

# Insulation coordination study of lightning overvoltages for a 500 kV substation

Michel Artenstein, Alejandro Segade, Cedric Zoppolo and Mariana D'Agosto

UTE, Estudios y Proyectos de Trasmisión  
Montevideo, Uruguay  
martenstein@ute.com.uy

**Abstract**—In this work, an insulation coordination study of lightning overvoltages for a typical 500 kV substation based on simulations of electromagnetic transients is described. The study is done based on two alternative methodologies, in order to compare and extract conclusions applicable to future designs of 500 kV substations of UTE.

**Keywords**—Insulation coordination, Substation design, Electromagnetic transients.

## I. INTRODUCCIÓN

La red uruguaya de Trasmisión se encuentra en un proceso de expansión acelerada a causa de la incorporación en los últimos años de cantidades importantes de generación renovable no convencional. Como parte de esta expansión se construirán en los próximos años 2 nuevas subestaciones de tensión primaria 500 kV (Cardal y Chamberlain), que se sumarán a las 8 subestaciones de 500 kV que ya opera UTE. En la etapa de diseño de la primera de estas nuevas subestaciones, se decidió revisar los métodos de coordinación de aislación a las descargas atmosféricas que se describen en la literatura, y en particular los que se han usado en las subestaciones de 500 kV existentes que fueron diseñadas por UTE, con la intención de seleccionar y normalizar los métodos a utilizar en los futuros diseños.

En este trabajo se describen los estudios de coordinación de aislación a las descargas atmosféricas realizados en la etapa de diseño preliminar de la subestación Cardal 500 kV; así como las conclusiones principales que se obtuvieron de estos estudios a los efectos de normalizar los métodos de estudio y diseño a utilizar en futuros proyectos similares. Cabe destacar que las simulaciones de transitorios electromagnéticos necesarias para realizar el estudio se hicieron con el programa ATP [1].

Este trabajo se ha organizado en la forma siguiente:

- En la Sección II se describen las características principales de la subestación 500 kV y de las líneas 500 kV involucradas en el estudio, y los modelos de subestación y líneas utilizados.

- En la Sección III se describe la revisión realizada de los métodos de coordinación de aislación a las descargas

atmosféricas que se describen en la literatura, y en particular los utilizados en proyectos anteriores realizados por UTE.

- En la Sección IV se describen las características generales de los estudios realizados.

- En las Secciones V, VI y VII se describen los diversos estudios realizados: estudio simplificado con fuente de tensión a la entrada de la subestación, estudio de descargas inversas y estudio de descargas directas.

- Se indican finalmente las principales conclusiones obtenidas en relación a las metodologías y criterios a adoptar en futuros proyectos similares.

## II. DATOS DE ENTRADA Y MODELOS

### A. Subestación Cardal 500 kV

En la fig.1 se incluye el esquema unifilar de la subestación Cardal 500 kV que se tomó como dato de entrada al estudio. Cabe destacar que este esquema se modificó posteriormente, pero igualmente se entendió que las conclusiones obtenidas en el estudio eran lo suficientemente generales como para poder aplicarse a otros esquemas de subestación de los habitualmente usados en UTE. Se dispuso también de layouts preliminares de la subestación a efectos de poder modelarla con la precisión requerida para un análisis de descargas atmosféricas. Se asumió la existencia de descargadores 500 kV a las entradas de las líneas, adyacentes a los reactores de línea y en cada barra de la subestación. Como se indica más adelante, uno de los principales objetivos del estudio fue confirmar si los descargadores de barra son o no necesarios.

La subestación se modeló en ATP siguiendo los lineamientos básicos aplicables a un estudio de descargas atmosféricas, a saber:

- Modelado explícito de los descargadores (modelo tipo 92 del ATP).

- Los restantes equipos se modelaron por medio de capacitores concentrados, usando valores típicos obtenidos de la literatura.

- Se modelaron las conexiones entre equipos por medio de líneas de parámetros distribuidos.

- Se modeló una sola fase de la subestación .

