

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

Ensayos de modelo utilizando simulador RTDS® para validación de los ajustes de las protecciones de las líneas LI 220kV MD-IRY y LI 220kV MD-PIH

Esteban Federico Vargas Correa, Jonas Roberto Pesente, Pablo Eugenio Vera Agüero, Vero León Sánchez, Julián Escura Meza, Alejandro López, Adalberto Escurra, Guilherme Louro Justino

ITAIPU Binacional; ANDE; AS.DT-PTI

Paraguay, Brasil

RESUMEN

El sector de 50Hz de la Itaipu binacional está conectado al sistema eléctrico paraguayo a través de cuatro líneas de 220kV y una línea de 500kV. La usina actualmente cuenta con 20 unidades generadoras, donde 10 unidades generadoras corresponden al sector de 50Hz, con potencia nominal de 700MW cada una. Entre esas cuatro líneas de 220kV, dos de ellas interconectan la subestación Margen Derecha con la estación de Itakyry y la estación de Parque Industrial Hernandarias.

En el año 2019 fue realizada la actualización tecnológica de las protecciones de las líneas interconexión entre la subestación Margen Derecha con la estación de Itakyry y la estación de Parque Industrial Hernandarias.

Las funciones habilitadas en la protección de las líneas son: diferencial de línea – 87L, distancia – 21, direccional de secuencia cero – 67N, falla de interruptor – 50BF y recierre automático – 79. La característica principal adoptada en la filosofía de las protecciones es considerar la función diferencial 87L, que es considerada la protección rápida, como a principal protección de la línea. La primera zona de la función 21 y la primera etapa de la función 67N (con subalcance) estarán bloqueadas mientras que la función diferencial de la protección, primaria y/o alternada, se encuentre en servicio.

Con la entrada en operación de la nueva protección y de la nueva función de protección, 87L, fue necesario realizar estudios para la definición de los nuevos ajustes de las protecciones de las líneas y ejecutar ensayos de modelo utilizando el RTDS® para validación de los ajustes definidos.

El ensayo tuvo inicio con la determinación de un área del sistema eléctrico en la cercanía de las subestaciones que interconectan estas líneas de interconexión. Posterior a eso, fueron determinados diferentes escenarios del sistema eléctrico y fueron realizados equivalentes de cortocircuito en base a estos escenarios definidos. Esto fue representado en el software de transitorios electromagnéticos ATP, para servir de base para su implementación en el RSCAD, que es el software utilizado por el RTDS® para las simulaciones.

Dentro del modelo del sistema eléctrico elaborado para los ensayos fue considerado el efecto de acoplamiento electromagnéticos entre estas líneas y la línea de interconexión en 500kV que se encuentra en la cercanía. Además de esto, poseen la característica de que la línea que interconecta la subestación Margen Derecha y la estación de Itakyry cuenta con 71km de longitud, en cambio la línea paralela, que interconecta la subestación Margen Derecha con la estación Parque Industrial Hernandarias cuenta con 16km de longitud. Debido a estas características de las líneas fue interesante realizar los ensayos considerando diferentes configuraciones.

Este trabajo muestra la relevancia de la validación de los ajustes definidos en los estudios para las funciones de protección de líneas de transmisión de configuraciones complejas. Esta validación es realizada con la utilización de ensayos de modelo a partir de simulación digital en tiempo real y en lazo cerrado, tal como

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

ofrece el simulador RTDS®. De esta forma, los ensayos de modelo garantizan un aumento en la confiabilidad de los ajustes y de la confirmación de la eficiencia de las lógicas implementadas en los IED.

Este trabajo tiene por objetivo exponer la importancia de detallar el modelo del sistema eléctrico para la realización de este tipo de ensayos y mostrar los parámetros que fueron modificados durante los ensayos.

PALABRAS CLAVE

Funciones de protección, simulación, RTDS®.

