



Comité Nacional Paraguayo



Unión de Ingenieros de ANDE

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

ESTUDIOS DE TRANSITORIOS ELECTROMAGNÉTICOS DE MANIOBRAS EN LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN DE 500 kV YACYRETÁ – AYOLAS – VILLA HAYES

Oscar M. Torres (oscar_Torres@ande.gov.py)

Victor E. Rolón (vmrc.22@gmail.com)

Tito R. Ocariz (tito_ocariz@ande.gov.py)

Administración Nacional de Electricidad - ANDE

PARAGUAY

RESUMEN

Este trabajo presenta los resultados de estudios de transitorios electromagnéticos que tienen por finalidad evaluar el comportamiento del sistema eléctrico de potencia ante las principales maniobras a las que estará sometida la línea de transmisión de 500 kV Yacyretá – Ayolas – Villa Hayes, principalmente en lo referente a solicitaciones del dieléctrico, desempeño de descargadores de sobretensión y viabilidad de utilización de reconexiones del tipo monopolar o tripolar.

En este contexto, considerando que los análisis de estudios de transitorios electromagnéticos asociados a las maniobras cobran mayor relevancia en relación a los transitorios originados por descargas atmosféricas para elementos que operan a tensiones superiores a 220 kV y tomando en cuenta la gran longitud de la línea en estudio (aproximadamente 359 km), este trabajo presenta los principales resultados de los análisis de maniobras de energización y reconexión automática de la línea aludida.

PALABRAS-CLAVES

Transitorios Electromagnéticos. Simulación Digital. ATP. Energización de Líneas. Reconexión Automática.



INTRODUCCIÓN

Los transitorios eléctricos constituyen la manifestación externa de un cambio repentino en las condiciones del sistema eléctrico. El régimen transitorio implica un periodo de tiempo generalmente muy corto. La fracción del tiempo en que operan la mayoría de los circuitos en dicho régimen es insignificante, comparada con el tiempo en que los mismos operan en régimen permanente. Sin embargo, el régimen transitorio es de suma importancia, ya que durante el mismo, los circuitos y equipos eléctricos están sujetos a grandes sollicitaciones por excesivas corrientes o voltajes.

La extensión de la línea de transmisión de 500 kV Yacyretá – Ayolas – Villa Hayes (de aproximadamente 359 km), impone la necesidad de evaluar las sollicitaciones eléctricas sobre la misma en ocasión de maniobras. Este trabajo presenta los principales resultados de los análisis de maniobras de energización y reconexión automática. Las siguientes secciones describen el modelado del sistema, la metodología aplicada y los resultados obtenidos, además de las conclusiones del estudio.

2 – MODELADO DE ELEMENTOS

Para obtener una representación apropiada del Sistema Interconectado Nacional fueron modelados los principales elementos del sistema de transmisión que tienen influencia en los fenómenos analizados, generadores, líneas de transmisión, transformadores, cargas, elementos de compensación reactiva, interruptores y descargadores de línea.

Los generadores fueron modelados como fuentes Tipo 14 del ATP (fuentes sinusoidales), conectados al sistema mediante equivalentes R-L acoplados (elemento tipo 51).

La representación de las líneas de transmisión fue realizada utilizando modelos de parámetros distribuidos constantes (Clarke, K. C. Lee) en líneas de longitud media y larga. En el mismo orden, para representar líneas de pequeña longitud fueron utilizados modelos de Equivalente - Pi con parámetros concentrados.

Por su parte, los transformadores fueron representados mediante el modelo STC (Saturable Transformer Component), las cargas y bancos de capacitores a través de elementos R-L-C concentrados, mientras que los descargadores de ZnO fueron modelados como elementos pseudo-lineales definidos por tramos rectos (R(i) Tipo 99).

Los interruptores empleados en los estudios fueron interruptores estadísticos y ordinarios controlados por tiempo.

Por su parte, los compensadores estáticos de reactivos fueron modelados como equivalentes shunt, debido a que su tiempo de respuesta es considerablemente superior a los tiempos involucrados en la mayoría de los procesos transitorios objeto de este trabajo.



