



## Experiencia de la Itaipú Binacional en el Retrofit de las Protecciones de las Barras de 500kV de la Subestación Blindada a Gas – SF6

**Ing. Charles Robert Santacruz**

División de Mantenimiento Electrónico – SMME.DT

Itaipu Binacional

Central Hidroeléctrica de Itaipu

[charlesr@itaipu.gov.py](mailto:charlesr@itaipu.gov.py)

+595-61-599-4717

**Ing. André Luiz Jordão**

División de Ing. de Mant. Electrónico – SMIN.DT

Itaipu Binacional

Central Hidroeléctrica de Itaipu

[ajordao@itaipu.gov.br](mailto:ajordao@itaipu.gov.br)

+595-61-599-3036

**Ing. Vero León Sánchez Godoy**

División de Mantenimiento Electrónico – SMME.DT

Itaipu Binacional

Central Hidroeléctrica de Itaipu

[veroleon@itaipu.gov.py](mailto:veroleon@itaipu.gov.py)

+595-61-599-9403

**Ing. Julián Escurra Meza**

División de Ing. de Mant. Electrónico – SMIN.DT

Itaipu Binacional

Central Hidroeléctrica de Itaipu

[jem@itaipu.gov.py](mailto:jem@itaipu.gov.py)

+595-61-599-2714

### RESUMEN

La Itaipú es la responsable de entregar la energía producida en la central hasta los puntos de conexión con el Sistema Interconectado. En el lado paraguayo, la conexión se realiza en la Subestación Margen Derecha, situada dentro del área de la Central de Itaipu. En el lado brasileño, la conexión se localiza en la Subestación de Foz do Iguaçu, de propiedad de Furnas. La transmisión de la energía hasta los centros de consumo es de responsabilidad de la ANDE (Administración Nacional de Electricidad), en Paraguay, y de Furnas Centrais Elétricas, en Brasil.

El sistema de producción de energía de la Itaipú Binacional está dividido en dos sectores a saber, el sector de 60Hz y el sector de 50 Hz. Toda la energía generada por las unidades generadoras de 50hz y de 60hz es colectada en sus respectivos conjuntos de barras de la Subestación Blindada a Gas - SF6 de la casa de máquinas en 500kV.

El sector de 50Hz está compuesto por 4 sub-barras, denominadas A1, A2, B1 y B2, con una configuración de barra doble, acopladas a través de un interruptor de acoplamiento de la siguiente manera, A1-A2 y B1-B2. El sector de 60Hz también está compuesto por 4 sub-barras, denominadas A3, A4, B3 y B4, con una configuración de barra doble, acopladas a través de un interruptor de acoplamiento de la siguiente manera, A3-A4 y B3-B4.



**XII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
25 y 26 de Agosto de 2016**

Siendo un emprendimiento binacional, las “Barras” que reciben la energía producida por las unidades generadoras y que alimentan a las líneas de transmisión, son de vital importancia tanto para el mercado paraguayo como para el brasileño, ya que a través de ellas no solamente se conectan físicamente los sistemas eléctricos del Paraguay y del Brasil, sino también se suministra aproximadamente el 95% del consumo energético paraguayo y 17% del brasileño.

Por tal motivo, las protecciones con que cuentan estas “Barras” deben estar apoyadas en técnicas ampliamente consagradas.

Además, la importancia estratégica y las peculiaridades comerciales de la energía generada por la Itaipu son muy complejas, y siendo así, no se puede hablar de problemas adicionales oriundos de la protección de los componentes más importantes desde el punto de vista sistémico: “Las barras de alimentación”. Luego, la confiabilidad de la protección adquiere una dimensión sin precedentes cuando se tiene en cuenta que, en cada sector, 50 y 60 Hz, se puede llegar a despachar a través de las mismas hasta 7000 MW.

Considerando esta coyuntura, fue naturalmente necesaria la puesta en marcha del Retrofit del sistema de protección de las Barras de 500kV de la Subestación Blindada a Gas – SF<sub>6</sub>, debido a que el actual sistema, con más de 30 años de servicio ha cumplido con creces su propósito, llegando la hora de que el mismo pase la posta a la nueva generación de protecciones basadas en tecnologías de punta.