1. INTRODUCCION

El sector de 50Hz de la Itaipu binacional está conectado al sistema eléctrico paraguayo a través de cuatro líneas de 220kV y una línea de 500kV. La usina actualmente cuenta con 20 unidades generadoras, donde 10 unidades generadoras corresponden al sector de 50Hz, con potencia nominal de 700MW cada una. Entre esas cuatro líneas de 220kV, dos de ellas interconectan la subestación Margen Derecha con la estación de Itakyry y la estación de Parque Industrial Hernandarias.

En el año 2019 fue realizada la actualización tecnológica de las protecciones de las líneas interconexión entre la subestación Margen Derecha con la estación de Itakyry y la estación de Parque Industrial Hernandarias.

Además, la línea que hasta el momento era denominada como LI 220kV MD-PIH-IRY, sería seccionada en la Estación de Parque Industrial Hernandarias, propiedad de la ANDE, pasando a denominarse LI 220kV MD-PIH, modificándose de esta manera su longitud.

Antes de la entrada en operación de las nuevas protecciones, estos equipos son ajustados y parametrizados de acuerdo con las condiciones y características operacionales del sistema eléctrico donde será instalado y a partir de ese punto, son sometidos a una batería de ensayos, de modo a comprobar su desempeño frente a eventos transitorios ocurridos en el sistema eléctrico de potencia.

2. ELABORACION DEL MODELO

Para realizar los ensayos considerándose la configuración del sistema eléctrico de potencia fue necesario el desarrollo de modelos del sistema Itaipu/ANDE en el RSCAD, el cual es el software utilizado en el RTDS® para las simulaciones. La validación de los modelos desarrollados en el RSCAD fue realizada comparando resultados utilizándose los softwares ATP y Aspen Oneliner.

Los modelos contemplaron la implementación de configuraciones que representan diferentes topologías del sistema eléctrico de potencia en el cual las líneas LI 220kV MD-IRY y LI 220kV MD-PIH están modeladas. Diferentes configuraciones y diferentes tipos de fallas aplicadas fueron esenciales para la verificación de las protecciones de ambas líneas ya que estas líneas poseen la característica de que la línea que interconecta la subestación Margen Derecha y la estación de Itakyry cuenta con 71km de longitud, en cambio la línea paralela, que interconecta la subestación Margen Derecha con la estación Parque Industrial Hernandarias cuenta con 16km de longitud.

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELÉCTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

2.1 Configuraciones utilizadas en los modelos del sistema

La configuración de carga máxima (Configuración 1), utilizada en los ensayos está descrita a continuación:

- 10 unidades generadoras en Itaipu 50Hz;
- 4 líneas de transmisión conectando Itaipu (SE-IPU) a la subestación Margen Derecha (SE-MD);
- 4 líneas de transmisión conectando a la subestación Margen Derecha a la subestación de Foz do Iguacu (SE-FI);
- HVDC de Furnas modelado como carga dinàmica;
- Banco de filtros en la subestación de Foz do Iguacu;
- Autotransformadores T1, T2, T3 y T4 modelados como un solo componente del RSCAD, representando el equivalente de los cuatro, considerándose las curvas de saturación;
- Reguladores R1, R2, R3 y R4 modelados como un solo componente del RSCAD, representando el equivalente de los cuatro, considerándose las curvas de saturación y con la posición del tap en el máximo;
- Autotransformador TX y regulador RX modelados considerándose sus respectivas curvas de saturación (con RX operando en el tap máximo);
- 1 línea de transmisión conectando la subestación de la Margen Derecha con la estación de Villa Hayes
- líneas de transmisión conectando la subestación de la Margen Derecha con la estación de Acaray
- 1 línea de transmisión conectando la subestación de la Margen Derecha con la estación de Itakyry
- 1 línea de transmisión conectando la subestación de la Margen Derecha con la estación de Parque Industrial Hernandarias.
- El resto del sistema eléctrico paraguayo con un equivalente de cortocircuito en el nivel de 220kV de la estación de Villa Hayes, estación de Carayao y estación de Acaray.