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

3 – METODOLOGÍA APLICADA

Para las simulaciones fueron empleados los software ATP (Alternative Transient Program), considerando la configuración del Sistema Interconectado Nacional (SIN) para el año 2018, conforme establecido en los casos operativos del SIN.

Debido a que las magnitudes de las tensiones y corrientes transitorias dependen de los instantes de cierre de los contactos de los interruptores y a que tales tiempos constituyen un fenómeno aleatorio, los análisis de la evolución de variables en el dominio del tiempo (simulaciones determinísticas) fueron precedidos por simulaciones estadísticas, a efectos de maximizar las solicitaciones sobre los elementos del sistema.

Las simulaciones estadísticas consideran una Distribución Normal (Gaussiana) de los tiempos de cierre de los interruptores, caracterizada por una media y una desviación estándar. La desviación estándar depende de la característica de los interruptores mientras que el valor de la media es obtenido de las simulaciones sistemáticas, donde los tiempos de cierre de los interruptores siguen una Distribución Uniforme, de manera que en las simulaciones, los interruptores “barren” toda la onda de tensión, cerrando sus contactos a intervalos regulares de tiempo.

Fueron desarrollados básicamente dos tipos de análisis: energización de líneas y reconexión mono y tripolar. Estos análisis fueron realizados a efectos de verificar las máximas solicitaciones transitorias y el desempeño de los Descargadores de Sobretensión de la Línea de Transmisión en estudio.

Para los análisis de energización, además de verificar las máximas solicitaciones transitorias y el desempeño de los descargadores, las simulaciones aquí tratadas permiten observar las sobretensiones sustentadas que podrían ocurrir en el extremo remoto de la línea debido al efecto Ferranti.

Así también, fue verificada la viabilidad de aplicación de reconexión monopolar y tripolar de la línea, monitoreando la corriente de arco secundario y la tensión de restablecimiento

En este sentido, las sobretensiones transitorias máximas son comparadas con valores que puedan comprometer la soportabilidad dieléctrica de la línea y elementos asociados (TSIM = 1175 kV, Tensión Soportable a Impulsos de Maniobra en 500 kV). De igual manera, se verifica la energía disipada en los descargadores, en relación a la capacidad de los mismos (del orden de los $E \leq 3276$ kJ).

4 – ESQUEMA ANALIZADO

El Sistema Eléctrico Paraguayo actualmente se encuentra operando en dos subsistemas eléctricamente separados ante a la inviabilidad técnica de operar las centrales de Itaipú y Yacyretá de manera interconectada por la debilidad del sistema de transmisión, por problemas de estabilidad y diferencia de estatismo del Sistema Argentino y la CH Itaipú. Si bien con esta segunda línea de 500 kV Yacyretá – Ayolas – Villa Hayes se obtiene un sistema de transmisión más robusto, aún se encuentran en ejecución estudios correspondientes a trabajar en forma interconectada. Por ello, el esquema analizado para la energización de la LT 500 kV se muestra a continuación.

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

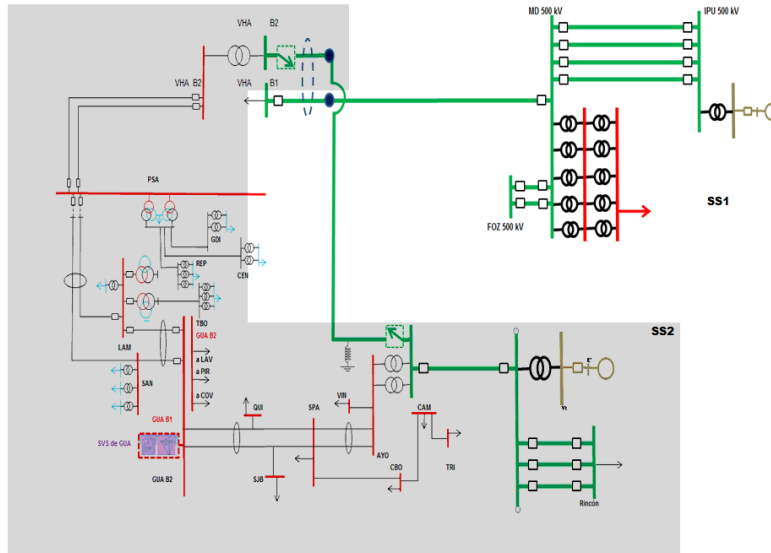


Figura 1: Esquema unifilar evaluado para el Subsistema 2 (SS2).

