

## **SUSTITUCIÓN Y ACTUALIZACIÓN TECNOLÓGICA DE LOS SISTEMAS DE PROTECCIÓN DE BARRAS DE 500 Kv, 50 Y 60 HZ EN LA SUBESTACIÓN BLINDADA AISLADA EN SF6, CASA DE MÁQUINAS DE LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA ITAIPU**

**Jorge Andrés Silva Stransky**

**Julio César Montanía Escobar**

**ITAIPU BINACIONAL**

**PARAGUAY**

### **RESUMEN**

Los sistemas de protección diferencial de las barras de 500kV en la Subestación aislada en SF6 serán sustituidos en breve, debido a la obsolescencia de los equipos existentes. Será utilizado un sistema redundante con protección primaria y alternativa de tecnología concentrada para cada una de las barras.

Los nuevos sistemas de protección estarán basados en la utilización de IEDs de protección que serán integrados en una red de comunicaciones compatible con la norma IEC61850, dividida en dos sectores, de 50 y 60 Hz e integrada con el sistema SCADA de la Casa de Máquinas utilizando gateways de comunicación.

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 indisponibilidad de equipos, debido a los compromisos de suministro de energía de la Usina de ITAIPU a los sistemas eléctricos brasileño y paraguayo.

### **PALABRAS CLAVES**

**PROTECCIÓN DE BARRAS, IEC61850, RETROFIT, ACTUALIZACIÓN TECNOLÓGICA, MODERNIZACIÓN.**

## 1 INTRODUCCIÓN

Cuando ocurre una falta en barra, de todos los terminales provienen contribuciones a la corriente de cortocircuito, que puede alcanzar valores muy elevados. La protección de barras requiere por lo tanto gran selectividad, precisión y velocidad de actuación en la eliminación de fallas. Cuando ejecutada con eficiencia, garantiza no solo la mitigación de los daños a los equipos, sino también la estabilidad del sistema eléctrico como un todo [1].

En la aplicación de la protección de barras concurren razones básicas de filosofía de protección, como la conciencia de la pequeña probabilidad de ocurrencia de una falta en barras y la certeza de grandes daños materiales y severos problemas operativos en la hipótesis de tal falta no ser eliminada con selectividad y rapidez suficiente. Además de eso, los esquemas de protección de barras deben garantizar medición correcta de los defectos internos y externos, aún en condiciones desfavorables como la saturación de transformadores de corriente y la existencia de ruido provocado por fallas con arcos. Siempre que sea posible aislar la parte defectuosa de una barra, el esquema de protección debe ser capaz de hacerlo, sin imponer restricciones a maniobras, adaptándose automáticamente a las configuraciones impuestas.

La protección diferencial provee protección sensitiva para faltas fase-fase y fase tierra y preferencialmente se utiliza en la protección de barras debido a su selectividad inherente.[2] Los esquemas de protección diferencial deben mitigar el riesgo de operación indebida por faltas externas, debido a la saturación de los transformadores de corriente (TC). Un dimensionamiento inadecuado de los TC puede hacer que estos saturen en menos de un ciclo, limitando la aplicación segura de los esquemas de protección diferencial. [3]