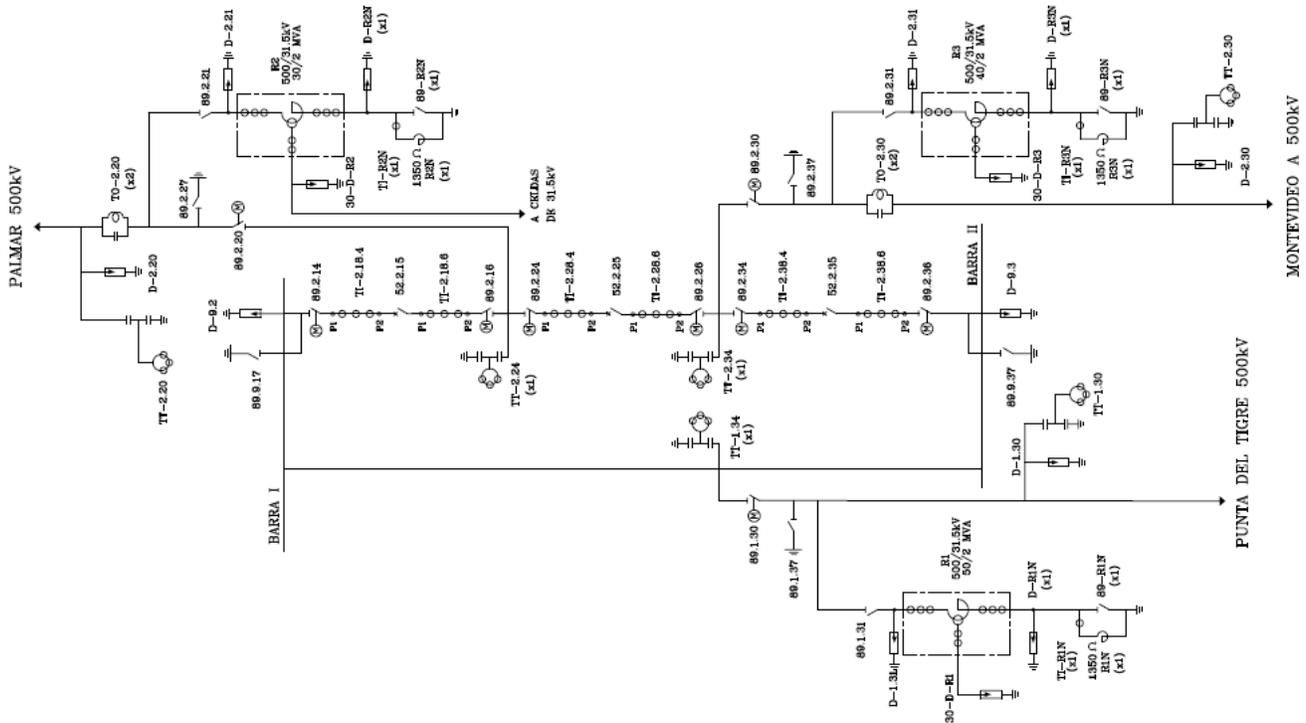


Fig.1 Esquema unifilar subestación Cardal

A los efectos de la evaluación del aguante de los equipos y aisladores soporte de la subestación a las descargas atmosféricas, se consideró el Nivel Básico de Aislación (BIL) que especifica UTE para sus equipos de 500 kV (1550 kVp), afectándolo con los factores de seguridad recomendados en [2]: 1,15 para aislaciones internas y 1,05 para aislaciones externas.

### B. Líneas aéreas 500 kV

La subestación Cardal se conecta a las Subestaciones de 500 kV Palmar, Montevideo A y Punta del Tigre a través de líneas aéreas compuestas por torres de acero reticulado autoportantes (ver Fig.2) o arriostradas. La disposición de los conductores es horizontal, con 3 haces de 4 conductores ACSR tipo “Dove” por fase, y 2 cables de guardia. Las cadenas de aisladores son de 28 platos “standard” (255 x 146 mm)



Fig. 2. Esquema típico de torre 500 kV

La línea en la que se supuso la descarga atmosférica (línea Punta del Tigre-Cardal) se modeló en detalle en sus primeros vanos al frente de la Subestación, en tanto que el resto de la línea se modeló con un tramo de línea suficientemente largo como para que las reflexiones desde el extremo remoto no afecten los resultados.