En la figura precedente se observa el esquema utilizado para la energización, en el mismo se observa al sistema sombreado correspondiente al SS2, con fuente de Yacyretá utilizando 18 máquinas, separado del SS1 en Villa Hayes en barras de 500 kV y utilizando un banco de transformadores monofásicos, cuyos terminales de maniobra para la energización se consideran los puntos de Ayolas y Villa Hayes.

5 – RESULTADOS

5.1 – Energización

Mediante análisis de sensibilidad pudo constatar que las mayores solicitaciones transitorias debidas a la energización de la línea ocurren con la mayor cantidad de máquinas en Yacyretá. Así, fueron consideradas para este análisis un total de 18 máquinas operando en Yacyretá, con energización desde el terminal de Ayolas, con tensiones de pre-maniobra de 0,95 p.u.; 1,000 p.u.; 1,050 p.u. y 1,100 p.u.; además se consideraron casos donde la energización es realizada con falla en el terminal remoto. Todas estas condiciones junto con los resultados son resumidos en la tabla 1.

En dicha tabla son mostrados solo los resultados de las simulaciones correspondientes a magnitudes en el terminal de maniobra y en el terminal remoto. Puede verse que la energía disipada en los descargadores es muy pequeña, en relación a la capacidad de los mismos. Por otro lado, las sobretensiones transitorias máximas no ostentan valores que puedan comprometer la soportabilidad dieléctrica de la línea y elementos asociados (TSIM = 1175 kV, Tensión Soportable a Impulsos de Maniobra en 500 kV).

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

Tabla I: Resultados de simulaciones de energización de línea (Maniobra desde Ayolas).

Energ. por AYO con el SIN SS2							VHA		AYO	
Caso	Sistema	N° de Máquinas en EBY	Tensión en Barras de AYO 500 kV	Descarg. AYO	Descarg. VHA	Falla F-T en terminal receptor	Max V (kV)	Max energía* (kJ)	Max V (kV)	Max energía* (kJ)
E01AYO_P	SS2	18	1,1	Si	Si	no	1,979	164	1,351	0,000
E02AYO_P	SS2	18	1,1	Si	Si	Si	2,064	670	1,554	1,000
E03AYO_P	SS2	18	1,05	Si	Si	no	1,981	112	1,339	0,000
E04AYO_P	SS2	18	1,05	Si	Si	Si	2,051	526	1,499	0,500
E05AYO_P	SS2	18	1	Si	Si	no	1,957	60	1,303	0,000
E06AYO_P	SS2	18	1	Si	Si	Si	2,039	176	1,444	0,000
E07AYO_P	SS2	18	0,95	Si	Si	no	1,920	39	1,246	0,000
E08AYO_P	SS2	18	0,95	Si	Si	Si	2,019	28	1,378	0,000

De igual manera, en la tabla 2 son mostrados los resultados de las simulaciones considerando la SE Villa Hayes como el terminal de maniobra, con tensiones de pre-maniobra de 0,95 p.u; 1,000 p.u. y 1,050 p.u., además se consideraron casos donde la energización es realizada con falla en el terminal remoto.

Tabla II: Resultados de simulaciones de energización de línea (Maniobra desde Villa Hayes).

Energ. por VHA con el SIN SS2							VHA		AYO	
Caso	Sistema	N° de Máquinas en EBY	Tensión en Barras de VHA 500 kV	Descarg. VHA	Descarg. VHA	Falla F-T en terminal receptor	Max V (pu)	Max energía* (kJ)	Max V (pu)	Max energía* (kJ)
E03VHA_P	SS2	18	1,05	Si	Si	no	1,645	4	1,763	42
E04VHA_P	SS2	18	1,05	Si	Si	Si	1,750	15	1,908	257
E05VHA_P	SS2	18	1	Si	Si	no	1,577	3	1,730	10
E07VHA_P	SS2	18	0,95	Si	Si	no	1,512	2	1,681	4

Se observa que la energía disipada en los descargadores es muy pequeña, en relación a la capacidad de los mismos. Así mismo, las sobretensiones transitorias máximas no ostentan valores que puedan comprometer la soportabilidad dieléctrica de la línea y elementos asociados.