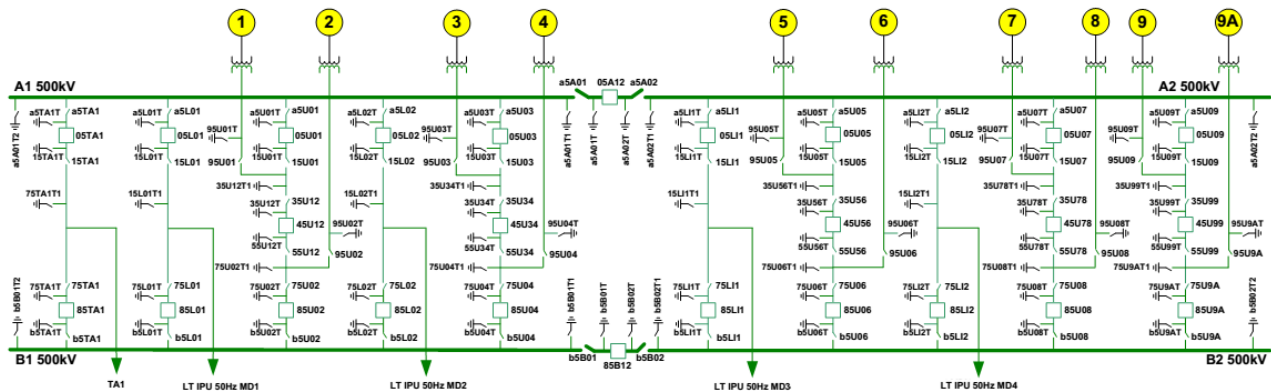
Se ha observado que las faltas en las barras son relativamente poco frecuentes comparadas con las faltas en las líneas. Las faltas en las barras son 6-7% de todas las faltas, mientras que las faltas en las líneas alcanzan al 60%.[4] Justamente por operar tan pocas veces a lo largo de su vida útil, es ideal que un esquema de protección de barra tenga auto-supervisión. De esta manera él se vuelve prácticamente independiente del mantenimiento preventivo, señalizando e identificando, tanto cuanto posible, sus propios defectos.

En este artículo será descrito el proyecto de substitución de la protección diferencial de barras, existente en la subestación aislada en SF<sub>6</sub> de la Usina Hidroeléctrica de ITAIPU, por un sistema de protección de barras basado en IEDs de protección de barras compatibles con la norma IEC61850.

## 2 SUBESTACIÓN AISLADA EN SF<sub>6</sub> DE LA CASA DE MÁQUINAS

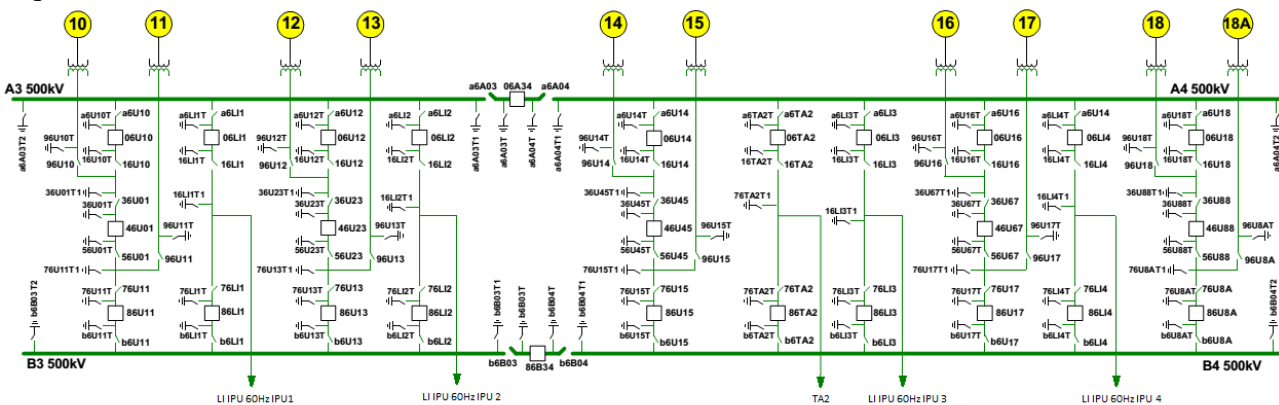
La instalación de una subestación de 500 kV aislada en gas SF<sub>6</sub> en la Casa de Máquinas de la Usina de ITAIPU, debido a sus dimensiones compactas permitió una disposición óptima de las líneas de transmisión que salen de la Casa de Máquinas. De otro modo sería imposible mantener las distancias de aislación necesarias entre las líneas, debido al limitado espacio disponible. Los equipos de alta tensión están montados en la galería de la elevación 128,20 entre ejes A y B, directamente arriba de los bancos de transformadores elevadores de las unidades generadoras, y separados en dos sectores de 50 y 60 Hz. En la misma galería están montados los paneles de protección de barras. La disposición de los vanos es de interruptor y medio para las unidades

generadoras y de dos interruptores para las líneas de transmisión y los transformadores principales de los servicios auxiliares.



