



## CONTROL DE CIERRE EN INTERRUPTORES CON MANDO SINCRONIZADO PARA DISMINUCIÓN DE SOBRETENSIONES DE ENERGIZACIÓN EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA TRIFÁSICOS

---

Víctor Rolón<sup>(1)</sup>; Josemaria Pérez<sup>(2)</sup>; Oscar M. Torres<sup>(3)</sup>.

(1) Facultad Politécnica-UNA: [vmrc.22@gmail.com](mailto:vmrc.22@gmail.com)

(2) Facultad Politécnica – UNA: [josema2886@gmail.com](mailto:josema2886@gmail.com)

(3) Administración Nacional de Electricidad: [oscar\\_torres@ande.gov.py](mailto:oscar_torres@ande.gov.py)

Paraguay

### RESUMEN

En el presente trabajo se realizan estudios de transitorios electromagnéticos referente a la energización de transformadores de potencia trifásicos. Específicamente se analizan las sobretensiones debidas a la aparición de la corriente de Inrush durante la energización de estos transformadores en subestaciones del Subsistema 1 (SS1), correspondiente al Sistema Interconectado Nacional (SIN) paraguayo. Con el fin de disminuir estas sobretensiones a las que se someten el transformador y el sistema eléctrico, se instalan interruptores con mando sincronizado para energizar los transformadores de potencia. Para poder realizar los estudios se emplea el software Alternative Transient Program (ATP) y en él se modela el subsistema 1, el sistema de control del interruptor con mando sincronizado y el inductor no lineal que simula el ciclo de histéresis del núcleo del transformador. Se realizan simulaciones en el modelo desarrollado para determinar las mejoras en las exigencias a las que se somete al transformador durante la energización con y sin los interruptores con mando sincronizado.

### PALABRAS CLAVES

1. Mando Sincronizado 2. Transformadores 3. Corriente de Inrush 4. Sobretensiones 5. Subestaciones 6. ATP

### 1. INTRODUCCIÓN

El funcionamiento continuo de los transformadores dentro de la estructura de los sistemas eléctricos de potencia es de vital importancia para la confiabilidad del sistema eléctrico, ya que cualquier trabajo de reparación o sustitución de un transformador dañado, que no haya sido programada, tiene un elevado costo y lleva mucho tiempo su reposición al sistema.

En la maniobra de transformadores de potencia, el flujo residual del transformador está siempre presente en la desconexión. Mientras que las sobretensiones generadas en la desconexión son de baja amplitud y generan pocos transitorios, en el cierre incontrolado se pueden generar corrientes de magnetización muy elevadas debido a la existencia de flujo remanente. Estas corrientes de conexión son ricas en armónicos y con un contenido de corriente continua muy importante. Pueden provocar perturbaciones eléctricas y mecánicas que afectarán al transformador dependiendo de las condiciones de la red en el momento de la maniobra, pueden igualmente crear sobretensiones transitorias severas. Estas últimas pueden exceder la capacidad energética de absorción de los equipos de la



instalación exponiéndolos a sobretensiones que superan sus límites asignados. Pueden igualmente causar un funcionamiento no deseado en los circuitos de protección y provocar un grave impacto en la calidad de servicio

En este trabajo se presentan los estudios de transitorios electromagnéticos que tienen por finalidad evaluar las sobretensiones debidas a la energización del transformador. Las energizaciones se efectúan con y sin interruptores con mando sincronizado.

## **2. TRANSITORIOS RELACIONADOS CON LA ENERGIZACIÓN DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA.**

La energización de un transformador en instantes aleatorios, según [1], puede resultar en flujos elevados en el núcleo de dicho equipo, saturando sus columnas y ocasionando altas corrientes de inrush, que pueden exceder varias veces la corriente nominal. La intensidad y forma de onda de la corriente de inrush dependen del instante sobre la onda de tensión en la cual ocurre el cierre de los contactos del interruptor, del valor del flujo residual y de la característica de saturación del núcleo.

La corriente de inrush puede causar los siguientes problemas en el sistema eléctrico: sobretensión temporal, operación indebida del relé diferencial de protección, estrés mecánico en los devanados, deterioro del aislamiento del transformador y caídas temporales de tensión. Estos problemas causan la reducción de la vida útil del transformador y la degradación de la calidad de la energía eléctrica.