Un diagrama simplificado del modelo adoptado en las configuraciones 1 y 2 muestra en la Figura 1.

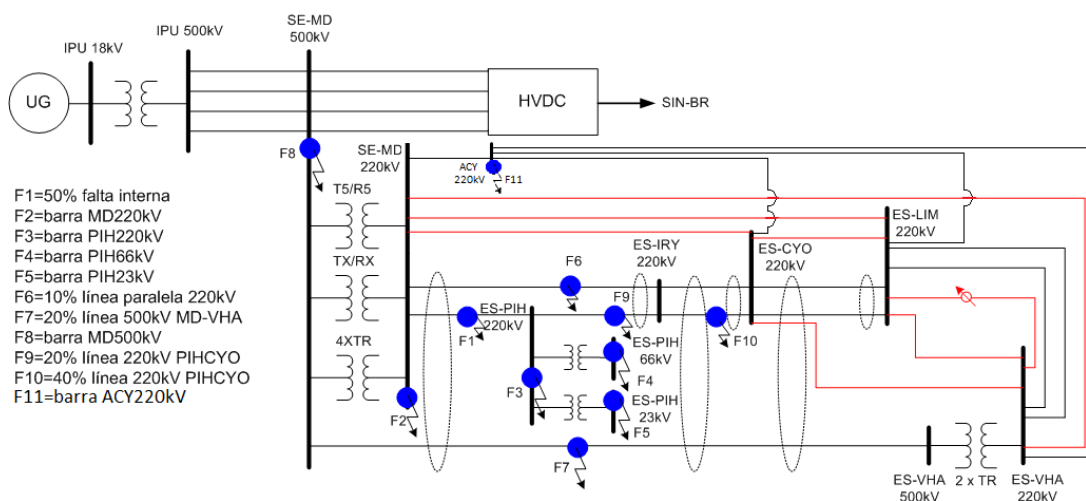


Figura 1: Diagrama simplificado del modelo adoptado en las configuraciones 1 y 2 y puntos de falla

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELÉCTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

La Configuración 2 del modelo del sistema eléctrico de la interconexión Itaipu/Furnas 50Hz, también mostrada en la Figura 1, fue creada a partir de la Configuración 1, con la topología usando el sistema completo Itaipu/ANDE/Furnas, carga mínima y cuatro unidades generadoras en Itaipu 50Hz.

La Configuración 3 representa la configuración del sector de 50Hz de Itaipu con cuatro unidades generadoras separadas para el sistema ANDE, conectadas a 2 circuitos de 500kV que conectan Itaipu a la barra de 500kV de la SE-MD y al sistema de 220kV de la ANDE.

2.2 Características del área de interés del sistema eléctrico

Una de las principales características de las líneas de transmisión de 220kV que serían objeto de ensayo es que tienen una proximidad con la línea de 500kV que conecta la subestación Margen Derecha y la estación de Villa Hayes. Esta cercanía se extiende durante gran parte de su trayectoria. Esto tiene como consecuencia en un acoplamiento electromagnético entre estas tres líneas de transmisión acentuado durante cortocircuitos a tierra.

Las dos líneas de transmisión que serían objeto de estudio comparten las mismas torres y tienen una longitud de 71km aproximadamente, pero además de que las protecciones serían modernizadas, una de ellas sería seccionada a 16km de la subestación Margen Derecha, teniendo una longitud menor a la línea paralela. Esta característica podría influir en los esquemas de teleprotección debido al acoplamiento electromagnético entre estas dos líneas y debido a posibles sobrealcances de la línea de mayor longitud en relación con las líneas paralelas de menor longitud. Esta característica también necesita ser considerada para analizar el desempeño de las protecciones durante los ensayos.