Este trabajo tiene por objetivo presentar las experiencias adquiridas por los especialistas de la Itaipu Binacional durante todo el proceso de implementación del nuevo sistema de protección (concepción, proyecto, ensayos en fábrica, ensayos de modelo, problemas encontrados – “desafíos” y soluciones adoptadas – “lecciones aprendidas”).

## **PALABRAS CLAVES**

Retrofit

Sistemas de Protección

Barras 500 kV

Subestación Blindada a Gas SF<sub>6</sub>

Ensayos de modelo



## **1 MOTIVOS QUE IMPULSARON LA EJECUCIÓN DEL RETROFIT DE LAS PROTECCIONES DE LAS DE LAS BARRAS DE 500KV DE LA SUBESTACIÓN BLINDADA A GAS – SF6**

El principal factor considerado para el Retrofit fue la obsolescencia del actual sistema, que se encuentra con más de 30 años de servicio. Considerando la coyuntura presentada en el ítem anterior, fue naturalmente necesaria la puesta en marcha del retrofit del sistema de protección de las barras de 500kV de la Subestación Blindada a Gas SF6 - GIS, llegando la hora de que el mismo pase la posta a la nueva generación de sistemas de protección.

Por otro lado, ya desde hace unos años, la Itaipu se encuentra implementando políticas de renovación de personal, entonces el retrofit de los sistemas representa una opción atrayente teniendo en cuenta que los nuevos técnicos acompañaran desde el inicio, todo el proceso de implementación de las nuevas protecciones, lo cual minimiza el impacto de la pérdida de técnicos con conocimiento experto de los sistemas antiguos.

También mediante el retrofit, se buscó aumentar la confiabilidad del sistema de protección ya que se contará con equipos modernos, piezas de repuesto y soporte técnico disponible en el mercado.

Por último, los sistemas de protección basados en nuevas tecnologías presentan ventajas y aspectos atractivos tales como:

- Facilidad de obtención remota de oscilografías y secuencia de eventos.
- Versatilidad para crear y alterar lógicas de control y protección utilizando herramientas avanzadas de software.
- Disponibilidad para una fácil implementación de esquemas de control entre diversos IED's conforme la norma IEC61850.
- Acceso remoto a todos los parámetros de configuración de cada uno de los IED's a través de una estación de ingeniería.

## **2 BREVE DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN A IMPLEMENTAR**

Los Sistemas de Protección de las Barras de 500kV de la Subestación Blindada a Gas – SF6 de Itaipu fueron proyectados de tal manera que cada uno de ellos posea dos sistemas de protección independientes, denominados “Protección Principal y Protección Alternada”.

Cada Sistema es capaz de realizar todas sus funciones de protección, inclusive con el otro fuera de operación. Por tanto, fueron adoptadas las siguientes orientaciones en el proyecto:

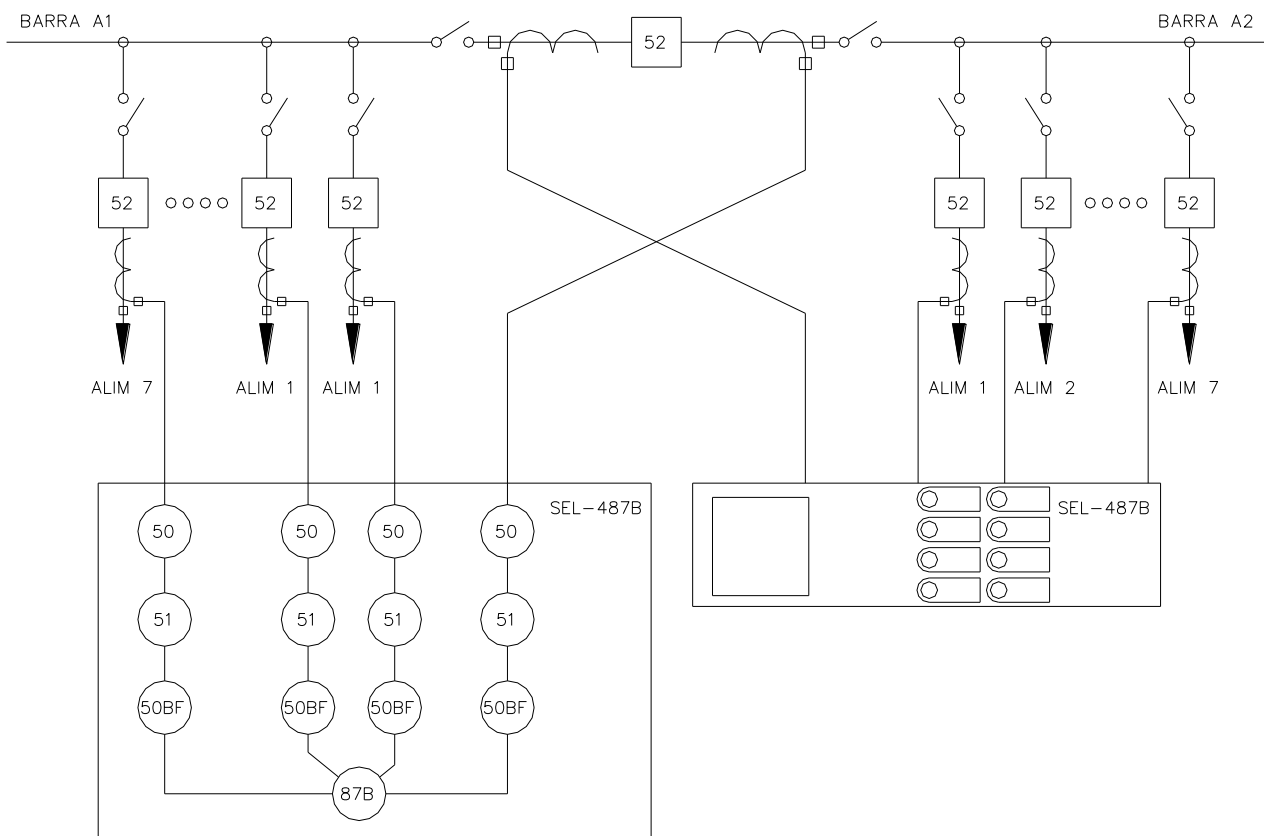
- Utilización de IEDs independientes para cada protección;
- Utilización de fuentes de alimentación DC independientes para cada protección;
- Utilización de núcleos de TC's diferentes para cada protección;

## 2.1. CONSTITUCIÓN DE LAS PROTECCIONES DE BARRAS DE 500 kV

Las protecciones Primaria y Alternada están constituidas cada una, por un IED SEL-487B-1 de la Schweitzer Engineering Laboratories (SEL) con las siguientes funciones:

- Una función de protección diferencial de barras (87B), segregada por fase.
- Protección de Final de Zona (End-Zone).
- Protección de falla de disyuntor (50/62BF).
- Elementos de sobrecorriente instantánea y temporizada (50/51).
- Elementos de sobre y subtensión de fase (59/27).
- Sobretensión de secuencia cero (59N).
- Sobretensión de secuencia negativa (59Q).
- Sub y sobrefrecuencia (81).

El IED SEL-487B-1 posee 24 entradas analógicas de corriente y 3 entradas analógicas de tensión. Cabe mencionar que las entradas de tensión no son utilizadas en la Itaipú, por lo que los elementos de tensión y frecuencia no están implementados.