**Figura 1: Subestación aislada en SF6 - Diagrama unifilar del sector de 50 Hz**

En el sector de 50 Hz las barras A1, A2, B1 y B2 tienen todas 6 terminales. En el sector de 60 Hz las barras A3 y B3 tienen 5 terminales y A4 y B4 tienen 7 terminales. El requisito de tener como mínimo 21 entradas de corriente para cubrir las necesidades de las barras A4 y B4 fue importante para la selección de los IEDs de protección, pues son pocos los equipos que cumplen con este requisito.



**Figura 2: Subestación aislada en SF6 - Diagrama unifilar del sector de 60 Hz**

### 3 PROTECCIÓN DE BARRAS EXISTENTE

Actualmente cada barra está protegida por un relé de protección primaria diferencial de alta impedancia modelo IZX1A del fabricante BBC y por un relé de protección alternativa diferencial de baja impedancia tipo INX2 del mismo fabricante. Los paneles de protección primaria y alternativa de barras que contienen estos relés están montados en la misma galería. Cada panel contiene dos relés de protección diferencial de barras, así por ejemplo BBP-A1B1 y BAP-A1B1 son los paneles de protección primaria y alternativa respectivamente de las barras A1 y B1.

Además los paneles de protección alternativa de barras contienen relés IRX139b para implementar la función de falla de interruptor acoplador y los relés de bloqueo de la barra asociados al esquema de falla de interruptor. Los relés de protección de falla de interruptor de los demás ramales son parte de la protección de la unidad generadora, línea o transformador, según sea el caso.

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, el 29/03/11 en la Subestación Margen Derecha hubo interrupción de la interconexión Itaipu-ANDE, debido a la desconexión de las barras A2 y B2 de 500kV. La desconexión de las barras fue por falla en el sistema de diagnóstico de la protección diferencial de barras, que en la época era implementada con un relé INX2 similar al utilizado en la Casa de Máquinas, lo que comienza a arrojar dudas sobre la confiabilidad de estos sistemas. Por este motivo se dio inicio inmediato, urgente a un proceso de adquisición para sustitución de los mismos. Como resultado de una licitación pública binacional fue contratada la empresa Schweitzer Engineering Laboratories para suministro y montaje de los nuevos sistemas de protección de barras.

## 4 DESCRIPCIÓN DEL NUEVO SISTEMA DE PROTECCIÓN DE BARRAS

### 4.1 *Definiciones de proyecto adoptadas*

Se ha decidido no reaprovechar la chapería ni los componentes auxiliares de los paneles existentes, 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.

Los paneles existentes tienen acceso de cables por debajo y el espesor de la losa de piso es considerable. Están montados directamente sobre pasos de cables previstos en la estructura de hormigón.

Debido a que los cables de interconexión con los transformadores de corriente no se encuentran a la intemperie, sino están dispuestos en bandejas en la galería de la elevación 124,00 entre ejes A y B donde la temperatura es relativamente constante y por inspección visual se constata que están en buen estado está previsto reaprovecharlos totalmente. 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 los relés de disparo existentes en los paneles de control de los vanos situados en la misma galería de la elevación 124,00 y reutilizando el cableado existente.

## 4.2 Características técnicas de los IEDs de Protección de Barras

Relé SEL 487-B para protección diferencial de barras, con restricción porcentual, para hasta 07 vanos; funciones de protección disponibles: 87B, 50/62BF, 50/51, 27/59, 59G, 59Q; con 79 entradas digitales y 32 salidas digitales siendo 18 salidas digitales de alta capacidad/velocidad; Alimentación: 125/250 Vdc o 120/240 Vac; Sincronización horaria por IRIG-B o SNTP; Puertas de Comunicación: 1 puerta serial EIA-232 frontal, 3 puertas seriales EIA-232 traseras y 2 puertas ethernet 100BASE-FX; Protocolos de Comunicación: DNP3.0, ASCII, Compressed ASCII, Fast Meter, Fast SER, Fast Operate, DNP3 LAN/WAN e IEC61850.