En la Figura 2 se muestra el diagrama simplificado del área de interés de las líneas LI 220kV MD-IRY y LI 220kV MD-PIH. Este diagrama corresponde a la configuración antes del seccionamiento de estas líneas en la ES-IRY y ES-PIH. En esa configuración fueron realizadas simulaciones para analizar la influencia del acoplamiento electromagnético con la línea LI 500kV MD-VHA 1.

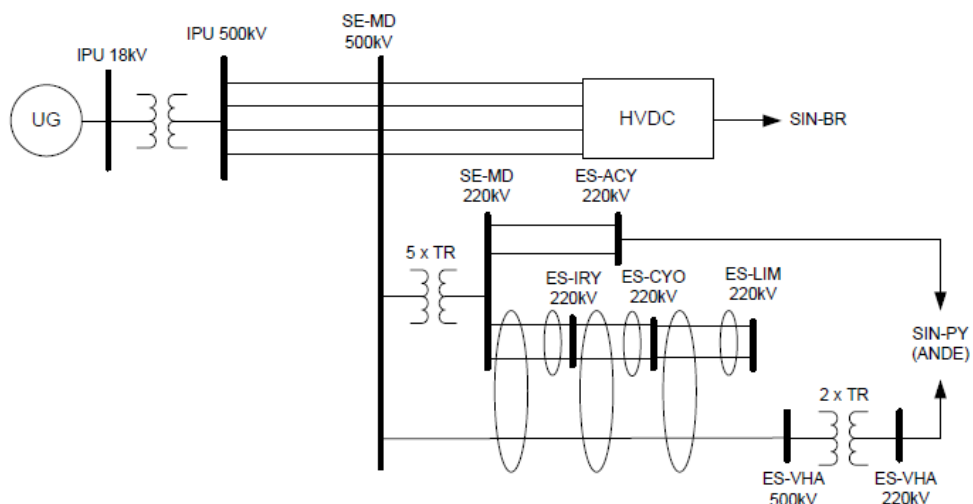
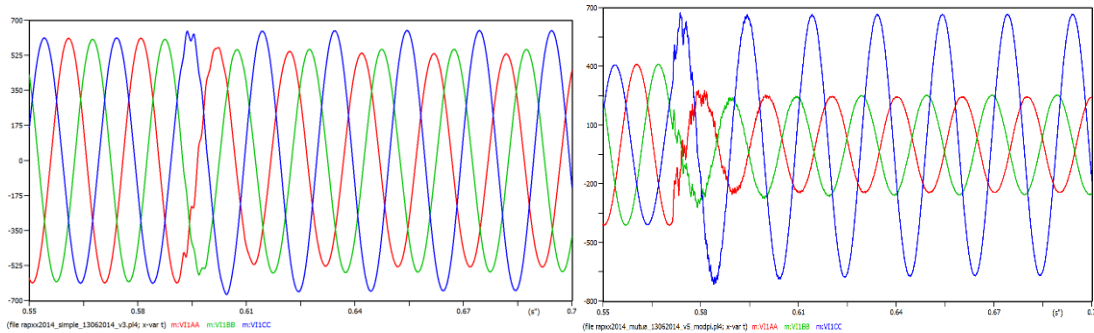