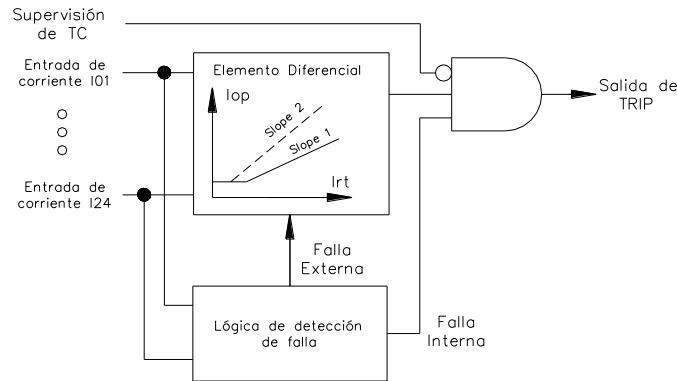


**Figura 1 – Esquema básico del nuevo sistema de protección**

### 3 TÓPICOS RELEVANTES Y LECCIONES APRENDIDAS

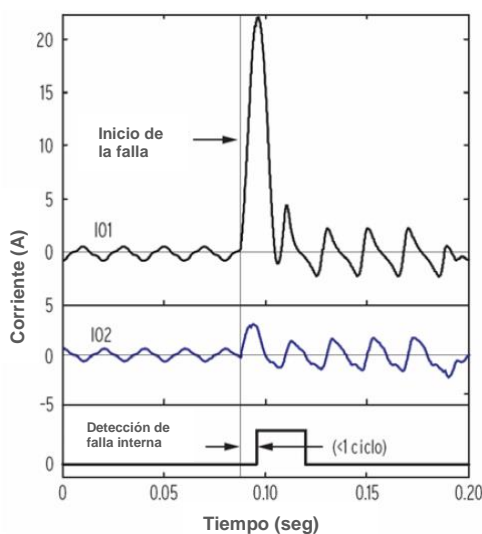
#### 3.1. PROTECCIÓN DIFERENCIAL DE BARRAS – 87B

Cada IED de protección posee seis elementos diferenciales de corriente independientes, incluyendo una lógica de detección y discriminación de fallas internas/externas, además de supervisión de TC's para liberación de la señal de trip.

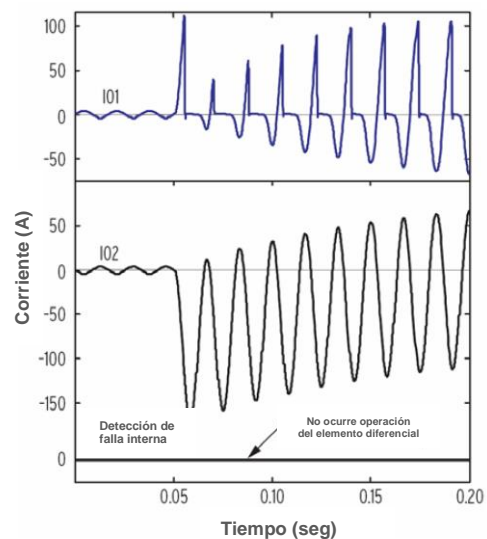


**Figura 2 – Diagrama de bloques de la lógica de liberación de señal de trip**

La saturación de TCs es uno de los principales factores a ser considerados en la seguridad de una protección. Gracias a la elevada tasa de muestreo del IED, la lógica de detección de fallas discrimina fallas externas en menos de 2 ms a través de la comparación de la tasa de variación de las corrientes de operación y restricción. Luego de la detección de una falla externa, el IED pasa a operar en un modo de alta seguridad, durante el cual selecciona dinámicamente una inclinación (“slope”) mayor para los elementos diferenciales (ver figura 2). La figura 3a muestra la operación de elemento diferencial para una falla interna y la figura 3b muestra una falla externa con elevada saturación del TC, sin la operación del elemento diferencial.



**Figura 3a – Operación del elemento diferencial para una falla interna**



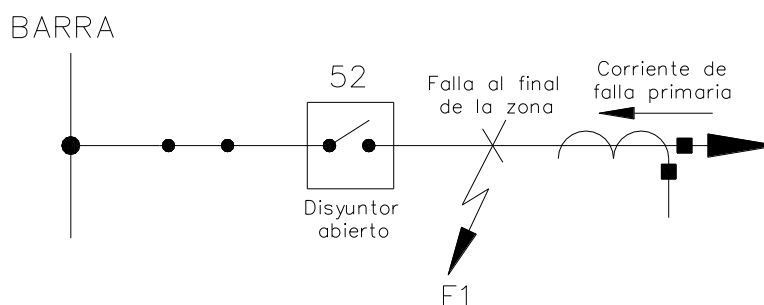
**Figura 3b – Comportamiento para una falla externa con elevada saturación de TC**

### 3.2. SUPERVISIÓN DE TC'S

Elementos diferenciales de corriente de alta sensibilidad detectan la corriente diferencial resultante de las condiciones de TCs abiertos en corto-circuito. Si la condición persiste por un tiempo mayor que el ajustado, el elemento puede generar una alarma y bloquear la protección si así es ajustado.