## **3. MODELADO EN ATP.**

### **3.1 MODELADO DEL SUBSISTEMA 1.**

Actualmente el SIN opera en dos subsistemas eléctricamente separados, el Subsistema 1 y el Subsistema 2.

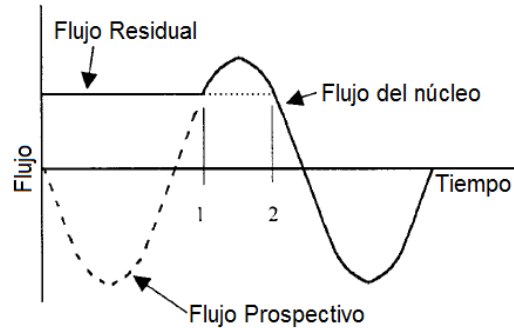
El modelo del SS1 corresponde al año 2016. En este año, la LT de 500 kV entre las subestaciones de la Margen Derecha de Itaipú y Villa Hayes ya forma parte del sistema. También la Subestación Villa Hayes.

### **3.2 MODELADO DEL SISTEMA DE CONTROL DEL INTERRUPTOR.**

La maniobra controlada aún no es aplicada en el SIN para maniobras de transformadores de potencia. Para poder modelar el sistema de control para el cierre sincronizado se utiliza la plataforma Models, que está disponible en el software ATP.

#### **3.2.1 PRINCIPIO DE SINCRONIZACIÓN.**

El principio básico para eliminar la asimetría del flujo de núcleo es que el flujo inducido (integral de la tensión aplicada) en el instante de energización debe ser igual al flujo residual. Por supuesto, no hay flujo inducido antes de la activación, pero la tensión de la fuente tiene la perspectiva de crear un flujo inducido. Si la tensión de la fuente es considerada como una fuente virtual de flujo, entonces el instante óptimo para energizar un transformador es cuando el flujo prospectivo es igual al flujo residual. Este principio se muestra en la Figura 1. Proporciona la estrategia básica para el cierre controlado de transformadores monofásicos.



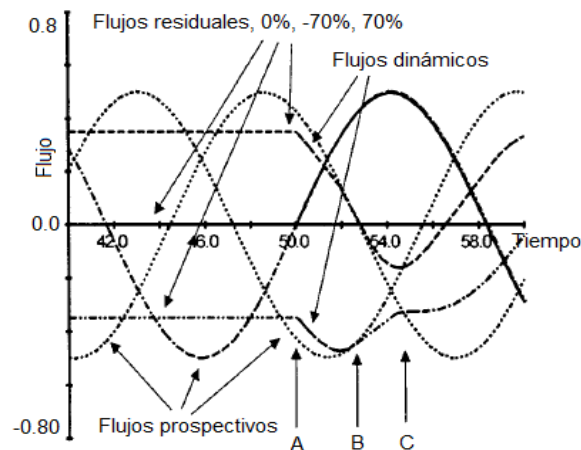
**Figura 1:** Se muestra la energización óptima de un transformador monofásico. Los puntos de energización óptimos existen a veces (1) y alternan el tiempo óptimo (2).

Para poder simular el flujo residual del núcleo, el transformador debe operar primeramente en régimen permanente y se desenergiza posteriormente antes de la energización.

### 3.2.2 CIERRE CONTROLADO EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA TRIFÁSICOS.

En primer lugar, por ilustración, se supone que se forma un patrón de flujo residual típico en un transformador, y la fase con residual cero (fase A) se excita en el punto óptimo de onda (tensión pico y, por tanto, flujo prospectivo cero). El flujo de núcleo dinámico resultante en las otras fases no se dividirá uniformemente. Los flujos dinámicos comienzan con sus respectivos niveles de flujo residual y se mueven alrededor de su bucle de histéresis en la misma dirección.

Dependiendo de las polaridades del flujo residual en las dos columnas, el flujo de núcleo dinámico y los flujos prospectivos serán iguales en el punto B o C, esto se puede ver en la Figura 2. Estos puntos ofrecen la oportunidad de energizar las otras dos fases sin saturación del núcleo. El punto B obviamente es más tolerante al error de sincronismo de cierre que el punto C, puesto que las pendientes de los flujos prospectivo y dinámico son casi iguales durante un período de aproximadamente un milisegundo, lo cual no es el caso en el punto C.



