



Comité Nacional Paraguayo



Unión de Ingenieros de ANDE

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

Sobretensiones Temporarias de origen Resonante tras la Energización de Transformadores de Potencia durante una Recomposición del Sistema – Un Estudio de Caso

Gustavo Adolfo Aguayo Rojas, Tito Ocáriz Krauer

Administración Nacional de Electricidad

Paraguay

RESUMEN

Durante la fase inicial de los procesos de recomposición de un sistema de potencia, es común que el nivel de cortocircuito sea relativamente bajo debido a la escasa cantidad de líneas de transmisión y de generadores en servicio, y a causa de la dispersión de los mismos, resultando en una alta impedancia serie equivalente del sistema. Si la combinación de esta impedancia y la capacitancia de la línea es adversa, la impedancia armónica resultante puede presentar picos elevados de relativa baja frecuencia, pudiendo ser excitada por corrientes armónicas generadas por el *inrush* resultante de la energización de transformadores de potencia, dando origen a sobretensiones sostenidas de tipo resonante, por encima de los valores aceptables para la normal operación del sistema.

El presente trabajo tiene por objeto analizar los eventos acaecidos en la subestación Lambaré a inicios del año 2018, cuando en dicho local se registrara la avería de descargadores de tensión del lado 23 kV de un transformador de gran porte, durante una recomposición sistémica que se hallaba en curso en la ocasión.

El artículo efectuará un análisis cualitativo de las sobretensiones temporarias observadas en campo, lo cual será respaldado de forma cuantitativa por simulaciones digitales llevadas a cabo en ATP/EMTP, planteando asimismo una serie de posibles medidas operativas tendientes a inhibir la aparición del fenómeno o mitigar sus efectos en lo sucesivo.

PALABRAS CLAVES

Sobretensiones temporarias, transformadores de potencia, energización, *inrush*, sobreexcitación, saturación, resonancia armónica, recomposición sistémica, simulaciones digitales, ATP/EMTP.

1 INTRODUCCIÓN

La subestación Lambaré (SE-LAM) es una de las instalaciones más antiguas y de mayor importancia dentro del área Metropolitana del SIN (Sistema Interconectado Nacional) de la ANDE, hallándose incorporada al troncal del sistema eléctrico de 220 kV a través de líneas de transmisión que la interconectan con las subestaciones de Guarambaré y Puerto Sajonia. A partir del año 2015 la SE-LAM ha venido siendo objeto de obras de ampliación y reacondicionamiento, con el fin de extender su vida útil y aumentar su potencia instalada para atender adecuadamente el crecimiento de la demanda.

Las obras de ampliación de la subestación comprendieron, entre otras significativas mejoras, el cambio de los 2 (dos) bancos de transformadores de potencia de 220/66/23 kV – 120/60/60 MVA cada uno, por otros 2 (dos) bancos de transformadores de 300/180/120 MVA cada uno, de la misma relación de tensión, aumentando en más del doble la capacidad instalada originalmente en el local. Para garantizar la continuidad del servicio durante el proceso de ampliación de la subestación, otro transformador trifásico de 220/23 kV – 80 MVA había sido instalado hace unos años atrás, en carácter provisorio, con lo que para inicios del 2018 la SE-LAM contaba con tres transformadores de gran porte, siendo el local normalmente alimentado a partir del Subsistema 1 (SS1) interconectado con la Central Hidroeléctrica de Itaipú (CH-IPU). En la Fig. 1 se muestra un diagrama mímico de la configuración vigente en la subestación Lambaré en la época del evento analizado.