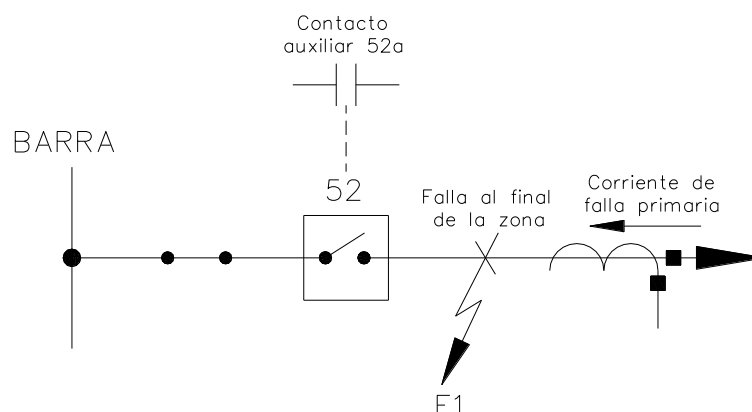
### 3.3. PROTECCIÓN DE FINAL DE ZONA “END ZONE”

La Protección Diferencial implementada posee un sistema de protección de final de zona.



**Figura 4 – Falla entre el disyuntor y el TC**

La Figura 4 muestra la falla F1 entre el disyuntor abierto y el TC del alimentador de una subestación. Esta área es una zona “muerta”, pues ni la protección de barras ni la protección de línea local puede eliminar esta falla; el terminal remoto del alimentador tiene que eliminar esta falla. Una vez que el disyuntor del alimentador ya se encuentra abierto, la operación de la protección de barras no tiene finalidad. La verdad es que la protección de barras no tiene que operar para esta falla, pero con la inclusión del contacto auxiliar del disyuntor en una de las ecuaciones lógicas de control del IED, se logra que, si el disyuntor se encuentra abierto, sea removido el valor de la corriente de los cálculos del elemento diferencial. Este recurso genera estabilidad de la protección de barras. Además, al configurar el sistema de protección a través de las ecuaciones de control y canales normales de comunicación, el relé envía una señal de trip (transfer trip) para el terminal remoto del alimentador.



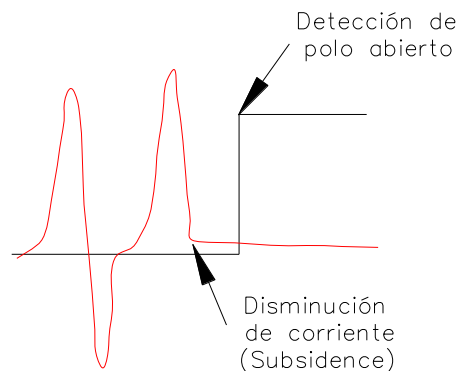
**Figura 5 –Utilización del contacto auxiliar del disyuntor y Transfer Trip para eliminar la falla**

### 3.4. PROTECCIÓN CONTRA FALLA DE DISYUNTOR

La protección implementada incorpora la función de protección de falla de disyuntor, incluyendo el retrip, que para el caso de Itaipu no fue implementado. Teniendo en cuenta que algunas aplicaciones requieren protección de falla de disyuntor externo, se puede ajustar el IED para falla de disyuntor externo y conectar la entrada de cualquier relé de falla de disyuntor externo al mismo.

#### 3.4.1. DETECCIÓN DE FASE ABIERTA

La lógica de detección de polo abierto de alta velocidad detecta las condiciones de polo abierto en menos de 0,75 ciclo para reducir los tiempos de coordinación de la protección de la función de falla de disyuntor (ver figura 6).