**Figura 2:** Flujo de núcleo prospectivo y dinámico para un transformador trifásico con flujo residual.

### 3.3 MODELADO DEL INDUCTOR NO LINEAL (TIPO 96).

Para poder estudiar la energización de transformadores, realizada a través del cierre controlado de los polos del interruptor, es imprescindible tener en cuenta la condición de magnetización residual del núcleo ferromagnético. Esta condición se obtiene con la utilización del ciclo de histéresis del núcleo, por lo que se vuelve obligatorio la implementación de este fenómeno en el modelado del transformador. Usualmente, la curva de histéresis no es proveída por los fabricantes.

El software ATP, posee un modelo de inductor no-lineal que permite la simulación del ciclo de histéresis. Para poder cargar los pares de valores Flujo – Corriente al inductor no-lineal es necesario recurrir a la rutina HYSDAT. La Figura 3 muestra la curva de histéresis que retorna la rutina HYSDAT.

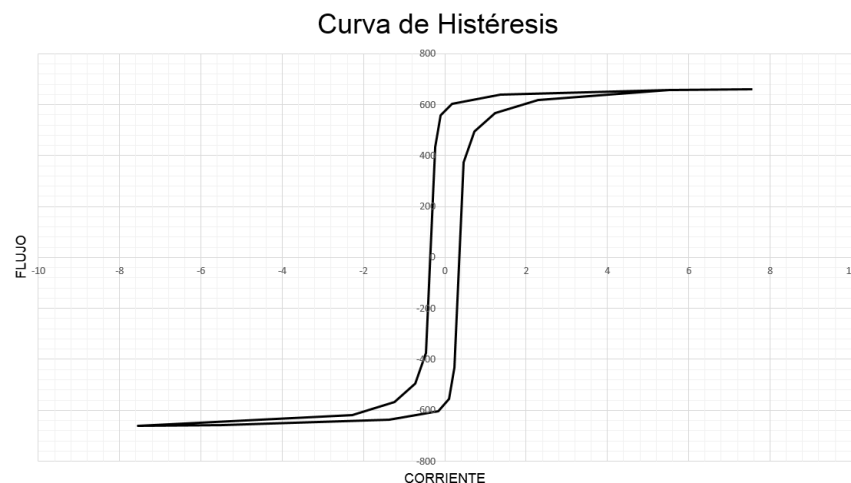


Figura 3: Curva de Histéresis que retorna la rutina HYSDAT para cargar al inductor no-lineal (Tipo 96).

## 4. ESTUDIOS DE CASOS.

### 4.1 ESTUDIOS.

El estudio se realiza en cinco subestaciones del SS1. El transformador estudiado es de 41,67 MVA. Las subestaciones donde se realizan los estudios son:

- Subestación San Lorenzo.
- Subestación Coronel Oviedo.
- Subestación Kilómetro 30.
- Subestación Horqueta.
- Subestación Loma Plata.

Aquí, se analizan las sobretensiones existentes en el transformador y en las subestaciones al momento en que se energiza el transformador de potencia en vacío y que estén dentro de valores establecidos por las normas. Estas energizaciones son realizadas en tiempos aleatorios con interruptores convencionales y en tiempos controlados con interruptores con mando sincronizado.

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

---

Primeramente se realizan estudios estadísticos del cierre sin control, para cada caso, con la finalidad de obtener las peores condiciones (máximo valor de cresta de la tensión) a las que se somete el transformador durante su energización. Se corren 100 energizaciones por cada caso y se eligen 3 peores casos. De estos tres peores casos se toman los tiempos de cierre del interruptor para posteriormente utilizarlos en los estudios determinísticos. Con los tiempos de cierre que se obtienen del estudio estadístico, se energiza el transformador con y sin mando sincronizado en estudios determinísticos. Se realizan ambos tipos de cierre con el fin de analizar los valores de tensión existentes en el transformador, en la subestación y en el sistema eléctrico.