Figura 2: Diagrama simplificado del área de interés de Itaipu 50Hz

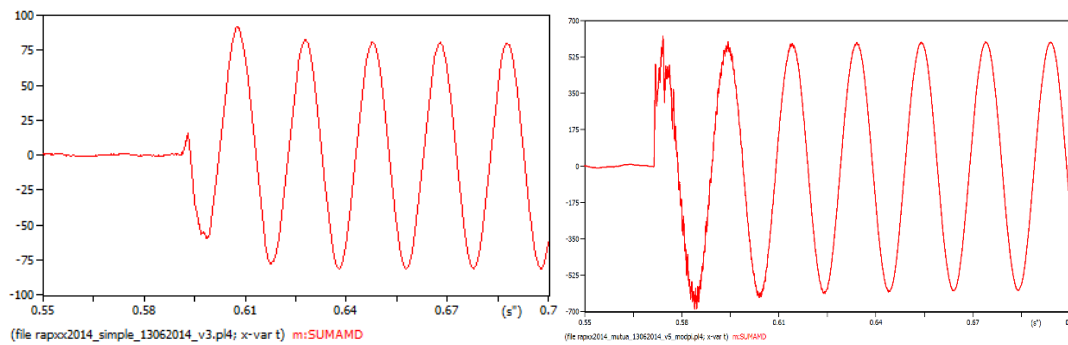
En la Figura 3 y la Figura 4 se presentan las corrientes de fase y la corriente residual de la LI 220kV MD-IRY-CYO 2, respectivamente antes del seccionamiento en la ES-IRY y la ES-PIH. En este caso, se observan las diferencias del nivel de las corrientes de fase y corriente residual, donde la

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

corriente residual, para el caso del modelo con acoplamiento, alcanza valores de pico aproximado de 700A a diferencia del modelo sin acoplamiento que alcanza valores de pico menores a 100A.



a) Modelo sin acoplamiento **b) modelo con acoplamiento**
Figura 3 – Corrientes de fase de las LI 220kV MD-IRY-CYO 1



a) Modelo sin acoplamiento **b) modelo con acoplamiento**
Figura 4 – Corrientes residual de la LI 220kV MD-IRY-CYO 1

En la Tabla 1 se pueden observar los resultados obtenidos utilizando el software ASPEN OneLiner. El Modelo 1 se refiere los resultados de la simulación del modelo sin considerar el acoplamiento electromagnético y el Modelo 2 se refiere a los resultados de la simulación del modelo considerando el acoplamiento electromagnético.

Tabla 1 – Cortocircuito monofásico en la LI 500kV MD-VHA 1

	Corriente en (A_{rms})	
	LI 220kV MD-IRY-CYO 1	LI 220kV MD-IRY-CYO 2
Modelo 1	15	9
Modelo 2	507	631

Conforme resultado, al utilizar el modelo que considera el acoplamiento, los niveles de corriente residual de las líneas LI 220kV MD-IRY-CYO 1 y 2, aumentaron en forma significativa y son más próximos a los valores medidos a través de los oscilógrafos en campo. Estos resultados fueron un indicativo de que era interesante el análisis considerando el acoplamiento electromagnético por más que las líneas hayan sido seccionadas.

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

Estas características, en conjunto con la disponibilidad de los IED de ambas líneas, impulsó a realizar los ensayos en forma paralela de las protecciones de ambas líneas para analizar todas estas influencias.

2.2 Modelado del sistema

De forma a garantizar la confiabilidad de los resultados de los ensayos, los modelos desarrollados en el RSCAD fueron previamente validados por Itaipu realizando comparaciones de los resultados obtenidos en el RSCAD con resultados obtenidos utilizando el ATP (Alternative Transient Program) y con el Aspen Oneliner que es un software de estudio de cortocircuito. Esta acción permitió un ajuste de los modelos del RSCAD que serían utilizados para las simulaciones en las diferentes configuraciones del sistema eléctrico de la interconexión Itaipu/ANDE/Furnas 50Hz.

Los valores de tensión y corriente obtenidos de las simulaciones estarían próximos a los valores reales obtenidos en condiciones de cortocircuito en el sistema Itaipu/ANDE/Furnas 50Hz.

En la Figura 5 se muestra un trecho de las líneas modeladas en el ATP. La línea de transmisión LI 500kV MD-VHA 1 se encuentra destacada en color azul.