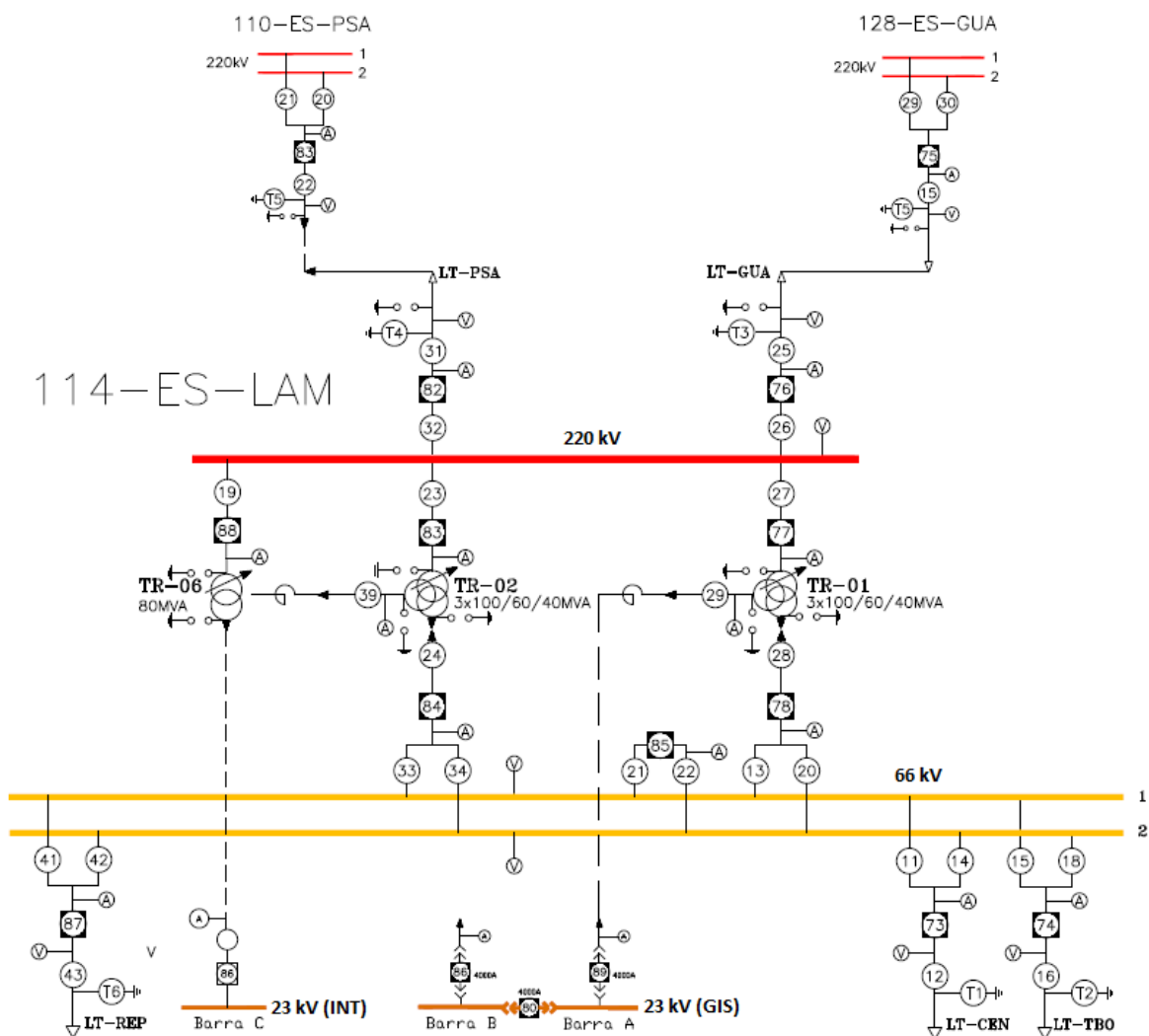


Figura 1: Diagrama mímico de la subestación Lambaré en la época del evento (enero de 2018)

Haciendo referencia a la Fig. 1, la configuración operativa empleada comúnmente era la siguiente: el banco de transformadores TR-01 alimentaba las barras “A” y “B” de 23 kV (celdas GIS) ubicadas en la nueva casa de control, y el TR-02 operaba sobre la barra de 66 kV alimentando las líneas Tres Bocas (LT TBO) y Republicano (LT REP). Por otra parte, el transformador trifásico TR-06 (provisorio) se encargaba de alimentar la barra “C” de 23 kV también provisoria, conformada por interruptores de intemperie.

Según lo referido por el Despacho de Cargas de la ANDE, hacia fines de enero del 2018 el escenario hidroenergético fue tornándose bastante desfavorable en la CH-IPU debido al poco salto útil en la central; es decir, las máquinas apenas alcanzaban a generar la potencia nominal. Debido a ello y por conveniencia económica para la empresa, fue necesaria la transferencia de un gran bloque de carga del SS1 (Itaipú+Acaray) sobre el SS2 (Yacyretá), necesitándose para el efecto la realización de un gran número de maniobras operativas de reconfiguración en varios locales. La mayor parte de dichas maniobras ya habían sido anticipadas y efectuadas durante el fin de semana que antecedió al evento, las cuales consistieron esencialmente en el traspaso de carga de parte del Sistema Sur sobre la EBY.

Sin embargo, como el panorama continuó desfavorable desde el punto de vista energético, en la penúltima semana de enero se decidió transferir igualmente parte de la carga del área Metropolitana (Guarambaré, Lambaré y San Antonio) del SS1 al SS2, para lo cual se tenía planeado efectuar una rápida recomposición sistémica de tales locales. En tal sentido, el día lunes 22 de enero, pasado el mediodía (13:08 horas) y antes de ingresar al período del primer pico de carga pesada (a la siesta), la SE-LAM fue desconectada por completo del SS1, dándose inicio a una rápida sucesión de maniobras operativas tendientes a volver a energizarla lo más pronto posible sobre el SS2. Como se detalla en la sección 3, las maniobras de reconfiguración siguieron un curso aparentemente normal hasta la reenergización (ya sobre Yacyretá) del tercer transformador de gran porte en Lambaré (el TR-01), cuando antes de que los transformadores empezaran a tomar carga, se produjo la repentina explosión y avería de los descargadores de tensión del lado 23 kV del TR-01, con el consiguiente disparo instantáneo de dicho transformador.

Con posterioridad al evento, y ante el reporte operativo, soportado por registros de mediciones, de que se habrían verificado sobretensiones elevadas en toda la instalación, algunos conjeturaron inicialmente de que el causal del evento podría haber sido quizás una ferresonancia en el propio circuito de salida de 23 kV del TR-01, conformado por el cableado de interconexión subterráneo entre el transformador, los reactores limitadores en serie y la posición de llegada de trafo en las celdas de 23 kV. Se pensó esto al inicio debido principalmente a que los únicos descargadores que habían explotado fueron los de la salida de 23 kV del TR-01, que era justamente el único transformador que tomaba carga de los alimentadores, puesto que el otro banco de transformadores (TR-02) solo alimentaba las barras de 66 kV, y se hallaba desconectado del cableado de salida de 23 kV, con el seccionador (89-39) correspondiente en posición abierto inclusive.