## 4.2 CASOS SIMULADOS.

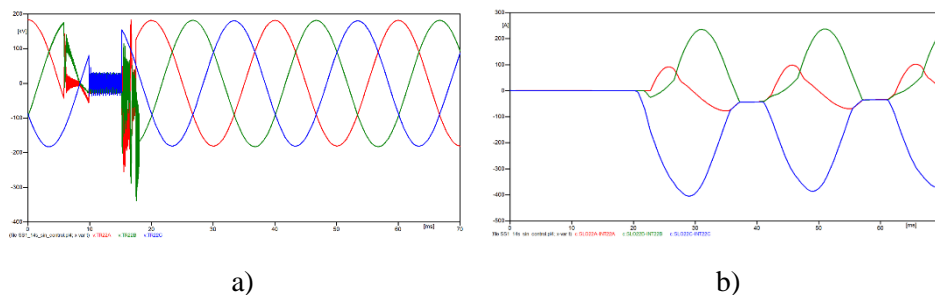
### 4.2.1 CASO 1: SUBESTACIÓN SAN LORENZO.

Se energiza el transformador en la Subestación San Lorenzo.

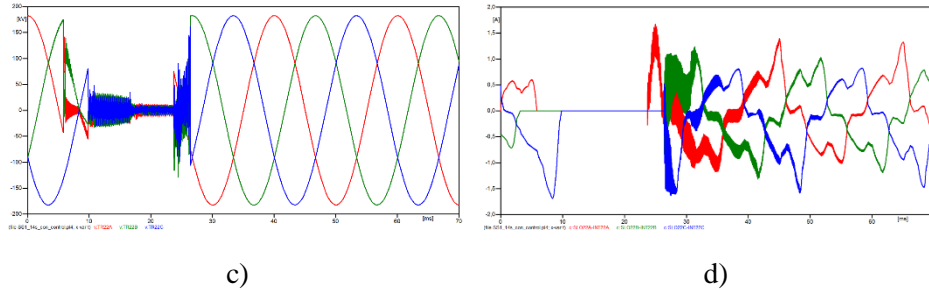
Estudio determinístico sin control: Para los tres casos donde el pico fue el máximo en el borne del transformador de potencia, se verifica que la sobretensión no supera el BIL de los equipos y supera por muy poco al rango de sobretensión (1,5 – 2 p.u.) definido en la Sección 3.1.2.4 de la norma de la IEEE, 1313.2 [2]. Sin embargo, las subestaciones más afectadas, con una leve perturbación y deformación de la onda senoidal de la tensión son San Lorenzo, Capiatá y Luque en sus respectivas barras de 220 kV. La Subestación Itauguá también es afectada por este fenómeno en su barra de 66 kV. Otras Subestaciones que presentan deformación de la onda senoidal de la tensión, pero mucho más leve son Coronel Oviedo, Eusebio Ayala, Parque Caballero y Pirayú, todas en sus barras de 220 kV. En todos los casos, el nivel de tensión de 23 kV no se ve afectado por ningún fenómeno durante la energización.

Estudio determinístico con control: Con este sistema de control se elimina la sobretensión que existe en bornes del transformador cuando este se energiza en forma aleatoria. Se analizan las mismas barras que en el estudio sin control de cierre. En este caso la onda senoidal de la tensión en todas las barras ya no presenta deformación. Sin embargo, se sigue presentando perturbaciones muy leves propias de la magnetización del núcleo.

En la Figura 4 se muestran gráficos que resultan de ambos estudios.



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



**Figura 4. Tensión y corriente en bornes de alta tensión del transformador sin (a y b) y con (c y d) mando sincronizado durante la energización. La tensión disminuye de 2,1 pu a 1,01 pu y la corriente de 3,67 pu a 0,01 pu.**

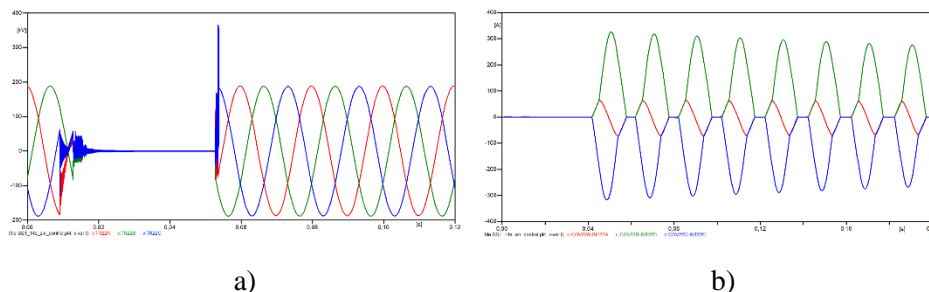
#### 4.2.2 CASO 2: SUBESTACIÓN CORONEL OVIEDO.