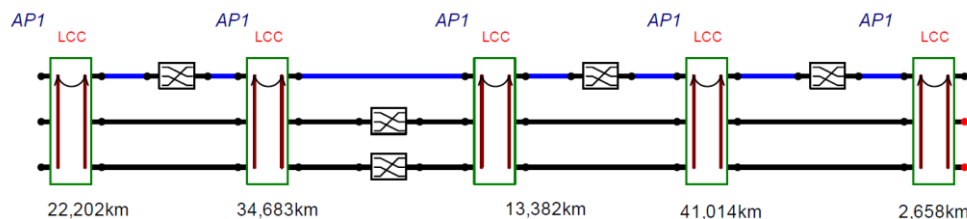


Figura 5: Trecho del modelo de la línea LI 500kV MD-VHA 1 y las LI 220kV MD-IRY-CYO

Esto también permite mostrar la importancia de que los modelos utilizados para los estudios eléctricos en la Itaipu estén en constante actualización conforme evolución de los sistemas interconectados, como, por ejemplo, el sistema de la ANDE. Además, permite inferir que estos modelos deberían ser contrastados con mediciones de campo realizadas por equipos dedicados para registro de oscilografías o registros de los propios IED disponibles en el sistema eléctrico.

La disponibilidad de estos registros para comparación con simulaciones son insumos sumamente necesarios para el suceso de este tipo de ensayos, entre otros.

3. EL ENSAYO

Los ensayos fueron ejecutados con la utilización de scripts para cada configuración y para cada tipo de falla. Los tipos de fallas simulados en los ensayos en cada configuración son presentados a continuación:

- Monofásicas;
- Bifásicas;
- Bifásicas a tierra;
- Trifásicas a tierra.
- Internas;
- Con resistencia de falla;
- Externas;
- Evolutivas;

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

- Switch on to fault;
- Con variación de la frecuencia;
- Crosscountry;
- Sensibilidad con relación a la variación de la resistencia de falla;
- Sin comunicación entre IEDs;
- Sensibilidad con relación a la variación del local de falla en la línea paralela;
- Transient block;
- Recierre automático.

3.1 Ajustes y filosofías iniciales

Se puede mencionar que las funciones prioritarias parametrizadas en los IED que serían ensayados son las siguientes:

- Función 87L – Diferencial de línea;
- Zona 1 y Zona 2 de las funciones 21 – Distancia;
- Arranque al frente, Step 1 y Step 2 de la función 67N – Direccional residual;
- Lógica de teleprotección asociada a la función 67N;
- Lógica de teleprotección asociada a la función de distancia 21.

3.2 Procedimiento para verificación de resultados durante los ensayos

A partir de la definición de los ajustes se iniciaron los ensayos con la verificación de los resultados para todas las configuraciones. Los ajustes siendo alterador a medida que los problemas fueron detectados en os análisis de los resultados. Luego de cada alteración un nuevo ciclo de ensayos era ejecutado.

Otra decisión fue que al realizar el ensayo de las protecciones de la línea LI 220kV MD-IRY, las protecciones de la línea LI 220kV MD-PIH también estarían siendo monitoreadas a través de la definición de algunos canales digitales. Esta definición también fue válida para el momento del ensayo en la línea LI 220kV MD-PIH.

En la Figura 6 se muestra el resultado de una oscilografía del RTDS para ensayo en la línea LI 220kV MD-IRY. Se observa la diferenciación de los canales digitales que fueron definidos para el análisis de las protecciones de la línea LI 220kV MD-IRY. Los primeros 10 canales digitales corresponden al terminal de la SE-MD y los siguientes 10 canales digitales corresponden al terminal de la ES-IRY. Por otro lado, los siguientes 5 canales digitales corresponden al terminal de la SE-MD de la línea LI 220kV MD-PIH y los últimos 5 canales digitales corresponden al terminal es la ES-PIH.