Las principales características del modelado de la línea aérea que se implementó en ATP son las siguientes:

- Modelo Bergeron de parámetros distribuidos para la línea aérea.
- Las torres se modelaron como un conjunto de líneas monofásicas de parámetros distribuidos, con impedancia de onda calculada según [3] a partir de la geometría de una torre autoportante típica y velocidad de onda 10 % inferior a la de la luz.
- Se probaron a lo largo del estudio 2 modelos alternativos de aislador: con tensión de descarga fija de 2400 kVp, y con descarga según una curva tensión-tiempo [4].
- Se probaron a lo largo del estudio 2 modelos alternativos de resistencia de puesta a tierra: resistencia de 10  $\Omega$  fija, y resistencia variable con la corriente según [2].

A los efectos de calcular las tasas de falla de la línea a las descargas atmosféricas se asumió en todos los casos un nivel cerámico de 35 días, que es un valor típico máximo para la mayor parte del territorio uruguayo.

### III. MÉTODOS DE COORDINACIÓN DE AISLACIÓN DE SUBESTACIONES A LAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

En la literatura se pueden encontrar esencialmente 2 métodos alternativos para realizar los estudios de coordinación de aislación a las descargas atmosféricas de subestaciones en base a estudios de transitorios electromagnéticos.

### A. Con fuente de tensión equivalente [5] (ver Fig.3)

La descarga atmosférica se simula por medio de una fuente de tensión atrás de elementos de parámetros concentrados (resistencias) y/o distribuidos (impedancia de onda) aplicada a la entrada de la subestación. En este método sólo es necesario modelar explícitamente la subestación. La línea aérea no se modela en las simulaciones de transitorios electromagnéticos, y los principales parámetros que definen su comportamiento frente a las descargas atmosféricas (características de las cadenas de aisladores, resistencias de puesta a tierra, impedancia y velocidad de onda) se incluyen en forma simplificada en la fuente de tensión equivalente y los elementos de parámetros concentrados y/o distribuidos que la conectan a la subestación. La fuente de tensión incluye en forma simplificada, asimismo, los parámetros que definen a la descarga atmosférica (valor de pico de corriente y forma de onda). Este método se aplica habitualmente sólo al estudio de descargas inversas en la línea (rayo incidente en la torre), pero no al estudio de descargas directas (rayo incidente en la fase).

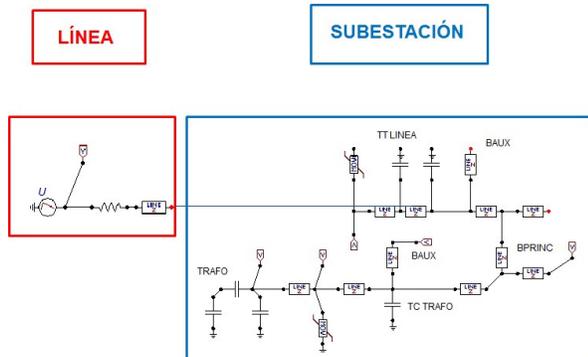


Fig. 3. Método de estudio con fuente de tensión equivalente

### B. Con modelo detallado de la línea (ver Fig.4)

La línea se modela explícitamente (al menos en sus primeros vanos al frente de la subestación) en el programa de transitorios electromagnéticos, y se la conecta al modelo de subestación. La descarga atmosférica se modela explícitamente por medio de una fuente de corriente aplicada a la torre o a una de las fases.