Se energiza el transformador en la Subestación Coronel Oviedo.

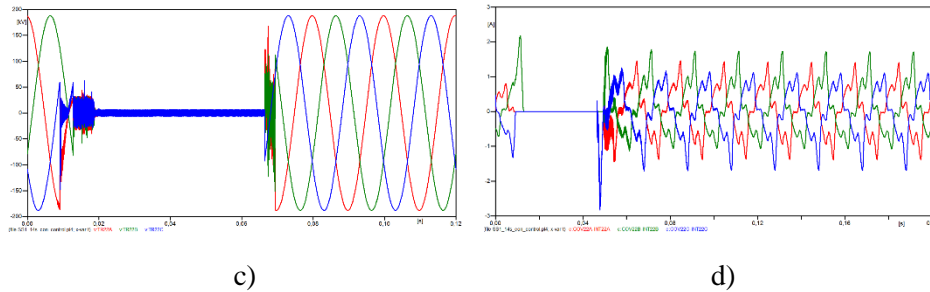
Estudio determinístico sin control: Al energizar el transformador en la Subestación Coronel Oviedo, para los tres casos donde el pico fue el máximo en el borne de este, se verifica que la sobretensión no supera el BIL de los equipos y supera por muy poco al rango de sobretensión (1,5 – 2 p.u.) definido en la Sección 3.1.2.4 de la norma de la IEEE, 1313.2 [2]. Sin embargo, las subestaciones afectadas, con una leve perturbación y deformación de la onda senoidal de la tensión son Capiatá y Kilómetro 30, en sus respectivas barras de 220 kV. La Subestación Itauguá se ve afectada de forma notable por este fenómeno en su barra de 66 kV. Otras Subestaciones que presentan perturbaciones de la onda senoidal de tensión, pero mucho más leve son Coronel Oviedo, Carayaó, San Lorenzo y Caaguazú, todas en sus barras de 220 kV. En todos los casos, el nivel de tensión de 23 kV no se ve afectado por ningún fenómeno durante la energización.

Estudio determinístico con control: Con este sistema de control se elimina la sobretensión que existe en bornes del transformador cuando este se energiza en forma aleatoria. Se analizan las mismas barras que en el estudio sin control. En este caso la onda senoidal de la tensión en todas las barras ya no presenta deformación. Sin embargo, se sigue presentando perturbaciones muy leves propias de la magnetización del núcleo.

En la Figura 5 se muestran gráficos que resultan de ambos estudios.



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



**Figura 5. Tensión y corriente en bornes de alta tensión del transformador sin (a y b) y con (c y d) mando sincronizado durante la energización. La tensión disminuye de 2,24 pu a 1,05 pu y la corriente de 3 pu a 0,02 pu.**

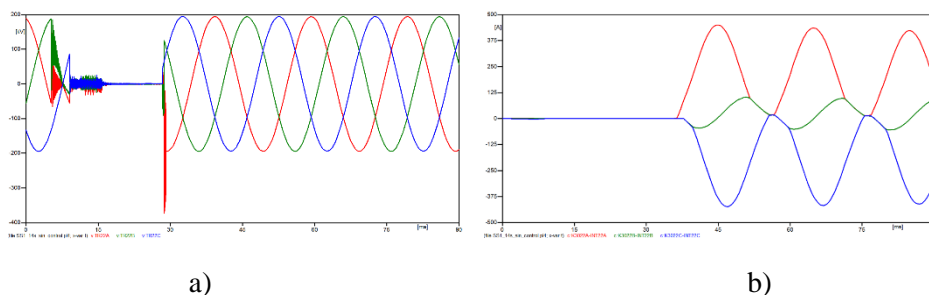
#### 4.2.3 CASO 3: SUBESTACIÓN KILÓMETRO 30.