**Figura 6 – Detección de polo abierto**

### 3.5. AUTOMATIZACIÓN, COMUNICACIÓN Y SINCRONISMO DE TIEMPO

Además del sistema de protección, fueron implementados dos paneles de supervisión y comunicación, siendo uno para el sector de 50Hz y otro para el sector de 60Hz. Estos paneles poseen switches, plataformas computacionales con función de ingeniería y gateway.

Cada panel de supervisión permite el acceso y configuración de los IEDs de protección de Barras a través de una estación de ingeniería con diversos softwares necesarios para parametrizar los IEDs, coleccionar y analizar oscilografías, configurar switches y el denominado Gateway.

El Gateway posee la función de convertir los mensajes MMS (estándar IEC 61850) provenientes de los IEDs de protección para el sistema de supervisión SCADA de la Itaipu en el formato IEC 60870-104.

Cada panel posee tres switches interconectados en anillo y en estrella con los IEDs de protección, gateway y estación de ingeniería, siendo que los IEDs de las protecciones primarias están interconectados con el switch denominado primario y los IEDs de las protecciones alternadas están interconectadas con el switch denominado alternado.



**XII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
25 y 26 de Agosto de 2016**

La sincronización de tiempo proviene de un servidor de tiempo de la red industrial de la Itaipu, denominado SIRI (Sistema Integrado de Redes Industriales) para los diversos equipos de comunicación y de protección mediante el protocolo NTP (Network Time Protocol).

Con la arquitectura de red implementada, se puede efectuar esquemas de control entre diversos IED's conforme la norma IEC61850. Como ejemplo, podemos citar, la implementación de mensajes "GOOSE", de un IED para los demás IED's del propio sector, para efectuar el trigger de la oscilografía cuando ocurre la actuación de alguna función de protección de un IED.

#### **4 ENSAYOS DE MODELO EN RTDS (REAL TIME DIGITAL SIMULATOR)**

Para el retrofit de las protecciones de las barras de Itaipu fueron previstos ensayos de modelo en RTDS para los IEDs SEL-487B.

Los ensayos fueron realizados en el Laboratorio de Análisis y Simulación de Sistemas Eléctricos (LASSE) perteneciente a la Itaipú, durante el periodo comprendido entre el 23/02/2015 al 13/03/2015, y estuvieron involucrados los equipos de la Itaipu, de la SEL, además del equipo técnico perteneciente al propio laboratorio del LASSE.

##### **4.1. EL RTDS (REAL TIME DIGITAL SIMULATOR)**

El RTDS es una herramienta poderosa para el análisis del comportamiento de sistemas eléctricos y sus componentes, siendo generalmente utilizado cuando un nuevo elemento está por ser instalado en un sistema existente o en un proyecto de desarrollo de nuevos dispositivos para el Sistema de Potencia.

El RTDS es un simulador completamente digital de transitorios electromagnéticos en sistemas de energía, utilizado para realizar pruebas en malla cerrada de dispositivos físicos, tales como equipos de protección y control, a fin de llevar a cabo estudios analíticos del sistema y estudios de performance de la protección.

Mediante la combinación avanzada de hardware y software, se pueden representar en la pantalla del ordenador las redes de energía del sistema eléctrico, personalizando los componentes eléctricos mediante modelos matemáticos.

El RTDS trabaja en tiempo real, debido a esto, el simulador puede ser conectado directamente a los relés de protección y equipos de control, permitiendo que los mismos puedan ser sometidos a prácticamente todas las fallas y condiciones de funcionamiento posibles.