Con el transcurrir de los días, y tras la descarga y análisis de la oscilografía del evento -lo cual es detallado en la sección 3-, la hipótesis de la ferresonancia fue perdiendo fuerza, ya que como se describe en [2] esa clase de fenómeno es casi siempre de tipo serie, originado por lo general a partir de la actuación u operación desequilibrada de llaves o fusibles (algo relativamente común en circuitos de medición en distribución). En este caso sin embargo, todas las evidencias apuntaban a que el fenómeno que se había suscitado en Lambaré habría sido producto de una resonancia paralela a causa de la interacción entre la impedancia resonante del por entonces débil SS2 y las corrientes de *inrush* generadas en la energización de los transformadores de gran porte, ricas en componentes armónicas. Tal resonancia armónica paralela habría sido la real causante de la aparición de las sobretensiones temporarias registradas, cuyos conceptos básicos son expuestos en la sección 2.

En la sección 3 se describe detalladamente el evento y se analiza el fenómeno de la sobretensión temporaria registrada, lo cual se busca replicar más adelante en la sección 4 por medio de simulaciones digitales en ATP/EMTP. Finalmente, en la sección 5 se enumera una serie de medidas

que han sido recomendadas con el objeto de evitar la reaparición de este fenómeno en el futuro, o de al menos mitigar sus consecuencias. La sección 6 resume las principales conclusiones del artículo.

2 SOBRETENSIONES TEMPORARIAS POR RESONANCIA PARALELA

Durante la fase inicial de recomposición de un sistema de potencia, éste tiende a ser débil por lo general, ya que el mismo se compone muchas veces de unas pocas líneas de transmisión -comúnmente largas-, acopladas a un parque generador escaso o remoto, lo cual da como resultado una baja capacidad de cortocircuito, lo que determina a su vez que la impedancia serie equivalente del sistema sea alta, y ésta al asociarse con las capacitancias de la línea de transmisión provoca en determinados casos que los primeros picos resonantes de la impedancia armónica del sistema se sitúen en zonas de relativa baja frecuencia (< 1 kHz). En caso de que estos elevados picos de impedancia armónica sean excitados por corrientes de elevado contenido armónico el sistema de potencia corre el riesgo de experimentar sobretensiones temporarias (o TOV por sus siglas en inglés) por resonancia paralela [1,3,4].

En la Fig. 2a se muestra el diagrama simplificado de un sistema de potencia en fase inicial de recomposición, en el que se observa la impedancia serie equivalente (generalmente de elevado valor durante la restauración) así como la capacitancia de la línea, asociados a un transformador a ser energizado en vacío. La Fig. 2b muestra el barrido en frecuencia de la impedancia armónica del sistema, en el que se observan picos elevados en torno a las primeras componentes armónicas. Algunas de las fuentes típicas de inyección de corriente armónica son justamente las producidas por las corrientes de *inrush* y/o de sobreexcitación [4] generadas por la saturación de transformadores de potencia, producto de la energización y/o a causa de las elevadas tensiones aplicadas a los transformadores, como se indican en las Figuras 2c y 2d.

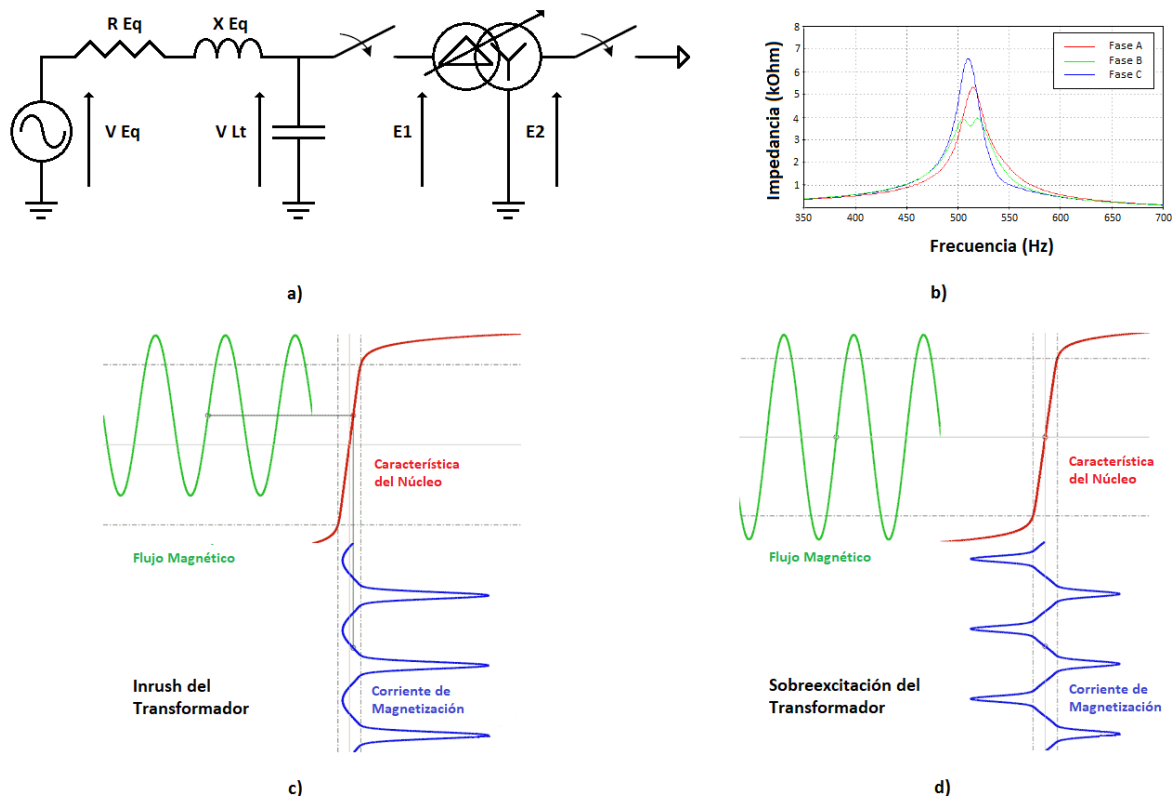


Figura 2: (a) Sistema equivalente durante una recomposición sistémica; (b) Impedancia armónica; (c) Corrientes de *Inrush* de energización; (d) Sobreexcitación de un transformador