Se energiza el transformador en la Subestación Kilómetro 30.

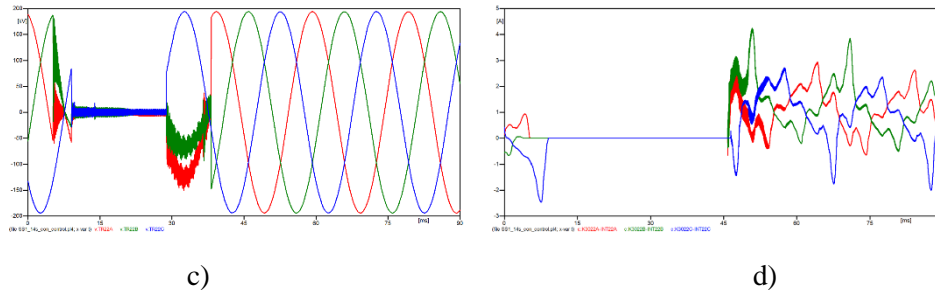
Estudio determinístico sin control: En bornes del transformador, para los tres casos donde el valor de cresta fue el máximo cuando éste se energiza, se verifica que la sobretensión no supera el BIL de los equipos y supera por muy poco al rango de sobretensión (1,5 – 2 p.u.) definido en la Sección 3.1.2.4 de la norma de la IEEE, 1313.2 [2]. Las subestaciones afectadas con una leve perturbación y deformación de la onda senoidal de la tensión son Paranambú y Caaguazú, en sus respectivas barras de 220 kV. Las subestaciones que se ven afectadas por el fenómeno citado más arriba en sus barras de 66 kV son Hernandarias, Presidente Franco y Kilómetro 15. La Subestación Kilómetro 30 presenta leve perturbación, no deformación, en su barra de 220 kV. En todos los casos, el nivel de tensión de 23 kV no se ve afectado por ningún fenómeno durante la energización.

Estudio determinístico con control: Con este sistema de control se elimina la sobretensión que existe en bornes del transformador cuando este se energiza en forma aleatoria. Se analizan las mismas barras que en el estudio sin control. En este caso la onda senoidal de la tensión en dichas barras de 220 kV ya no presenta deformación. Mismo resultado para las subestaciones con nivel de tensión igual a 66 kV. Sin embargo, se sigue presentando perturbaciones muy leves propias de la magnetización del núcleo.

En la Figura 6 se muestran gráficos que resultan de ambos estudios.



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



**Figura 6. Tensión y corriente en bornes de alta tensión del transformador sin (a y b) y con (c y d) mando sincronizado durante la energización. La tensión disminuye de 2,2 pu a 1,08 pu y la corriente de 4,6 pu a 0,04 pu.**

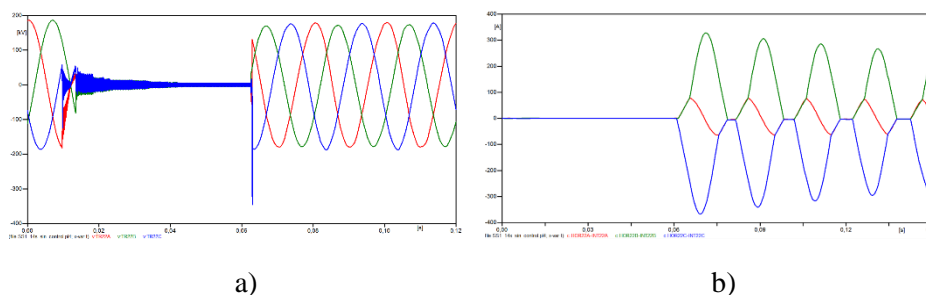
#### 4.2.4 CASO 4: SUBESTACIÓN HORQUETA.

Se energiza el transformador en la Subestación Horqueta.