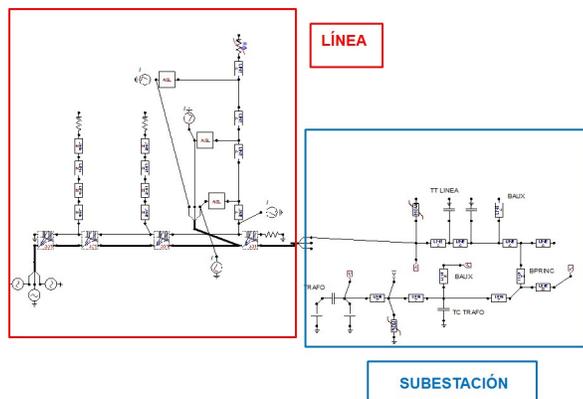


Fig. 4. Método de estudio con modelo detallado de línea

Si bien es evidente que el método B modela más en detalle el fenómeno, sus resultados suelen ser conservadores. Esto se debe a que habitualmente no se incluye en el modelo el efecto

corona, que siempre aparece en la línea ante sobretensiones de las magnitudes que se generan durante las descargas atmosféricas. El efecto corona tiende a disminuir la pendiente de la onda de tensión incidente en la subestación, por lo que tiende a aumentar el "radio de acción" de los descargadores instalados en la subestación, mejorando por lo tanto el desempeño a las descargas atmosféricas. El efecto corona sí puede tenerse en cuenta en forma simplificada en el método A, dado que el frente de onda de la fuente de tensión se puede ajustar a valores que tengan en cuenta este efecto, en base a las fórmulas propuestas en [2].

La revisión de los métodos de coordinación de aislación a las descargas atmosféricas utilizados anteriormente en UTE para el diseño de sus subestaciones 500 kV mostró que en algunos casos se usaron métodos del tipo A (Punta del Tigre, Las Brujas), en tanto que en otros casos se utilizaron métodos del tipo B (Montevideo I, San Carlos, Melo). La principal particularidad que se observó al revisar estos diseños anteriores fue que en algunos casos se entendió necesario instalar descargadores en las barras de la subestación, y en otros no.

## IV. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS ESTUDIOS

Se realizaron estudios de descargas atmosféricas para la subestación Cardal haciendo uso de los 2 métodos descritos más arriba (Sección III). La intención principal fue comparar los resultados de ambos métodos y, en particular, observar si se obtenían resultados diferentes en relación a la necesidad de instalar descargadores en las barras. En todos los casos se asumió que existían descargadores a la entrada de cada línea y en las cercanías de cada reactor de línea.

Se asumió que la descarga atmosférica ocurría en la línea Punta del Tigre-Cardal, y se evaluaron los resultados tanto con las otras 2 líneas en servicio como sacando de servicio una de ellas. Cabe destacar que es de esperar que los peores resultados se obtengan con una de las líneas fuera de servicio, dado que en estos casos los descargadores asociados a esta línea (los de entrada de línea y los de protección de reactores) salen también de servicio.

La evaluación de los diversos casos se hizo comparando los valores de tensión medidos en diversos puntos de la subestación (equipos, aisladores soporte, extremos de barras) con los BIL indicados más arriba (Sección II).

## V. ESTUDIO CON FUENTE DE TENSIÓN EQUIVALENTE

Se utilizó en este caso el modelo de fuente de tensión descrito en [5]. En este modelo la descarga atmosférica se aplica por medio de una fuente de tensión conectada a la subestación a través de una resistencia (resistencia de puesta a tierra de las torres  $R_t$ ) y de un elemento de parámetros distribuidos (impedancia de onda de la línea  $Z_c$ ) (ver Fig.5)

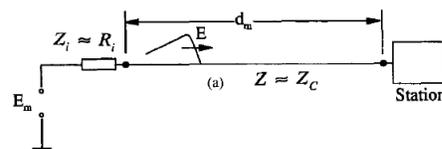


Fig. 5. Fuente de tensión equivalente (extraída de [5])

El modelo ATP de la fuente de tensión utilizado fue del tipo rampa de doble pendiente (fuente tipo 13), con valores de pico y forma de onda calculados de acuerdo con los siguientes criterios.