Las sobretensiones temporarias de tipo resonante son tensiones oscilatorias no amortiguadas o débilmente amortiguadas que se originan a raíz de operaciones de maniobras y no-linearidades en equipos, y son el resultado de la interacción entre impedancias resonantes en múltiplos de la fundamental, las cuales son excitadas por fuentes de corrientes armónicas, como ser transformadores saturados, lo cual puede acarrear la aparición de sobretensiones de larga duración y provocar la avería de descargadores de tensión y fallas en el sistema, con prolongados tiempos de reposición [1,3].

Durante la fase de recomposición, el aumento de tensión en el sistema producto de las corrientes de carga capacitiva de las líneas puede ser suficiente para sobreexcitar transformadores y generar corrientes armónicas significativas. Si la combinación de la impedancia equivalente del sistema y la capacitancia de las líneas es adversa, puede establecerse una resonancia armónica. Las componentes armónicas en las corrientes de magnetización durante la saturación excitarán tales resonancias, lo cual puede resultar en sobretensiones peligrosas. Por más de que los transformadores no sean continuamente sobreexcitados, los armónicos generados por las corrientes de magnetización en el *inrush* de energización pueden ser suficientes para excitar las resonancias. Los principales factores que son característicos de las redes durante la restauración y que contribuyen a las sobretensiones armónicas son [1,3]:

- La frecuencia natural del equivalente serie formado por la inductancia de la fuente más la línea y la capacitancia de ésta puede, bajo condiciones normales de operación, ser un múltiplo de bajo orden de la frecuencia fundamental;
- La corriente de magnetización del *inrush* de energización de un transformador posee un alto contenido armónico;
- En las etapas iniciales de recomposición, las líneas se hallan escasamente cargadas y por lo tanto los transitorios son débilmente amortiguados.

En el caso de la resonancia paralela, las componentes armónicas de la corriente que coinciden con las frecuencias resonantes del sistema son amplificadas, creando por tanto sobretensiones en los terminales del transformador. Esto acarrea niveles más altos de saturación y por consiguiente, niveles más elevados en las corrientes armónicas presentes en el *inrush*, lo cual resulta de nuevo en un aumento de las tensiones, retroalimentando el fenómeno. Estas sobretensiones sostenidas pueden darse principalmente en sistemas débilmente amortiguados, algo muy común en los procedimientos de restauración previos a la toma de carga.

Los factores que contribuyen a incrementar el nivel de sobretensión por resonancia paralela son:

- Nivel de cortocircuito bajo;
- Líneas de transmisión largas;
- Transformadores de gran porte (tamaño);
- Alta densidad de flujo magnético del transformador (baja V_k o “tensión de rodilla”);
- Tap del transformador en posición de baja relación de transformación;
- Elevada tensión operativa.

De igual manera, factores que exacerbaban el fenómeno del *inrush* de energización y por ende de la saturación, pueden incidir adversamente en los niveles de sobretensión, como por ejemplo:

- “*Inrush* simpático” de transformadores (energización de transformador con otro(s) ya en servicio);
- “Pseudo-*inrush*” a consecuencia de la reenergización (tras despeje de fallas);
- Flujo remanente en el núcleo de los transformadores;
- Dispersión de polos de los interruptores de maniobra;
- Asimetría de las tensiones del sistema;
- Pérdidas resistivas en los conductores.

3 DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS DEL EVENTO EN LAMBARÉ

El día 22/01/18 antes del evento, la SE-LAM se hallaba operando sobre el SS1 de Itaipú, alimentada a partir de la LT 220 kV LAM-PSA (y de la doble terna PSA-VHA). A la siesta, cuando se juzgó necesario efectuar la transferencia de parte de las cargas del área Metropolitana sobre el SS2 de Yacyretá -el cual opera en forma separada del SS1-, la subestación Lambaré fue desconectada por completo del SS1, con la intención de efectuar su rápida restauración sobre el SS2. En la Figura 3 se incluye un esquema mímico del SS2 sobre el cual se pretendía efectuar la recomposición de la SE-LAM, y a seguir se transcribe parcialmente el Parte del Despacho de Cargas de las maniobras efectuadas ese día, así como las principales observaciones operativas registradas:

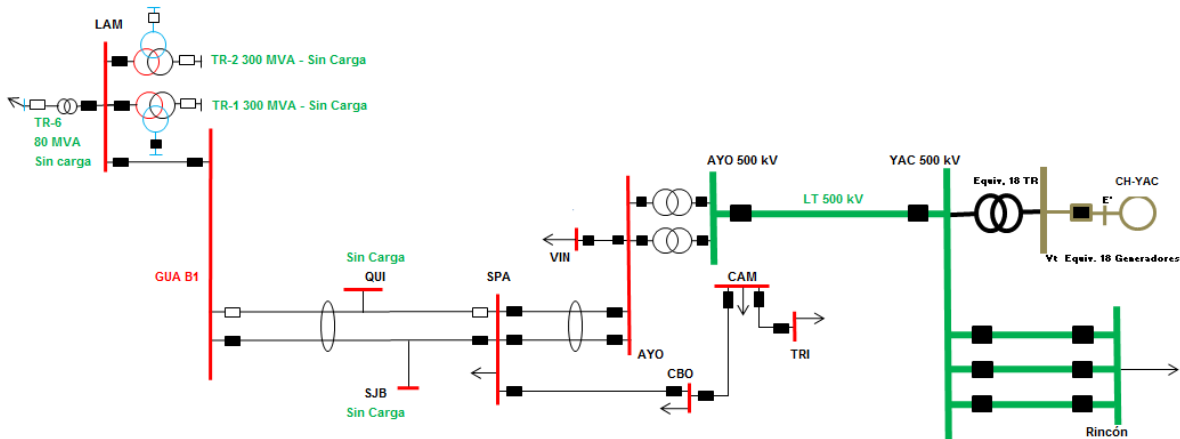


Figura 3: Diagrama mímico del SS2 (Yacyretá) durante el cambio de fuente en la SE-Lambaré

Las maniobras efectuadas el día 22/01/18 con el objeto de transferir una parte de la carga del Metropolitano del SS1 al SS2 fueron, según el reporte del Despacho de Cargas:

- 13:08 ES-GUA: Sin tensión. Normalizado a las 13:39 hs.
- 13:09 SE-TBO: Sin tensión. Normalizado a las 13:37 hs.
- 13:11 ES-LAM: Sin tensión. (Incluyendo el TR-06, que fue normalizado a las 13:32 hs).
- 13:18 ES-SJB: Sin tensión. Normalizado a las 13:23 hs.
- 13:18 ES-VAP: Sin tensión. Normalizado a las 13:23 hs.
- 13:22 ES-SPA: Se envía tensión con fuente Yacyretá sobre la LT SPA-SJB-GUA con 230 kV en vacío. Debido a que llega en ES-GUA con 237 kV se procede a reducir hasta 230 kV en la punta de la ES-GUA. Con 230 kV se cierra el interruptor de llegada, se energiza la barra de la ES-GUA y los 3 TRs de la ES-LAM. En la ES-LAM dispara el interruptor lado 220 kV del TR-01. Señaliza relé diferencial. Una vez normalizados los TRs restantes se constata descargadores averiados lado 23 kV del TR-01 220/66/23 kV.

Observaciones del Despacho de Cargas:

- El CER-GUA (Compensador Estático de Reactivos) se encontraba F/S y en fase de descarga de los capacitores durante todo el proceso inicial del cambio de fuentes.
- La tensión de llegada en la ES-GUA fue reducida hasta 230 kV mediante maniobras de taps en los autotransformadores 500/220 kV de la ES-AYO.
- Con 230 kV fue energizada la barra de la ES-LAM. Primeramente se energizó el TR-06 220/23 kV de 80 MVA, seguidamente el TR-02 220/66/23 kV de 300 MVA, y finalmente el TR-01 220/66/23 kV de 300 MVA, que posteriormente acusó la avería de los descargadores.
- En la época, el TR-01 220/66/23 kV alimentaba solo parte de la carga de 23 kV de la SE-LAM (barras "A" y "B" GIS), no tenía carga en 66 kV.
- El TR-02 220/66/23 kV solo alimentaba la carga de la LT 66 kV LAM-TBO de forma radial (4 TRs 66/23 kV en la SE-TBO). No alimentaba carga en 23 kV (su seccionador 89-39 de salida lado 23 kV se hallaba abierto inclusive).
- El TR-06 220/23 kV operaba en forma totalmente separada alimentando exclusivamente la barra "C" provisoria, compuesta por interruptores de intemperie.

En la Figura 4 se incluye un registro parcial de la oscilografía captada el 22/01/18 correspondiente al TR-01, que disparó de forma instantánea tras la avería de los descargadores de 23 kV. Por razones de espacio, en la Fig. 4a solo se incluyen las formas de ondas de las tensiones y corrientes de la fase “R” del lado 220 kV del TR-01, antes (pré-falla de 300 ms) y tras la liberación de la falla (pós-falla de 300 ms). En la Fig. 4b se grafica el espectro armónico de las mismas señales de tensión y corriente 220 kV.