5.2 – Análisis de Reconexión Tripolar y Monopolar de la LT 500 kV AYO - VHA

Este grupo de simulaciones fue desarrollado a efectos de verificar la viabilidad de aplicación de reconexión monopolar y tripolar en la Línea de Transmisión de 500 kV analizada, monitoreando la corriente de arco secundario y la tensión de restablecimiento. A su vez, fueron observados las sobretensiones transitorias máximas y el desempeño de los descargadores.

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

La secuencia de eventos simulada para reconexión tripolar y monopolar es dada a continuación:

- Aplicación de falla monofásica en uno de los terminales o en el punto medio de la LT.
- Apertura tripolar o monopolar de ambos terminales 60 ms después de la incidencia de la falla.
- Eliminación de la falla (extinción del arco secundario), 5 ciclos después de la apertura de ambos terminales.
- Tiempo muerto de 500 ms.
- Reconexión estadística de la LT por ambos terminales.

A continuación, las tablas III y IV muestran sobretensiones transitorias máximas y el desempeño de los descargadores para la reconexión tripolar y monopolar.

Tabla III: Resultados de simulaciones de Recierre Tripolar.

Recierre por AYO con el SIN SS2							VHA		AYO		
Caso	Sistema	N° de Máquinas en EBY	Tensión en Barras de AYO 500 kV	Descarg. AYO	Descarg. VHA	Falla F-T en terminal receptor	Caso	Max V (kV)	Max energía* (kJ)	Max V (kV)	Max energía* (kJ)
R01AYO_P	SS2	18	1,05	Si	Si	no	35	2,002	242	1,282	18,0
R02AYO_P	SS2	18	1,05	Si	Si	Si	41	2,037	219	1,189	12
R03AYO_P	SS2	18	1	Si	Si	no	14	1,985	138	1,167	---
R04AYO_P	SS2	18	1	Si	Si	Si	25	2,005	449	1,223	---
R05AYO_P	SS2	18	0,95	Si	Si	no	34	1,934	100	1,235	1,2
R06AYO_P	SS2	18	0,95	Si	Si	Si	24	2,005	243	1,223	1,0

Tabla IV: Resultados de simulaciones de Recierre Monopolar.

Recierre por AYO con el SIN SS2							VHA		AYO		
Caso	Sistema	N° de Máquinas en EBY	Tensión en Barras de AYO 500 kV	Descarg. AYO	Descarg. VHA	Falla F-T en terminal receptor	Caso	Max V (kV)	Max energía* (kJ)	Max V (kV)	Max energía* (kJ)
RM01AYO_P	SS2	18	1,05	Si	Si	no	32	1,862	97	1,652	15,2
RM02AYO_P	SS2	18	1,05	Si	Si	Si	18	1,489	2,5	1,045	---
RM03AYO_P	SS2	18	1	Si	Si	no	15	1,889	179	1,660	18,5
RM04AYO_P	SS2	18	1	Si	Si	Si	50	1,560	3,2	1,096	---

Si bien en estas simulaciones se observa que la corriente de arco secundario disminuye bastante aproximadamente a unos 100 ms luego de la apertura de la línea, figura 2, el tiempo de extinción del arco secundario tiene comportamiento probabilístico conforme se muestra en la figura 3. El mismo es dependiente de las condiciones atmosféricas, distancias geométricas y características de la falla, entre otros factores. Así, de acuerdo a la figura 3 siguiente, puede estimarse que en el caso de reconexión monopolar, considerando valores estadísticos obtenidos de ensayos reales de campo, que para un tiempo de 1 s generalmente la extinción final del arco secundario se vuelve exitosa, con lo cual podríamos garantizar una reconexión monopolar exitosa. En otro aspecto, ante la eventualidad de no darse un recierre exitoso, esto podría originar desequilibrios de larga duración y la eventual actuación de la protección de sobrecorriente de neutro, lo que inviabilizaría la aplicación de la reconexión monopolar.

