDs de protección con sobre y sub frecuencia en el sistema eléctrico antes, durante y después de la ocurrencia de la falta.

6.4 Instalación y ensayos de comisionamiento

Los ensayos de comisionamiento de los paneles en el campo serán hechos por la ITAIPU, bajo la supervisión de la CONTRATADA, consisten básicamente en la repetición de los ensayos realizados en fábrica y además se verifica la actuación real de los disparos y bloqueos sobre los interruptores. Los trabajos exigen la desconexión de los transformadores durante todo el periodo de sustitución de los paneles de protección, estimado en doce días corridos.



Comité Nacional Paraguayo



Unión de Ingenieros de ANDE

XIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
06 y 07 de Setiembre de 2018

BIBLIOGRAFIA

- [1] Ferrer, Hector J. Alturo; Schweitzer, Edmund O. III. *Modern Solutions for protection, control and monitoring of electric power systems*. SEL Inc, Pullman WA, 2011, pág. 105.
- [2] Rossi, Ronaldo. *Proteção de Transformadores. Curso CEPSE Proteção de Sistemas Elétricos de Potência*. Universidade Federal de Itajubá, 2011, pág. 38.
- [3] *Usina Hidrelétrica de Itaipu – Aspectos de Engenharia. Realização da Diretoria Técnica da Itaipu Binacional*; Coordenação Geral da Superintendência de Engenharia; Apoio da Assessoria de Comunicação Social; Execução Gráfica de TAB Marketing Editorial, Foz do Iguaçu, 2009.