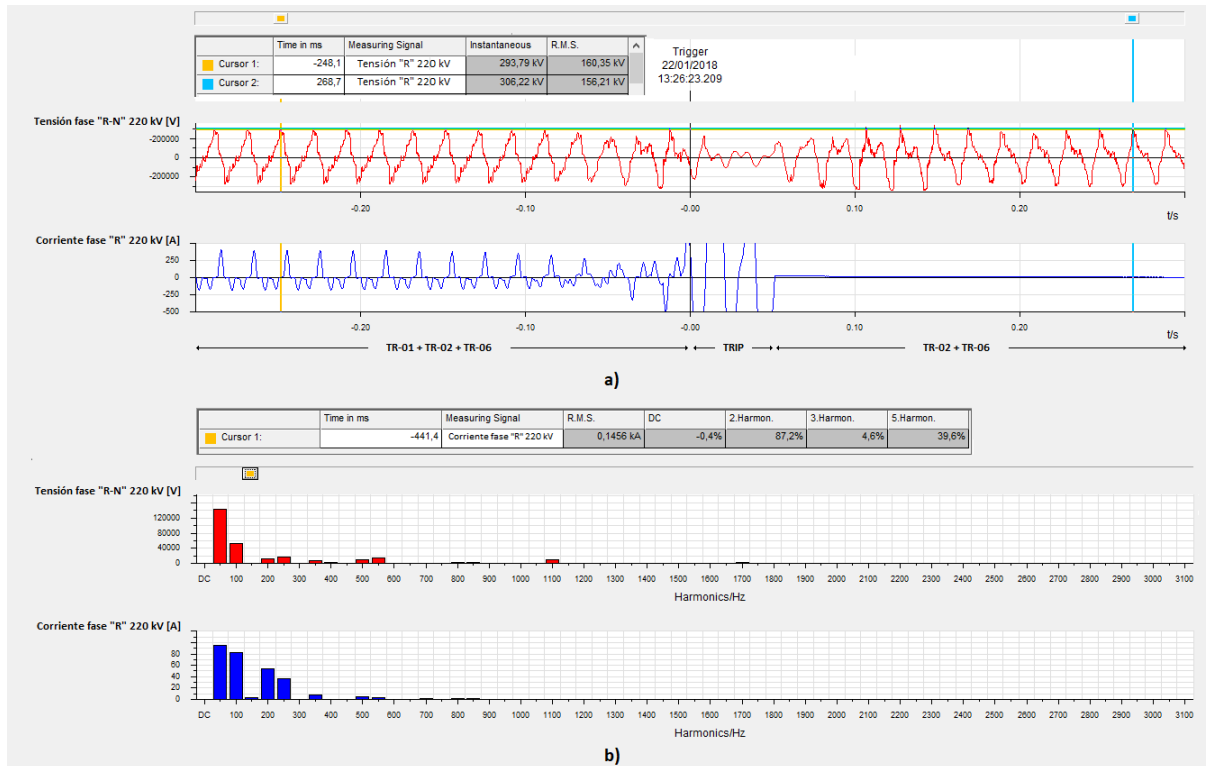


Figura 4: Tensiones y corrientes fase “R” 220 kV: a) Oscilografía; b) Espectro armónico

Como se observa en la Fig. 4a, durante el período de pré-falla, con los tres transformadores tan solo energizados desde el lado de alta, antes de que cualquier transformador tomara carga, ya se registraba una sobretensión sostenida en LAM, con valores picos superiores a los 293 kV (fase-neutro) en el lado 220 kV y también existía una corriente (de excitación) en el lado de alta, del orden de los 415 A pico (145 A RMS aproximadamente). Todas estas tensiones y corrientes poseían una fuerte distorsión armónica -como se constata en la Fig. 4b-, compuesta de armónicos de bajo orden principalmente (con exclusión de la 3era. y las triplas, que se hallaban circulando en los deltas de los transformadores). En otras palabras, a pesar de que los devanados de 66 y 23 kV se hallaban abiertos, se observaba una corriente de régimen permanente elevada en el primario, la cual posiblemente era producto de la resonancia paralela entre los elementos saturables (lo núcleos) de los transformadores y la impedancia natural del sistema, acarreado las sobretensiones temporarias presentes en toda la instalación.

Una cuestión muy interesante que se descarta totalmente a partir de la oscilografía es la hipótesis de que el fenómeno se haya originado a causa de alguna eventual ferresonancia originada en los circuitos de 23 kV de los bancos de transformadores, ya que como se visualiza en el período de pós-falla de la Fig. 4a, una vez que el TR-01 ya quedó desconectado del sistema (luego del Trip), el mismo fenómeno se reactivó nuevamente (solo cambió levemente la “inclinación” de las formas de ondas) con la sola presencia de los TR-06 y TR-02, siendo que éste último (similar al TR-01) poseía su circuito de 23 kV totalmente desacoplado, estando su seccionador 89-39 de 23 kV abierto. Sin embargo, el circuito conformado por los reactores limitadores serie y los cables subterráneos de 23 kV (de alta capacitancia) sí pudo haber tenido cierta incidencia quizás para magnificar aún más la sobretensión registrada en el devanado de 23 kV del TR-01 (cuyo seccionador 89-29 sí se encontraba cerrado), presumiblemente a causa del aumento de tensión decurrente del efecto capacitivo.

4 SIMULACIONES DIGITALES EN ATP/EMTP

Con el objeto de analizar el evento observado en campo, se recurrió a simulaciones digitales en ATP/EMTP procurando recrear lo más fielmente posible las condiciones operativas existentes en aquella ocasión. Para ello se reutilizó gran parte del modelo digital del SS2 normalmente empleado en ANDE para el análisis de transitorios, ajustándolo a la configuración mostrada en la Fig. 3, tratando de seguir en la medida de lo posible la misma secuencia de maniobras detallada en la sección 3.

Los aspectos más resaltantes del modelado en ATP del sistema se enuncian brevemente a seguir:

- Generadores: 18 máquinas operando en Yacyretá, íntegramente modeladas.
- Líneas: representadas por sus parámetros distribuidos.
- Transformadores: utilizando la rutina BCTRAN del EMTP, incluyendo el uso de ramas externas formadas por elementos no lineales del tipo 96 (para llevar en cuenta la histéresis). De esa forma se consigue simular el flujo remanente en el núcleo.

Una vez ajustado el modelo del SS2 a las condiciones vigentes en el día del evento se efectuaron una serie de simulaciones digitales, de forma a intentar recrear el evento así como para evaluar la efectividad de algunas medidas paliativas típicamente empleadas para estos tipos de situaciones. A seguir se incluye un par de casos simulados más representativos:

1. Caso 1: Energización en vacío de los TR-01, TR-02, TR-06, sin carga (condición del evento)

Condiciones iniciales: La SE-LAM recibe tensión con fuente Yacyretá cercana a los 1.1 PU alimentada por las LTs PSA-SJB-GUA y GUA-LAM. Los 3 transformadores son energizados en vacío, con los interruptores secundarios y terciarios abiertos.