#### A. Valor de tensión de pico

El valor de pico de la fuente de tensión  $E_m$  se calculó en forma conservadora asumiendo que la tensión aplicada en la subestación  $E = E_m \cdot Z_C / (R_i + Z_C)$  es el valor más alto que pueden soportar las cadenas de aisladores de la línea sin descargar [6]:

$$E = CFO (1 + 3\sigma)$$

CFO = Valor soportado por la cadena de aisladores con probabilidad 50%.

$\sigma$  = Desviación standard de la probabilidad de aguante de la cadena = 0,03 (valor standard según [2]).

#### B. Pendiente de la onda de tensión incidente

La distancia  $L_c$  de la subestación a la cual se asume la descarga (distancia crítica) se calculó de acuerdo a la fórmula propuesta en [2]:

$$L_c = Ra / NBF \times 100.000 + Van1 \text{ (m)}$$

NBF = Tasa de falla de la línea (fallas/(100 km-año))

Ra = Riesgo de falla en la subestación (1/año)

Van1 = Primer vano al frente de la subestación (m)

Se asumieron en primera instancia valores típicos de NBF=0,3 y Ra=1/400. [2], obteniéndose  $L_c \approx 1000$  m. Este valor de distancia crítica permite definir el aumento de la pendiente de la onda que se desplaza hacia la subestación a causa del efecto corona [2]:

$$S = 1 / (Kco \times Lc) \text{ (kV}/\mu\text{s)}$$

$L_c$  = Distancia crítica (m)

Kco = Coeficiente de efecto corona ( $\mu\text{s} / \text{kV}\cdot\text{m}$ )

El valor de pendiente así definido permite calcular el tiempo de frente de la onda, en tanto que el tiempo de cola se calculó en base a la fórmula propuesta en [2].

La fuente de tensión así definida tiene un valor de pico de 2690 kV y una forma de onda 1,61/26,6  $\mu\text{s}$ .

#### C. Simulaciones realizadas y resultados

En base al modelo descrito se realizó un conjunto amplio de simulaciones, buscando principalmente analizar la sensibilidad de los resultados a los parámetros de mayor influencia, en particular:

- Tiempo de frente de la onda, reduciéndolo hasta valores representativos de una distancia de descarga de 600 m.
- Tensión a frecuencia industrial: se superpuso a la tensión de rayo una tensión del 70 % de la tensión nominal, en sus 2 posibles polaridades [5].
- Presencia o no de los descargadores de barra
- Salida de servicio de la línea a Palmar o a Montevideo A.

Como resultado de estas simulaciones, se observó la aparición de tensiones no admisibles en la subestación en los casos en que se suprimen los descargadores de barra y la línea a Palmar está fuera de servicio.

En la Fig.6 se incluye una gráfica de tensión representativa de uno de los casos críticos.

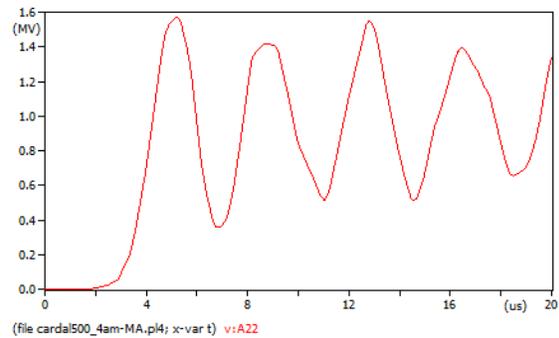


Fig. 6. Tensión en aislador soporte: descarga a 1000 m, sin descargadores de barra, sin línea a Palmar, con tensión A.C.

Se observa que la tensión alcanza aproximadamente 1,57 MV; lo cual está por encima de los 1,48 MV aceptables para las aislaciones externas de los equipos (ver Sección II). Una situación similar se encontró en varios puntos cercanos a las barras de la subestación, y las tensiones son aún mayores si se asumen descargas más cercanas a la subestación.

Si se mantienen los descargadores de barra, en cambio, las tensiones obtenidas son admisibles.

De acuerdo a este método de estudio, por lo tanto, sería necesario mantener los descargadores de barra para obtener una coordinación de aislación aceptable.