Estudio determinístico sin control: En bornes del transformador, para los tres casos donde el valor de cresta fue el máximo cuando éste se energiza, se verifica que la sobretensión no supera el BIL de los equipos y supera por muy poco al rango de sobretensión (1,5 – 2 p.u.) definido en la Sección 3.1.2.4 de la norma de la IEEE, 1313.2 [2]. En este caso, donde se energiza el transformador en la Subestación Horqueta, las barras de las subestaciones analizadas se ven afectadas por una perturbación y deformación de la onda senoidal de la tensión. Además se puede constatar que la amplitud de esta onda no conserva el mismo valor de cresta en las fases durante la energización. Las subestaciones que se ven involucradas con estos fenómenos descritos son Vallemí II, Horqueta y Loma Plata, en sus respectivas barras de 220 kV. La Subestación Filadelfia en su barra de 66 kV también es afectada. También se verifica que las barras de 220 kV de Cerro Corá, Salto del Guairá e Itakyry y las barras de 66 kV y de 23 kV de Itakyry, Pedro Juan Caballero y Cerro Corá presentan en forma leve estos fenómenos.

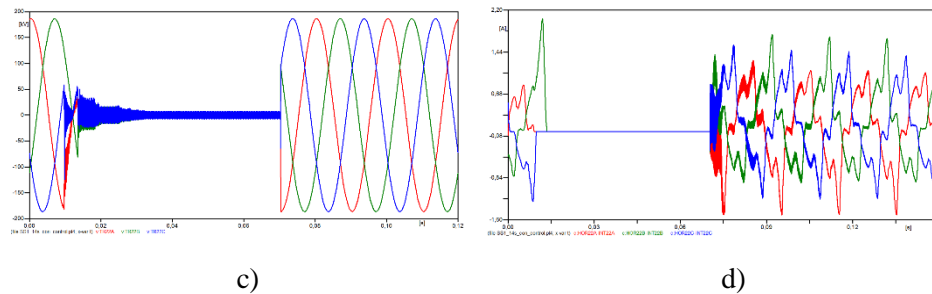
Estudio determinístico con control: Con este sistema de control se elimina la sobretensión que existe en bornes del transformador cuando este se energiza en forma aleatoria. Se analizan las mismas barras que en el estudio sin control. En este caso la onda senoidal de la tensión en dichas barras ya no presenta deformación. La amplitud de la tensión es la misma en las diferentes fases. Sin embargo, se sigue presentando perturbaciones muy leves propias de la magnetización del núcleo.

En la Figura 7 se muestran gráficos que resultan de ambos estudios.





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



**Figura 7. Tensión y corriente en bornes de alta tensión del transformador sin (a y b) y con (c y d) mando sincronizado durante la energización. La tensión disminuye de 2,2 pu a 1,04 pu y la corriente de 3,12 pu a 0,02 pu.**

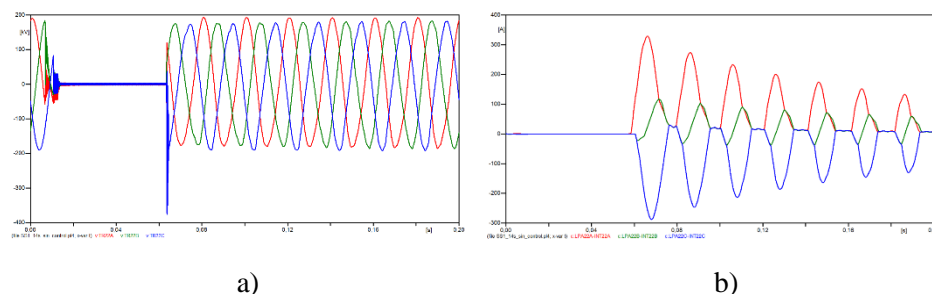
#### 4.2.5 CASO 5: SUBESTACIÓN LOMA PLATA.

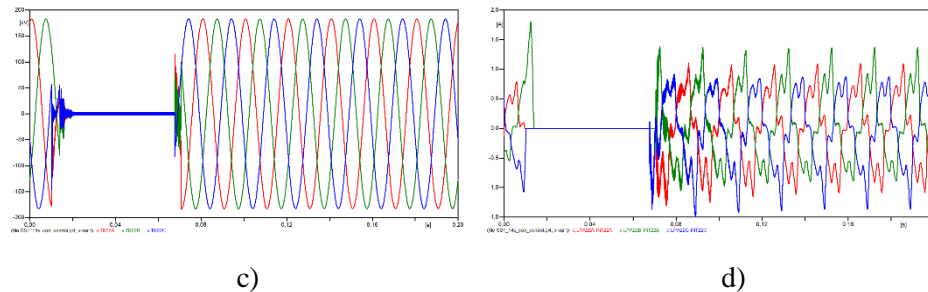
Se energiza el transformador en la Subestación Loma Plata.