La Fig. 5 muestra una simulación en ATP de una energización de los 3 transformadores de potencia en Lambaré, sin carga alguna. Se observan sobretensiones sostenidas (y distorsionadas) superiores a los 1.28 PU, las que si bien no alcanzan valores de pico tan elevados como los detectados en campo, poseen magnitudes RMS del mismo orden que las registradas por la oscilografía. (Observación: posiblemente sea necesario refinar un poco más los modelos de los elementos saturables (núcleos) de los transformadores para obtener niveles de distorsión -y valores de pico- totalmente similares a los registrados en campo).

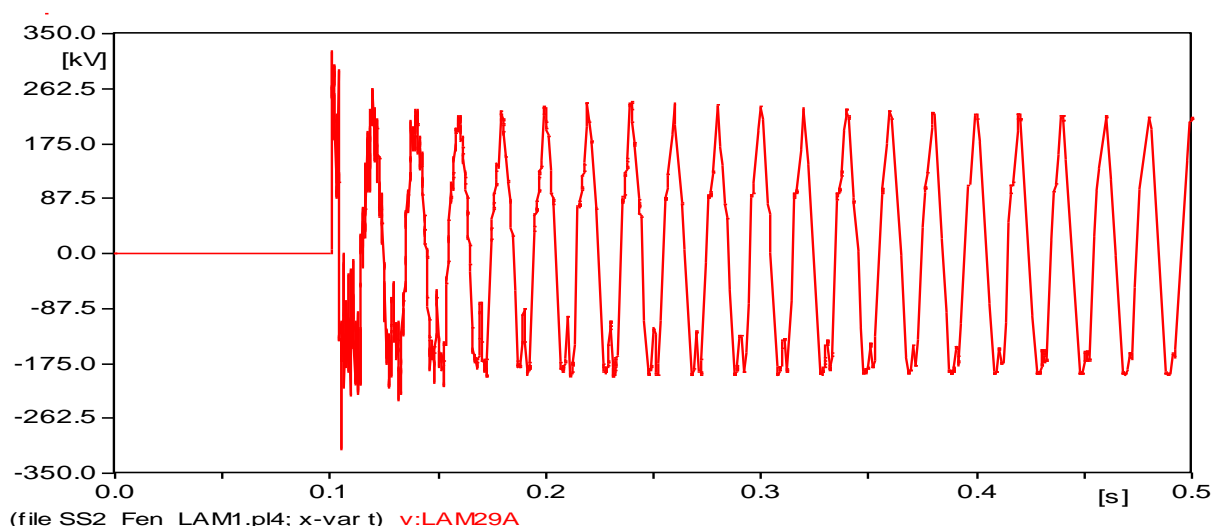


Figura 5: Tensión fase “R” 220 kV tras energización de transformadores en vacío en la SE-LAM

2. Caso 2: Toma de carga del TR-06 con los TR-02 y TR-06 energizados

Condiciones iniciales: Tras producirse el disparo del TR-01 en la SE-LAM, los TR-02 y TR-06 quedaron energizados por el lado 220 kV, y 6 minutos después se empezó a cargar el TR-06 (condición del evento).

La Fig. 6 grafica la tensión de la fase “R” lado 220 kV durante la toma de carga del TR-06, luego de haber estado operando los TR-02 y TR-06 en las condiciones del caso 1 (en vacío con sobretensión de 1.28 PU). Se observa la rápida normalización de las formas de ondas así como una significativa disminución de las magnitudes de tensión en la barra de 220 kV de la SE-LAM, cayendo el voltaje a 0.9 PU. (Observación: La simulación mostrada en la Fig. 6 muestra un abrupta toma de carga de 80 MVA -la potencia nominal- del TR-06, lo cual en la práctica evidentemente no fue así, sino que se fue dando de forma paulatina a medida que se fueron cerrando los alimentadores de 23 kV. Tampoco la gradual acción normalizadora del regulador de tensión del TR-06 se halla contemplada en este caso).