## VI. ESTUDIO DE DESCARGAS INVERSAS

En este caso se modeló en detalle la línea Punta del Tigre-Cardal, de acuerdo a los criterios ya descritos en la Sección II. En la Fig.7 se incluye un esquema de uno de los modelos ATP implementados para la torre en que ocurre la descarga.

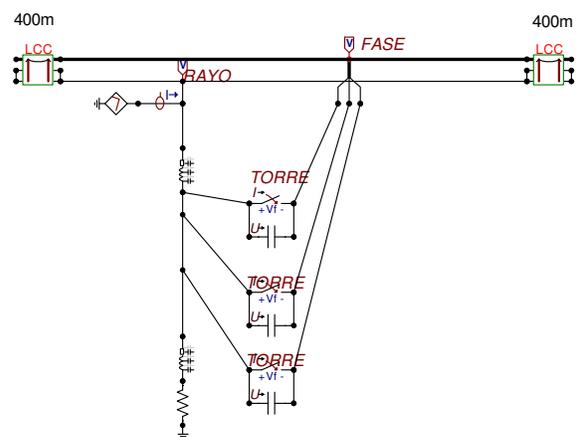


Fig. 7. Modelo ATP de torre para descargas inversas

#### A. Fuente de corriente

La descarga atmosférica se modeló a través de una fuente de corriente tipo rampa de doble pendiente (fuente tipo 13 del ATP), usando una forma de onda 2/50  $\mu\text{s}$ . Cabe destacar que este valor adoptado para el frente de onda (el parámetro más relevante de la forma de onda para este tipo de estudio) es

conservador para el rango de valores de corriente utilizados en las simulaciones [7].

### B. Corriente crítica

La fuente de corriente se conectó a la torre, y se fue aumentando su valor de pico hasta obtener el valor de corriente mínima que hace contornear alguna cadena de aisladores (corriente crítica). Se tuvo en cuenta la influencia de la tensión a frecuencia industrial, superponiendo esta tensión a la tensión de rayo en intervalos de  $20^\circ$  del ciclo de frecuencia industrial. A medida que se va recorriendo el ciclo de frecuencia industrial va cambiando la fase en que se produce la descarga y el valor de la corriente crítica por lo que, en rigor, se obtuvo en cada caso un intervalo de corrientes críticas. De acuerdo a los registros y literatura existentes [7], los valores de corriente de rayo no deberían ser superiores a 250 kA; por lo que si la corriente crítica es superior a este valor se asume que nunca ocurrirá una descarga inversa.

### C. Simulaciones y resultados

Como ya se indicó en la Sección II, se realizaron simulaciones con 2 modelos de resistencia de puesta a tierra (fija y variable con la corriente) y con 2 modelos de aisladores (tensión de descarga fija y variable con el tiempo), con el objeto de investigar la influencia en los resultados de adoptar un modelo simplificado (resistencia de puesta a tierra y tensión de descarga fijas) o más cercano a la realidad

El modelo desarrollado se utilizó también para estimar la tasa de falla de la línea a las descargas inversas de acuerdo al método propuesto en [3]. Como ya se indicó en la Sección III, esta tasa de falla permite estimar en forma aproximada la distancia desde la subestación a la cual se debe simular la descarga.

Los resultados obtenidos se resumen en la Tabla I. Se observa que si se utiliza el modelo más preciso  $(R(I), V(t))$  se concluye que no deberían ocurrir descargas indirectas en la línea, lo que hace innecesario considerar este caso a efectos de coordinar la aislación de la subestación. En vista de este resultado, se consideró innecesario realizar simulaciones con modelos de aisladores aún más exactos, como los descritos en [7]

Modelo	Intervalo de corrientes críticas (kA)	Tasa de falla por 100 km-año
R fija, V fija	140 a 150	0,99
$R(I)$ , V fija	165 a 185	0,63
$R(I)$ , $V(t)$	>250	0

Tabla I. Resultados descargas inversas

## VII. ESTUDIO DE DESCARGAS DIRECTAS

Al igual que en el caso de descargas inversas, también en este caso se modeló en detalle la línea Punta del Tigre-Cardal, de acuerdo a los criterios ya descritos en la Sección II. En la Fig.8 se incluye un esquema del modelo ATP implementado para la torre en que ocurre la descarga.