## 4.3 Funciones de Protección

### 4.3.1. Función protección diferencial de barras (87B)

La función de protección diferencial de barras 87B será implementada como una instancia del nodo lógico (LN) de la clase PDIF conforme IEC61850. Cada elemento de protección consiste en tres elementos lógicos:

- Elemento diferencial porcentual que utiliza valores de los fasores.
- Elemento direccional que utiliza valores de los fasores.
- Lógica de detección de faltas que utiliza valores instantáneos.

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:

$I_{OP} = | I_1 + I_2 + \dots + I_N |$  magnitud de la suma fasorial de las corrientes de la barra

$I_{RT} = k ( | I_1 | + | I_2 | + \dots + | I_N | )$  suma de las magnitudes de las corrientes de la barra multiplicada por un factor de escala k

El elemento direccional selecciona uno de los terminales de la zona de protección como referencia y compara el ángulo de la corriente en este terminal con el ángulo de la corriente de todos los otros terminales dentro de la zona de protección. Si la diferencia en ángulo entre la corriente en el terminal de referencia y la corriente en cada uno de los otros terminales está dentro de la región de operación del elemento direccional, entonces se confirma que se trata de una falta interna.

La lógica de detección de faltas distingue entre faltas internas y externas y compara el cambio en la corriente instantánea de operación con el cambio en la corriente instantánea de restricción. Cuando la corriente de restricción se incrementa y la corriente de operación no aumenta después que comienza la saturación del transformador de corriente, la lógica declara una falta externa y bloquea el disparo de la protección diferencial.[3]

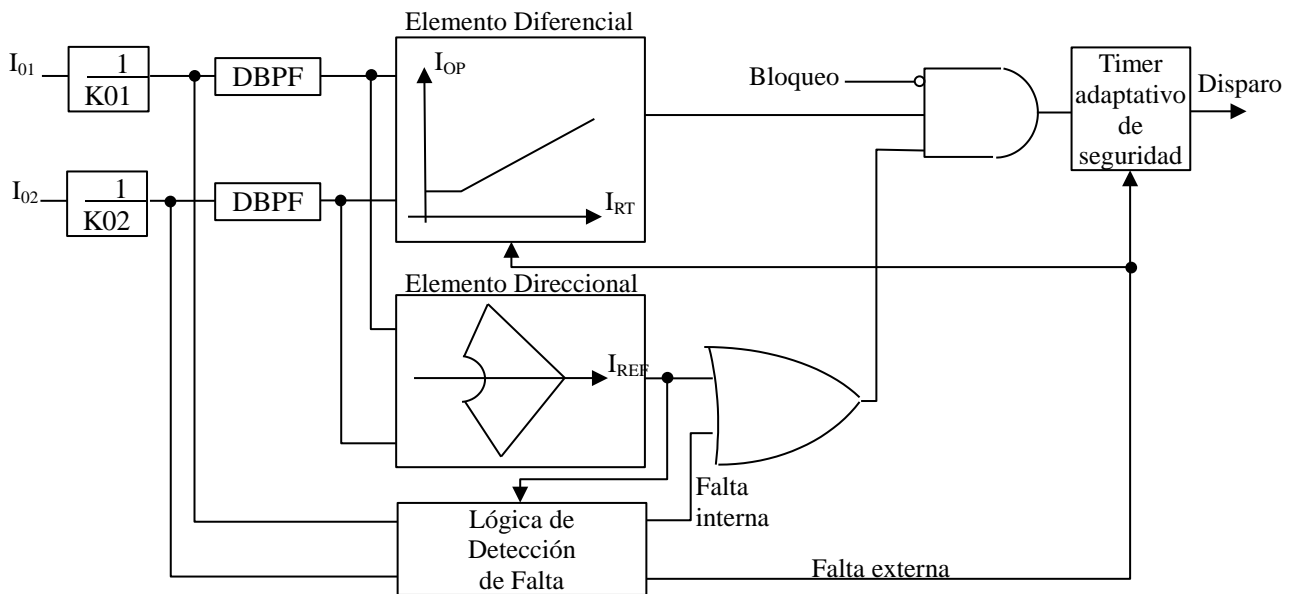


Figura 3 – Lógica interna de la función 87B

#### 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, solamente para los interruptores de acoplamiento de barras de 500 kV. La protección de falla de los demás interruptores está instalada en los paneles de protección de las respectivas unidades generadoras, línea de transmisión y transformadores de servicios auxiliares, según sea el caso y actúan sobre los relés de bloqueo de la barra. La falla de un interruptor deberá llevar al disparo y bloqueo de todos los interruptores de la barra.