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

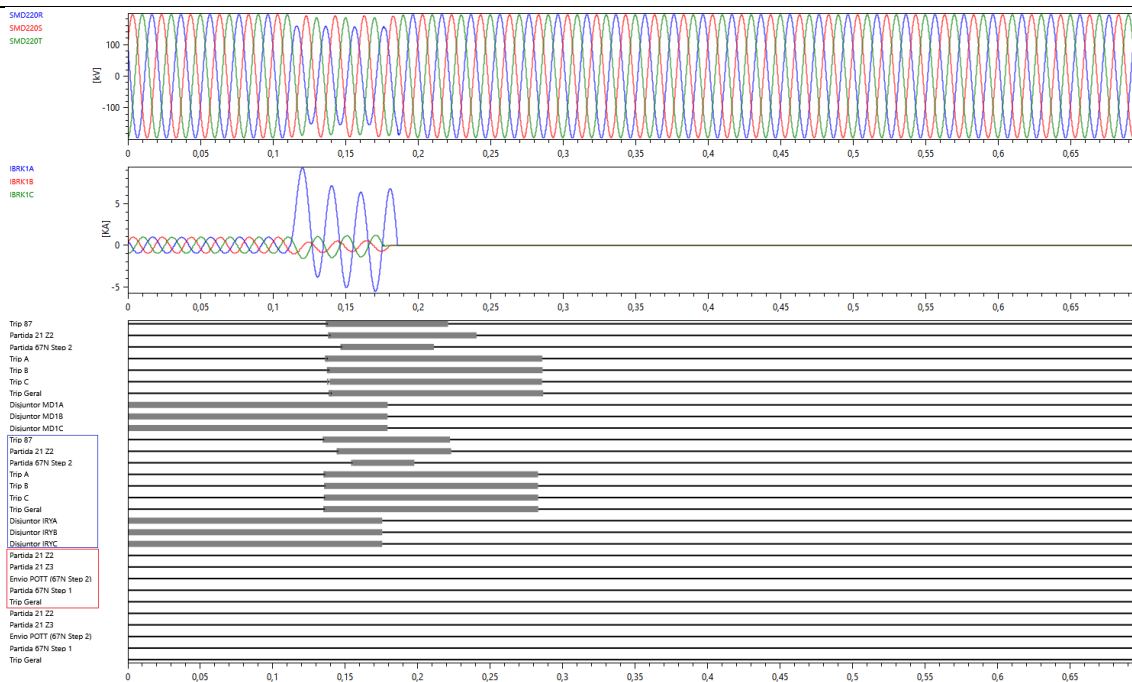


Figura 6: Oscilografía del RTDS – ensayo LI 220kV MD-IRY

Siguiendo con la Figura 2 se observa que el comportamiento de las protecciones fue conforme esperado, actuando la función diferencial en ambos terminales, ya que se trata de una falla interna a 50% desde el terminal del a SE-MD. Además, hubo sensibilización de la Zona 2 de la función de distancia y el Step 2 de la función de sobrecorriente direccional residual de ambos terminales.

En relación con el comportamiento de las protecciones de la línea LI 220kV MD-PIH, para este caso, no hubo sensibilización de ninguna de las funciones posibles para monitorear.

Durante los ensayos de las protecciones de la línea LI 220kV MD-IRY, para un caso con la función diferencial fuera de operación y de falla bifásica a tierra próximo al terminal de la SE-MD en la línea LI 220kV MD-PIH, fue observado que la protección del terminal es la SE-MD sensibilizó Zona 2, parametrizada al frente, posterior a la abertura del interruptor de la SE-MD de la línea LI 220kV MD-PIH.

La sensibilización de la Zona 2 del terminal de la SE-MD de la línea LI 220kV MD-IRY implicaría un riesgo ya que podrían abrir esta línea en forma simultánea con la línea LI 220kV MD-PIH, ya que el terminal de la ES-PIH de la línea LI 220kV MD-PIH actuaría en forma temporizada.

En la En la Figura 7 se muestra el caso mencionado.