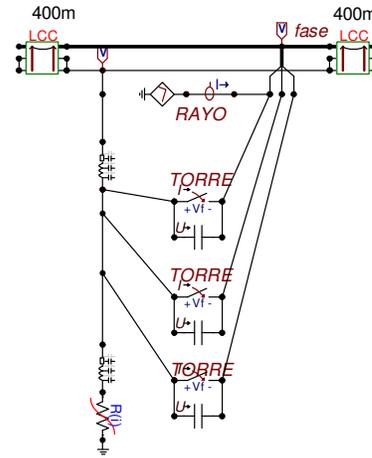


Fig. 8. Modelo ATP de torre para descargas directas

### A. Fuente de corriente

La descarga atmosférica se modeló a través de una fuente de corriente tipo rampa de doble pendiente (fuente tipo 13 del ATP), usando inicialmente una forma de onda de  $2/50 \mu s$ . Dado que el rango de corrientes típico para un estudio de descargas directas es inferior a los 20 kA, es de esperar que ocurran valores de frente de onda aún menores [7], por lo que se realizaron simulaciones también con frentes de onda de 1 y  $0,5 \mu s$ .

### B. Valor de pico de la fuente de corriente

La fuente de corriente se conectó a una de las fases, y se fue aumentando su valor de pico hasta obtener el valor de corriente máxima que no hace contornear la cadena de aisladores. En primera instancia se modeló la cadena de aisladores con tensión fija de descarga (llave controlada por tensión). Se tuvo en cuenta la influencia de la tensión a frecuencia industrial, superponiendo esta tensión a la tensión de rayo en intervalos de  $20^\circ$  del ciclo de frecuencia industrial. A partir de esta simulación se obtuvo el valor de corriente  $I_{\min} = 13,7 \text{ kA}$  a utilizar en un primer conjunto de simulaciones. Este valor es ligeramente inferior al valor  $I_{\min} = 14,3 \text{ kA}$  que se obtiene aplicando la fórmula teórica incluida en [4].

Dado que estamos modelando una falla del blindaje de la línea (el rayo “elude” el efecto protector de los cables de guardia), de acuerdo al Modelo Electrogeométrico [5], existe un valor máximo de corriente por encima del cual no puede producirse la descarga directa (rayos con valores de corriente mayores que ese valor límite caen a tierra o son interceptados por los cables de guardia). Este valor máximo se calculó en base al método de cálculo propuesto en [5], obteniéndose el valor de corriente  $I_{\max} = 15,1 \text{ kA}$ , a utilizar en un segundo conjunto de simulaciones.

### C. Distancia de descarga

La distancia desde la subestación a la cual se produce la descarga directa se calculó en base al método ya descrito en la Sección V. Para realizar el cálculo fue necesario estimar previamente la tasa de falla de blindaje de la línea (SFR) lo

cual se hizo en base al método propuesto en [5]. Asumiendo que la corriente de rayo mínima que puede ocurrir es de 3 kA [7], se obtuvo SFR = 0,16 fallas/100 km-año y una distancia de descarga de  $L_c = 1800$  m, lo cual corresponde aproximadamente a una descarga en la quinta torre desde la subestación.

#### D. Simulaciones y resultados

Dado que  $I_{\min} < I_{\max}$ , se deduce que la línea estará sujeta a dos tipos de descarga directa:

- Las que no producen contorno en las cadenas de aisladores (corrientes de rayo entre 3 y 13,7 kA)
- Las que sí producen contorno de la cadena de aisladores (corrientes de rayo entre 13,8 y 15,1 kA).

Las simulaciones del conjunto (a) se realizaron con un valor de corriente de rayo de 13,7 kA, y las de tipo (b) con un valor de corriente de rayo de 15,1 kA. Al igual que en los casos simulados con el método de la fuente de tensión equivalente, se simularon casos con y sin descargadores de barra, y con alguna de las líneas fuera de servicio.