## 5 ARQUITECTURA DE COMUNICACIÓN

Las redes 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 redes de acceso local LAN utilizan fibras ópticas para interconexión de los diferentes IEDs. Ambas 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.

En cada sector, 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

La plataforma computacional utilizada para la estación de ingeniería será del tipo SEL-3355, computador industrial con procesador Intel Core i7-3555LE Dual-Core 2.5 GHz, memoria RAM de 8 GB DDR3 ECC; 2 puertos USB frontales y 04 puertos USB traseros; 2 puertos seriales traseros EIA-232/EIA-485 con tasas de transmisión 300 – 115.200 bps; 2 puertos de comunicación Ethernet 10/100/1000 BaseT independientes; montaje en rack; HD de 60GB Industrial Grade SLC SSD. Sistema operacional: Microsoft® Windows® 7 Ultimate.

Además, este nivel de estación posee el gateway para la comunicación de este sistema con el Sistema SCADA. Será utilizado hardware concentrador y servidor de protocolos de comunicación SEL-3530-4, con 4 puertos seriales traseros EIA-232 o EIA-485, 2 puertos Ethernet traseros 100BASE-FX, 1 puerto USB para parametrización y diagnóstico, sincronización horaria via entrada de señal IRIG-B modulado/demodulado o NTP, salida de señal IRIG-B via conector BNC y a través de las puertos seriales y servidor NTP. Soporta protocolos de comunicación:

- Cliente: SEL, DNP3, Modbus, C37.118 Synchrophasors, L&G 8979, IEC 61850 MMS;
- Servidor: SEL, DNP3, Modbus, L&G 8979, SES-92, IEC 60870-5-101/104;
- Peer-to-Peer: MIRRORED BITS®, IEC 61850 GOOSE;

En este nivel de estación, en cada sector, también está prevista una interconexión con el sistema externo SIRI, del cual se recibe una señal de sincronización de tiempo a través del protocolo SNTP.

Serán suministrados dos paneles para las Estaciones de Ingeniería, uno para el sector de 50 Hz y otro para el sector de 60 Hz. Estos paneles abrigarán los switches, los gateways y las estaciones de ingeniería. Los paneles de Ingeniería serán montados en la sala de comunicaciones existente en la elevación 128 bloque de la U08.

## **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.

### **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 desfase de la tensión de  $0^\circ$  y  $90^\circ$  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.

Se ha verificado que no existen en el mercado simuladores disponibles para simular las 21 corrientes necesarias en este proyecto, por lo tanto, en los ensayos se deberá utilizar equivalentes de los vanos similares donde no hay falta aplicada para simplificar el sistema.

### **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. Está previsto iniciar el procedimiento de sustitución por la protección primaria de barras, pues los equipos existentes solamente tienen la función de protección de falla de interruptor en la protección alternativa. Antes de las desconexiones viene un periodo de trabajos preliminares, entre ellos lanzamiento y preparación de cableado complementario.

En la segunda etapa se deben realizar desconexiones sucesivas de dos barras, por ejemplo para el panel BBP-A1B1 se deben desconectar sucesivamente las barras A1 y B1, para cortocircuitar los transformadores de corriente, desconectar y aislar todos los cables de interconexión y luego retirar el panel de protección principal. Vuelven las dos barras a entrar en operación apenas con la protección de barras alternativa existente, que incluye protección diferencial de barras y esquema de protección de falla de interruptor.

Luego viene una tercera etapa de trabajos de montaje, preparación y ensayos off-line del nuevo panel de protección primaria.