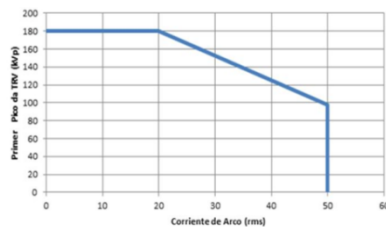


Figura 2: Curva de referencia para análisis de extinción de la corriente de arco secundario, considerando un tiempo muerto de 500 ms.

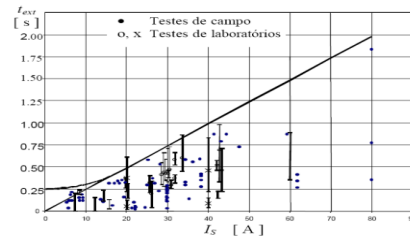


Figura 3: Tiempo de extinción del arco secundario en función al valor eficaz de la corriente de arco.

Por su parte, la figura 4 a continuación muestra la corriente de cortocircuito para una falla monofásica en el terminal de Villa Hayes, considerando reconexión monopolar. Puede observarse una rápida extinción de la corriente de arco secundario, cuyo valor de pico es menor a 40 [A] apenas 200 [ms] luego de despejada la falla. Se observa además (figura 5), que el primer pico de la tensión de restablecimiento esta en torno a los 45 kV, por lo que puede afirmarse que las probabilidades de reconexión monopolar sería exitosa, ante fallas monofásicas.

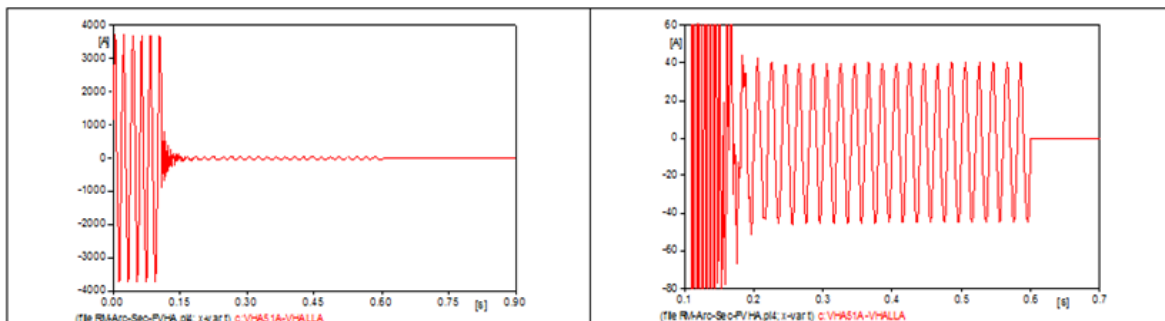


Figura 4: Corriente de arco secundario – Tiempo muerto de 500 ms.

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

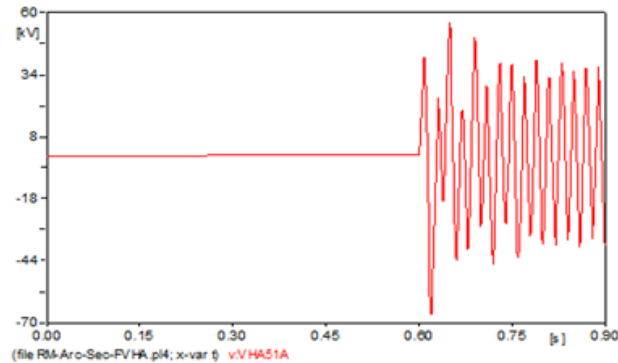


Figura 5: Tensión Transitoria de Restablecimiento.

De igual manera se muestra a continuación la corriente de cortocircuito para una falla monofásica en el terminal de Ayolas, la figura 6 muestra la corriente de cortocircuito para una falla monofásica en este terminal, donde también se observa una rápida extinción de la corriente de arco secundario, cuyo valor de pico es menor a 63 [A] apenas 150 [ms] luego de despejada la falla. Por su parte la tensión de restablecimiento presenta un valor próximo de 72 [kV] en su primer pico (figura 7), con lo cual también puede afirmarse que las probabilidades de reconexión monopolar serían exitosas.