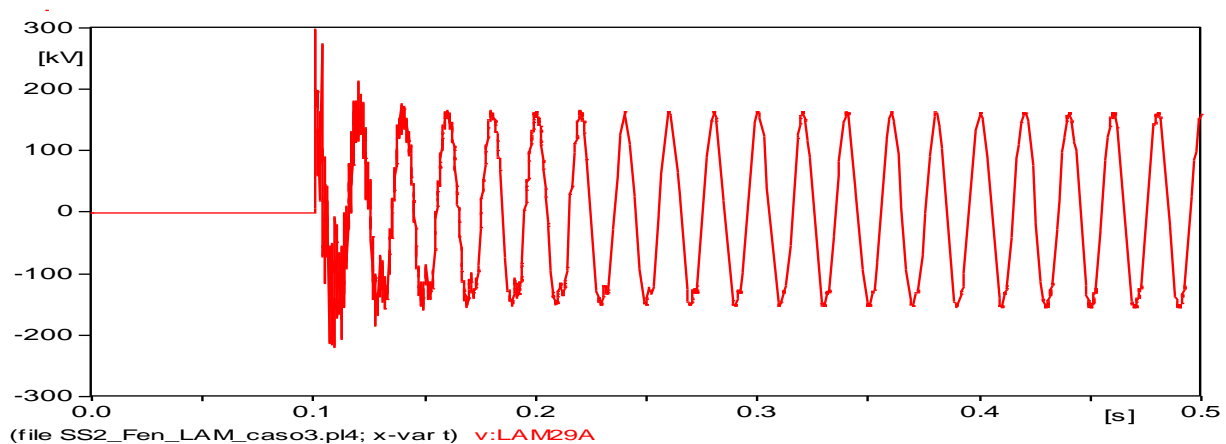


Figura 6: Tensión fase “R” 220 kV tras toma de carga del TR-06 en la SE-LAM

5 MEDIDAS PREVENTIVAS Y/O PALIATIVAS

Ante la evidencia de que el fenómeno registrado en Lambaré habría sido de origen eminentemente sistémico, ligado íntimamente a la maniobra de transformadores de gran porte sobre un sistema débil (SS2) y descargado (con poco amortiguamiento), se emitieron y adoptaron algunas medidas operativas tendientes a minimizar el riesgo de su reaparición futura. A seguir se citan algunas de tales principales medidas, recomendadas a partir de la consulta en la literatura [1,3,4]:

- Recomposición por etapas: Consistente básicamente en la toma intermedia de carga; es decir, en vez de tratar de restaurar toda la subestación Lambaré a partir de una débil interconexión (SS2) operando en vacío, se recomendó buscar la carga del sistema de transmisión en puntos intermedios. Así por ejemplo, antes del envío de tensión hacia la SE-LAM se podría tomar la carga en derivación existente en San Juan Bautista, efectuar el cierre del reactor de 20 MVA en Guarambaré, y lo que sería lo ideal: restablecer el Compensador de Reactivos (CER-GUA) de este último local de forma a restaurar el pleno control de tensión en tal sitio.

Para la SE-LAM también se recomendó que una vez recibida la tensión desde la SE-GUA se energice primeramente el TR-06 (80 MVA) y se efectúe su carga, para proceder posteriormente a la energización del TR-02 (300 MVA) seguido de su toma de carga en 66 kV, para por último pasar a restablecer el TR-01 (300 MVA) prosiguiendo con su toma de carga en 23 kV. Todo esto acarrearía evidentemente mayores tiempos de reposición, precautelando en contrapartida la integridad del sistema de potencia.

- Energización a tensión reducida: En su momento y en caso de la ausencia de un control fino de tensión en Guarambaré, se recomendó procurar la disminución de tensión en la fuente (en Ayolas), dentro de los límites posibles. Esto último sin embargo amerita continuar siendo investigado, ya que al menos a partir de las simulaciones preliminares efectuadas, no ha arrojado resultados del todo concluyentes; es decir, no ha quedado totalmente claro si esta medida por sí sola ya bastaría para garantizar la no aparición del fenómeno en Lambaré.
- Minimización del *inrush* de energización: como el fenómeno es disparado a partir del *inrush* o de la sobreexcitación de los transformadores de potencia, una medida que podría resultar efectiva quizás, sería intentar la anulación o al menos la disminución del *inrush* de energización. Existen varios métodos para dicho cometido, pero uno de los más efectivos y populares (últimamente) sería a través del cierre controlado de los transformadores, por medio del accionamiento sincronizado de los polos de los interruptores de potencia [5].

Finalmente, a modo paliativo y para el hipotético caso en que se volviera a presentar un fenómeno de ese tipo a pesar de las medidas operativas adoptadas, también se consideró la incorporación de una protección por sobretensión (59) a ser implementada en los IEDs de protección diferencial (87) de los transformadores. En la práctica sin embargo, tal medida de protección no ha podido ser implementada hasta el momento a causa de algunos inconvenientes relacionados al firmware de los IEDs, lo cual se espera que sea subsanado en algún momento.

6 CONCLUSIONES

- Las sobretensiones temporarias registradas en Lambaré el 22/01/18 se habrían debido a causa de una resonancia armónica paralela resultante de la interacción entre las corrientes de magnetización del *inrush* de energización de los transformadores y la impedancia armónica del sistema, cuyas frecuencias naturales (los primeros picos) se habrían situado en zonas de baja frecuencia a causa de la alta impedancia equivalente del sistema (SS2 con bajos niveles de cortocircuito y amortiguación), predisponiendo la excitación de las resonancias.
- Con el objeto de minimizar la posibilidad de reincidencia de ese tipo de eventos, se recomendó la restauración y toma de carga por etapas, sobre todo al efectuar la recomposición del sistema sobre una fuente débil como el SS2 de Yacyretá. También se hizo hincapié en la ventaja de restablecer primeramente el CER de Guarambaré.
- Como medida paliativa se recomendó la implementación de una función de protección por sobretensión (59) en los relés diferenciales de los transformadores de potencia.
- Como medida coadyuvante, a futuro se podría analizar con más detalle la conveniencia de efectuar el cierre controlado de los transformadores de potencia de Lambaré.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Cigré, “Transformer Energization in Power Systems: A Study Guide”, TB 568, 2014.
- [2] Cigré, “Resonance and Ferroresonance in Power Networks”, TB 569, 2014.
- [3] Martínez Velasco Juan. A., “Transient Analysis of Power Systems – Solution Techniques, Tools and Applications”, Wiley–IEEE Press, 2015.
- [4] Adibi M. M., Alexander R. W., Avramovic B., “Overvoltage Control During Restoration”, IEEE-PWRS 107-3, 1992.
- [5] Portales E., Mercier, A., “Controlled Switching of Unloaded Power Transformers”, Cigré-WG A3.07, 2007.