Estudio determinístico sin control: En esta Subestación, así como en las anteriores, para los tres casos donde el valor de cresta fue el máximo cuando se energiza el transformador se verifica que la sobretensión en bornes de éste no supera el BIL de los equipos y supera por muy poco al rango de sobretensión (1,5 – 2 p.u.) definido en la Sección 3.1.2.4 de la norma de la IEEE, 1313.2 [2]. Las barras de las subestaciones analizadas se ven afectadas por una perturbación y deformación de la onda senoidal de la tensión. Además se puede constatar que, acompañado a estos fenómenos, la amplitud de esta onda en dos fases disminuye notablemente durante la energización. Las subestaciones que se ven involucradas con estos fenómenos son Vallemí I, Vallemí II y Loma Plata, en sus respectivas barras de 220 kV. La Subestación Filadelfia en su barra de 66 kV y la de Pedro Juan Caballero en su barra de 23 kV, también son notablemente afectadas. También se verifica que las barras de 220 kV de Cerro Corá, Salto del Guairá, Itakyry, Horqueta y las barras de 66 kV y de 23 kV de Itakyry, Loma Plata, Carayaó y Cerro Corá presentan en forma leve estos fenómenos.

Estudio determinístico con control: Con este sistema de control se elimina la sobretensión que existe en bornes del transformador cuando este se energiza en forma aleatoria. Se analizan las mismas barras que en el estudio sin control. En este caso la onda senoidal de la tensión en dichas barras ya no presenta deformación. La amplitud de la tensión es la misma en las diferentes fases. Sin embargo, se sigue presentando perturbaciones muy leves propias de la magnetización del núcleo.

En la Figura 8 se muestran gráficos que resultan de ambos estudios.





**Figura 8. Tensión y corriente en bornes de alta tensión del transformador sin (a y b) y con (c y d) mando sincronizado durante la energización. La tensión disminuye de 2,24 pu a 1,06 pu y la corriente de 3 pu a 0,01 pu.**

## 5. CONCLUSIONES.

En el presente trabajo se realizaron estudios de transitorios electromagnéticos referentes a la instalación de interruptores de potencia, con mando convencional y con mando sincronizado, en subestaciones del sistema eléctrico paraguayo para energización de transformadores de potencia. Los estudios se realizaron con la finalidad de analizar las sobretensiones a las que se somete el transformador y el sistema eléctrico durante la energización de este equipo de potencia.

La sección 4.4 de la Guía de la IEEE 1313.2 [2] supone que la probabilidad de resistencia del aislamiento es del 100% por debajo del BIL. Entonces, considerando que la sobretensión no supera el BIL de los equipos en ningún caso, ningún equipo está en riesgo de falla por sobretensión.

El equipo más beneficiado con el cierre controlado es el transformador, pues ya no estará expuesto a sobretensiones de maniobras y corrientes de energización elevadas, estos transitorios conllevarían a esfuerzos mecánicos y a desgastes del aislante del devanado del transformador. Lograr que estos efectos desaparezcan tendrá un impacto positivo en la extensión de la vida útil del transformador.

## 6. BIBLIOGRAFÍA.

[1] John H. Brunke, *Fellow, IEEE* and Klaus J. Fröhlich, *Senior Member, IEEE*. Elimination of Transformer Inrush Currents by Controlled Switching—Part I: Theoretical Considerations. IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 16, NO. 2, APRIL 2001.

[2] IEEE Guide for the Application of Insulation Coordination. IEEE Std 1313.2 – 1999.

[3] J. G. Santos, K. M. C. Dantas, W.L.A Neves. Redução de Corrente de *Inrush* em Transformadores. XVII ERIAC DECIMOSÉPTIMO ENCUENTRO REGIONAL IBEROAMERICANO DE CIGRÉ 2017.

[4] Rule Book – ATP. RB-19E.