En la cuarta etapa se vuelven a desconectar sucesivamente las dos barras para conectar los cables y realizar los ensayos finales de comisionamiento de la protección primaria. Terminados estos servicios, entran en operación dos protecciones: la primaria nueva (que ya dispone también del



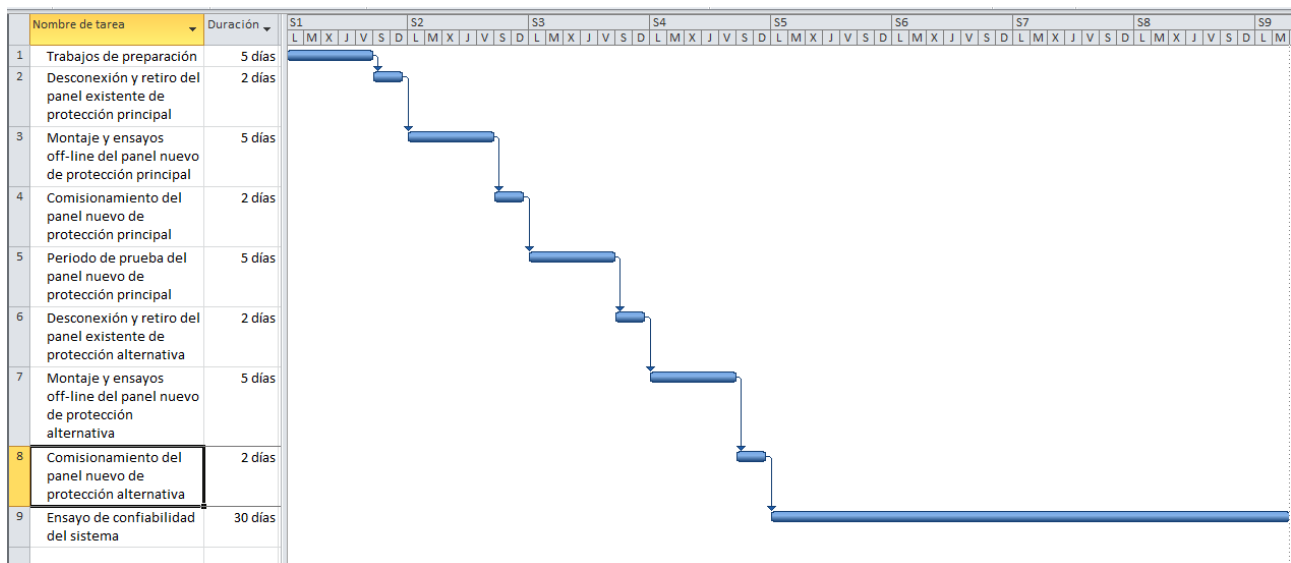
**XI SEMINARIO DEL SECTOR ELÉCTRICO PARAGUAYO – CIGRÉ Paraguay**  
**24, 25 y 26 de Setiembre de 2014**

esquema de falla de interruptor) y la alternativa existente. En la quinta etapa se deja una semana para hacer el monitoreo del desempeño del nuevo panel de protección principal.

En la sexta etapa se desconectan sucesivamente las dos barras para retirar el panel existente de la protección alternativa, con un procedimiento similar a la primera etapa. Vuelven las barras a entrar en operación apenas con el panel nuevo de la protección principal.

La séptima etapa consiste en trabajos de preparación y ensayos off-line del nuevo panel de protección alternativa.

La octava etapa consistirá en la desconexión sucesiva de ambas barras para conectar los cables y realizar los ensayos finales de comisionamiento de la protección alternativa. Finalmente vuelven las dos barras ya con los dos nuevos paneles de protección en operación. En este momento se inicia un periodo de ensayo de confiabilidad de treinta días, en el cual se observa el desempeño de los sistemas antes de emitir la aprobación final.



**Figura 4 – Cronograma preliminar para sustitución de la protección de las barras A1 y B1**

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Apostolov, Alexander – “Aplicações da IEC61850 na Proteção de Barramentos” in X SBPC – Seminário Técnico de Proteção e Controle. Recife, Oct. 2010.
- [2] Blackburn, J.L. – *Protective Relaying – Principles and Applications*. Third edition. Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL. 2006, pág. 394.
- [3] 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. 135
- [4] Anderson,P.M. *Power System Protection*. IEEE Press. Wiley Interscience. Piscataway, NJ. 1999.