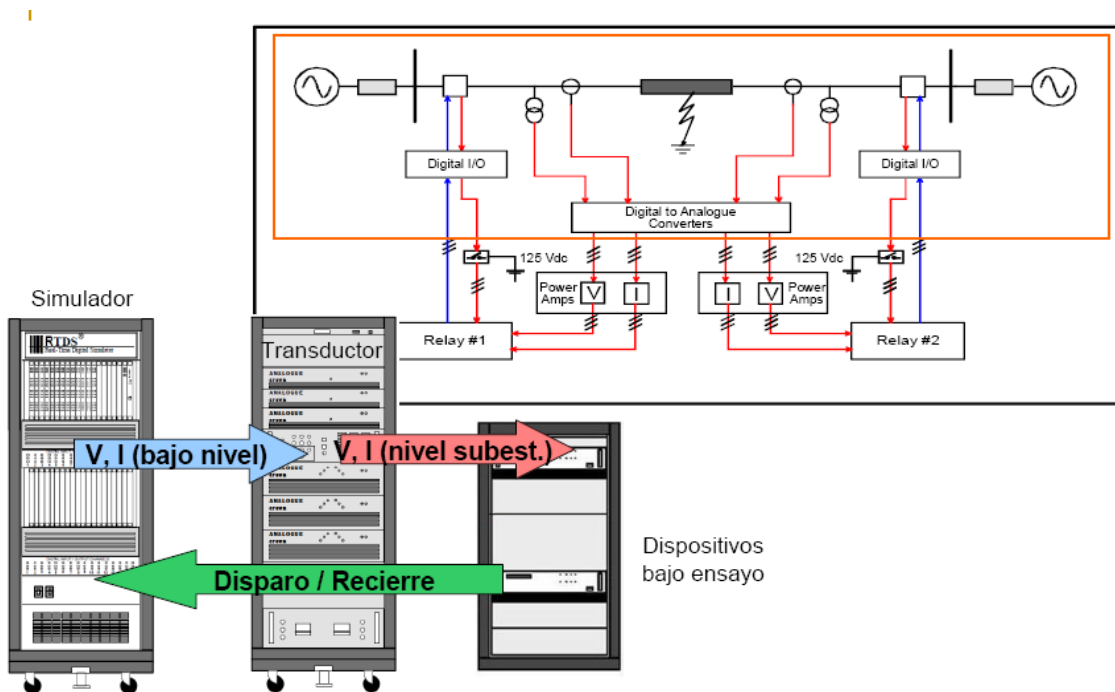


Figura 7 – Ensayo en malla cerrada utilizando RTDS

#### 4.2. ANALISIS DE LOS CASOS

Previamente a la ejecución de los ensayos en RTDS, se realiza la validación del modelo en RTDS del sistema eléctrico de ITAIPU, comparando tanto la forma de onda como los valores de corriente de defecto obtenidos mediante la oscilografía del propio RTDS, con los valores obtenidos mediante la simulación en ATP, la cual se considera como referencia. Las características analizadas fueron el flujo de potencia y niveles de corto-circuito para fallas aplicadas en la barra de la GIS para cada uno de los sistemas modelados.

Posteriormente, se realizan algunos primeros ensayos para calibración y verificación inicial del desempeño del sistema incluyendo el modelo programado en RSCAD y los ajustes de protección parametrizados en el relé SEL-487B.

XII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
25 y 26 de Agosto de 2016

Una vez validado y calibrado el modelo en RTDS se ejecutan los ensayos, obteniendo así el comportamiento de cada función de protección, los cuales son analizados caso a caso, identificando problemas en el desempeño, investigando las causas y posteriormente buscando una solución a cada problema encontrado.

Durante el periodo de ensayos, se observó la necesidad de alterar la lógica prevista inicialmente para la señalización de fallas en la zona muerta del disyuntor de interconexión de barras (END-FAULT). Fueron utilizados elementos de sobrecorriente de tiempo definido como sensores de corriente, la variable correspondiente al estado del contacto auxiliar del disyuntor y temporizadores disponibles en el IED SEL-487B.

En los ensayos fueron monitoreadas las variables de detección de falla (interna o externa a la barra protegida) usando la función diferencial de corriente, conforme la característica de operación del SEL-487B. Fueron monitoreadas también las variables de partida y trip de la función diferencial, observando los tiempos involucrados, desde la aplicación de la falla hasta su eliminación, por la actuación del relé (cuando se trataban de fallas internas a la barra protegida).

### 4.3. TÓPICOS RELEVANTES

Con relación a la protección diferencial de barras, para la gran mayoría de los casos, no hubo dudas en cuanto al comportamiento del relé, inclusive en situaciones de mayor dificultad en la detección correcta de las fallas, por ejemplo, para fallas evolutivas (de interna para externa), situaciones de saturación de TC, fallas con frecuencia anormal o casos con elevada resistencia de falla.