Como resultado de estas simulaciones, se observó la aparición de tensiones en la subestación superiores a las admisibles en los casos en que se suprimen los descargadores de barra y la línea a Palmar está fuera de servicio. En la Fig.9 se incluye una gráfica de tensión representativa de uno de los casos críticos.

Se observa que la tensión alcanza aproximadamente 1,62 MV; lo cual está por encima de los 1,48 MV aceptables para las aislaciones externas de los equipos (ver Sección II). Una situación similar se encontró en varios puntos cercanos a las barras de la subestación, y las tensiones serían aún mayores si se utiliza un modelo más preciso de las cadenas de aisladores. Si se mantienen los descargadores de barra, en cambio, las tensiones obtenidas son admisibles.

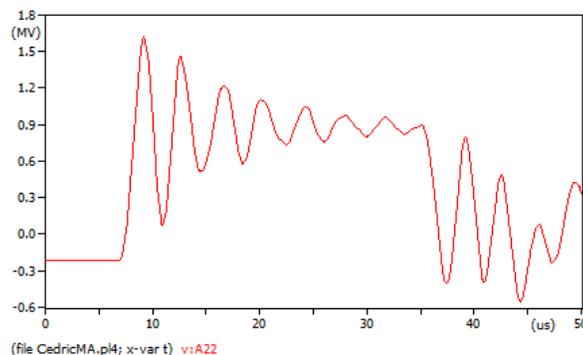


Fig. 9. Tensión en aislador soporte: descarga en la torre 5, sin descargadores de barra, sin línea a Palmar, con tensión A.C, frentes de onda 0,5  $\mu$ s.

Las simulaciones realizadas para el segundo conjunto de descargas directas (con contorno de la cadena de aisladores) mostraron valores de tensión en la subestación menos críticos

que los obtenidos para las descargas sin contorno de la cadena de aisladores.

De acuerdo a este método de estudio, por lo tanto, sería necesario mantener los descargadores de barra para obtener una coordinación de aislación aceptable.

#### VIII. CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS

En este trabajo se ha descrito un estudio de coordinación de aislación a las descargas atmosféricas de una subestación típica de 500 kV de UTE. Las principales conclusiones extraídas de este estudio que UTE aplicará en futuros diseños de subestaciones 500 kV son las siguientes:

- El diseño preliminar de las futuras subestaciones 500 kV incluirá descargadores en las barras de la subestación.

- En caso que se opte por verificar el diseño en base a simulaciones de transitorios electromagnéticos, se realizará a través del método detallado. El método simplificado en base a fuente de tensión equivalente proporciona resultados demasiado conservadores para las descargas inversas, y al no considerar las descargas directas se corre el riesgo de ignorar casos críticos.

- Es necesario modelar adecuadamente la resistencia de puesta a tierra de la torre en que se produce la descarga inversa y las cadenas de aisladores si se pretende que el método detallado proporcione resultados confiables.

El modelado del efecto corona en la línea permitiría mejorar aún más la precisión del método detallado, por lo que se pretende que este tema sea objeto de futuros desarrollos.

#### REFERENCIAS

- [1] Alternative Transients Program, "Rule Book", Canadian/American EMTP User Group (1987-92).
- [2] "Insulation Coordination, Part2, Application Guide", IEC Standard 60071-2,1996.
- [3] "Transmission Line Reference Book 345 kV and above", 2nd edition, EPRI, 1982.
- [4] "IEEE Guide for Improving the lightning performance of Transmission Lines", IEEE Standard 1243,1997
- [5] Andrew Hileman," Insulation Coordination for Power Systems", Taylor and Francis Group, 1999
- [6] "Estudio de coordinación de aislamiento de las Subestaciones de Las Brujas y Punta del Tigre", Marte Engenharia, Technical Report UTE-P36951-GE-E-007, Rev.4, 2009.
- [7] "Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines", CIGRE Publication N°63, 1991, CIGRE Working Group 33-01.