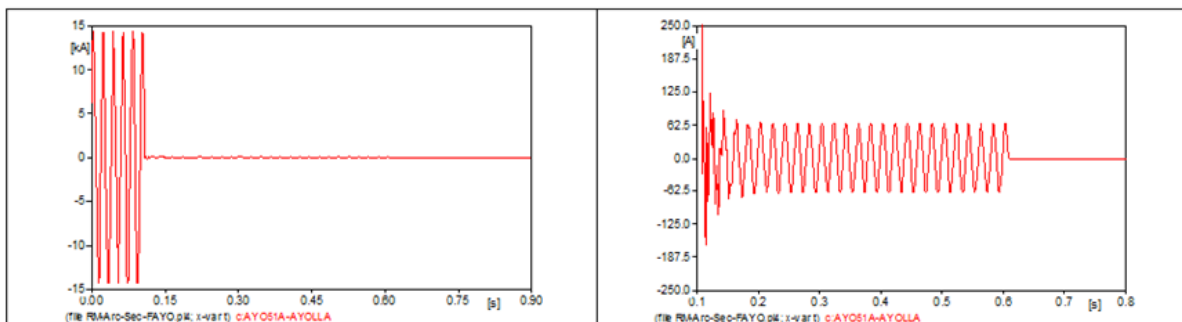


Figura 6: Corriente de arco secundario – Tiempo muerto de 500 ms.

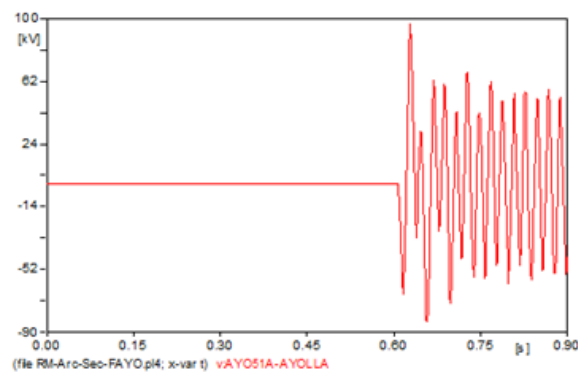


Figura 7: Tensión Transitoria de Restablecimiento.



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

6 – CONCLUSIONES

Bajo las condiciones del presente estudio, ninguna maniobra de energización, recierre y/o recomposición del sistema para la Línea de Transmisión de 500 kV AYO - VHA genera sobretensiones transitorias que comprometan el nivel de aislamiento de los elementos del SIN involucrados y el desempeño de los Descargadores de Sobretensión puede considerarse satisfactorio.

Es posible la energización de la línea desde Ayolas. Se recomienda una tensión de pre-maniobra en la barra 500 kV en torno a 0.95 – 1 pu de modo a minimizar las sobretensiones sustentadas que puedan aparecer en Villa Hayes. No se admite la energización por el terminal de la SE Villa Hayes, considerando el análisis únicamente con el SS2.

La reconexión tripolar y monopolar de la línea tiene altas probabilidades de ser exitosa, ante fallas monofásicas, no presentándose inconvenientes en cuanto a las solicitaciones al aislamiento de las mismas ni al desempeño de los Descargadores.

Análisis realizados de estudios de corriente de arco secundario han demostrado ser exitosas para los terminales de Ayolas y Villa Hayes. Los valores obtenidos de TRV (kVpico) y corriente de arco (Amperes rms) se encuentra dentro de la norma utilizada. Se destaca también que, como la tensión en la línea abierta se anula en menos de 70 ms, tiempos muertos del orden de los 100 ms serían suficientes para asegurar el éxito de la reconexión, sin embargo se recomienda la utilización de un tiempo de 500 ms.

Las sobretensiones temporarias, debido al efecto Ferranti, ostentan valores bastante elevados, presentándose en algunos casos valores superiores a aquellos permitidos por los criterios de planificación y operación del sistema. Se recuerda la importancia de contar con reactores de 500 kV en la Subestación Villa Hayes, de manera a minimizar dichas sobretensiones temporarias.

7 – REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Dommel, Hermann W., “Electromagnetic Transients Program – Reference Manual”.
- (2) Leuven EMTP Center, “Alternative Transients Program – Rule Book”, Bélgica, Julio 1987.
- (3) Plan Maestro de Generación y Transmisión (2016-2025)