De entre los casos simulados, los que demandaron un análisis más exhaustivo son:

#### 4.3.1. FALLAS EVOLUTIVAS, DE EXTERNA PARA INTERNA A LA BARRA PROTEGIDA.

Durante los ensayos para este tipo de falla, observamos que para fallas fase-tierra, evolucionando de externa para interna, en la misma fase, hubo casos donde la actuación de la protección diferencial fue temporizada (superior a lo aceptable) o no ocurrió.

Fue analizado y verificado que debido a que la falla externa permanecía después de la evolución para falla interna, la corriente de falla se divide, no siendo suficiente para sensibilizar la protección 87B. Si se tiene en cuenta que, en una situación real, la falla externa sería eliminada por la protección del bay correspondiente, constatamos, a través de ensayos, que el IED actúa inmediatamente después de que la falla externa sea extinta.

#### 4.3.2. FALLAS EXTERNAS CON SEVERA SATURACIÓN DE TC.

Durante los ensayos y análisis de las oscilografías del RTDS y del relé de protección, fue necesaria la modificación de la simulación en cuanto a saturación de los TCs. El objetivo de esto fue alcanzar una forma de onda característica de TC con elevado grado de saturación. Siendo así, se optó por aumentar la carga (burden) en el secundario de los TCs que se deseaban crear la condición de saturación para un valor de 100  $\Omega$ .



XII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
25 y 26 de Agosto de 2016

Esta situación difícilmente ocurrirá en condiciones reales, pero para sistemas tan importantes como el de Barras de la Itaipú, se adopta un criterio bastante conservador para ensayar exhaustivamente el sistema de protección en todas las configuraciones posibles, de forma a evitar cualquier comportamiento inesperado que pueda afectar la performance de dicha protección. Así, fue verificado en una de las simulaciones, que el IED estaba operando para una falla localizada fuera de la zona de protección.

Mediante el análisis de las oscilografías de este evento, fue visto que el TC de una de las fases del bay con falla externa estaba en la condición de saturación desde el primer milisegundo de la aplicación de la falla, lo que en realidad no ocurre. De manera general, los TCs que saturan para determinados defectos, en un instante inicial (en los primeros milisegundos) mantienen su relación de transformación. Este comportamiento es necesario para el correcto funcionamiento de los IED's de protección.

Además de la protección diferencial, fueron realizadas simulaciones para verificar el correcto funcionamiento de la protección de falla de disyuntor de interconexión de barras y de la lógica de señalización de falla en la zona muerta (END FAULT), que posteriormente fue deshabilitada.

## 5 CONCLUSIONES

El Retrofit del Sistema de Protección de las Barras de 500 kV representa un marco importante para la Itaipu Binacional, en vista a las nuevas tecnologías que están siendo aplicadas y la necesidad de actualización del cuadro técnico de la Entidad, lo cual reditúa una gran cantidad de nuevos conocimientos.

Considerando que éste evento representa nuestra primera experiencia utilizando equipos y tecnología del fabricante SEL, hemos creado mucha expectativa positiva con relación al desempeño futuro de los nuevos equipos, debido a que los mismos fueron arduamente inspeccionados y ensayados en prácticamente todas las condiciones de operación posibles.

Mediante el retrofit, se aumenta la confiabilidad del sistema de protección ya que se cuenta con equipos modernos, con piezas de repuesto y soporte técnico disponibles en el mercado.

## 6 BIBLIOGRAFIA

- ITAIPU/SEL, Substituição y Atualização Tecnológica dos Sistemas de Proteção de Barras, Estudos de Curto-Circuito e Cálculo de Ajustes, 6357-10-G6010-P, Itaipu Binacional, 2015, pag. 595.
- ITAIPU/SEL, Substituição y Atualização Tecnológica dos Sistemas de Proteção de Barras, Ensaio de Modelo RTDS, 6357-10-G6012-P, Itaipu Binacional, 2015, pag. 36.
- SEL, Data Sheet SEL-487B, 2006, pag. 34