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

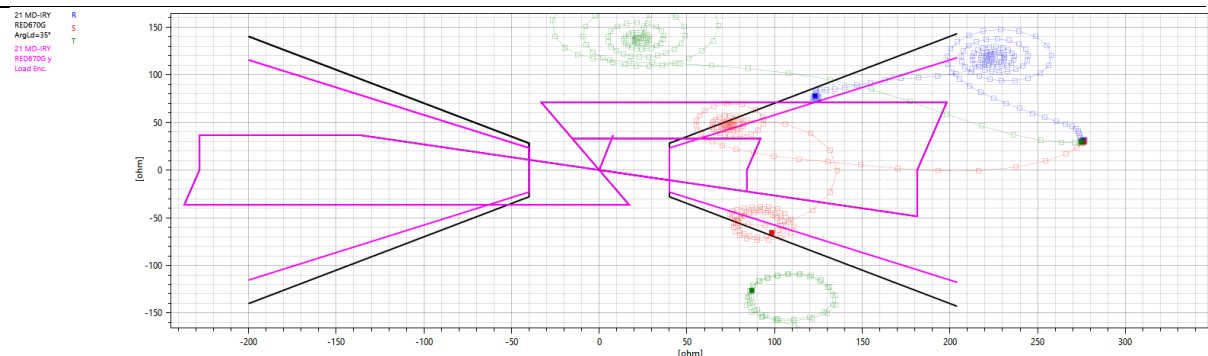


Figura 7: Oscilografía del RTDS – ensayo LI 220kV MD-IRY

Una solución para paliar esta situación fue aumentar el ángulo de la zona de carga de la función de distancia de 30° a 35° evitando así la sensibilización de la Zona 2.

4. CONCLUSION

Este trabajo muestra la relevancia de la validación de los ajustes definidos en los estudios para las protecciones de líneas de transmisión de sistemas con configuraciones complejas, con la utilización de ensayos de modelo utilizando simulación digital en tiempo real y en malla cerrada, como ofrece el simulador RTDS. Muchos parámetros definidos conforme estudios de cortocircuito y las reglas escritas por el manual del fabricante necesitan ser analizados y según necesidad alterados durante los ensayos, principalmente si tomamos en cuenta las particularidades del sistema de Itaipu 50Hz. De esta forma los ensayos de modelo buscan garantizar un aumento de desempeño adecuado de los ajustes definidos.

Además, fue expuesto la importancia de la verificación constante de los modelos utilizados para estudios de cortocircuito, actualizando en forma periódica los parámetros del modelo y comparando los resultados de las simulaciones con mediciones obtenidas del campo.

Esto permite que los modelos utilizados durante los ensayos en el RTDS sean lo más fidedigno posible a lo esperado durante la operación de las protecciones.

Los estudios de los ajustes y los ensayos fueron acompañados por Itaipu y la ANDE, y aprobados por el grupo de estudios de protección de la Comisión Mixta de Operación – CMO compuesta por Itaipu, ANDE, Eletrobras y Eletrobras Furnas. Los ajustes definidos durante el ensayo de modelo se encuentran actualmente implementados en los sistemas de protección de los terminales de ambas líneas LI 220kV MD-IRY y LI 220kV MD-PIH.

XIV SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRE
23 y 24 de Junio 2022

BIBLIOGRAFIA

- [1] Application Manual RED670 – ABB.
- [2] Technical Reference Manual RED670 –ABB.
- [3] A. M. Cáceres Machuca, G. Rodríguez Contrera. *Análisis de huecos de tensión, mediante programación adaptada a una red de prueba de sistema de potencia*. Universidad Nacional del Este-Facultad Politécnica, septiembre, 2016.
- [4] J. Arrigala, *Power system electromagnetic transients simulation, Volume 39*, 2003, p.123.
- [5] Electromagnetic Transients Program Reference Manual. EMTP Theory Book, 1989.
- [6] ATP – Alternative Transients Program. EMTP Rule Book, 2. Ed., EUA, 2000.