

MODELOS PARA LA SIMULACIÓN DE LA DINÁMICA ESTRUCTURAL DE LÍNEAS DE ALTA TENSIÓN

Julián J. Rimoli, Alejandro J. Patanella, Pablo L. Ringegni, Marcos D. Actis

GEMA, Departamento de Aeronáutica, Facultad de Ingeniería
Universidad Nacional de La Plata, La Plata, Argentina
(gema@ing.unlp.edu.ar)

Palabras Claves: Dinámica estructural, modelos estructurales, líneas de alta tensión, modelos no lineales

Resumen. *El diseño de estructuras de líneas de alta tensión se basa casi exclusivamente en análisis estáticos, incluso para la determinación de las cargas de rotura y de las ubicaciones de los elementos estructurales que cumplen la función de fusibles estructurales. Debido a la importancia de dichas líneas de alta tensión, las cuales permiten el conexionado de las centrales proveedoras de energía con los centros de distribución, se hace necesario contar con medios para la predicción de los escenarios provocados por la rotura de los diversos miembros estructurales componentes de la línea a fin de poder actuar correcta y rápidamente para evitar la salida de servicio del conexionado eléctrico, evitando de este modo los problemas que la falta de energía genera en la sociedad tecnológica de hoy en día.*

En el presente trabajo se plantea un modelo para la simulación de este tipo de situaciones, y se presenta al mismo tiempo un software –de interface gráfica 3D OpenGL– desarrollado a partir de dicho modelo.

Finalmente, se ilustra un ejemplo de una falla estructural real producida en una línea del interconexionado eléctrico en Argentina. Se comparan los resultados obtenidos a partir del modelo con la evidencia encontrada en el lugar del siniestro. De dicha comparación se puede inferir que el modelo presentado y el software desarrollado permiten predecir los distintos escenarios de colapso de este tipo de estructuras.

1 INTRODUCCIÓN

La falla no prevista de uno o más de los miembros estructurales componentes de las líneas de transporte y conexión de alta tensión puede producir accidentes catastróficos. La complejidad del fenómeno hace prácticamente imposible predecir el comportamiento global del conjunto estructural con las técnicas convencionales de análisis. Debido a la importancia, por su implicancia en la vida diaria, la industria y el comercio, y a la peligrosidad de estas, por la alta energía que transportan, hace más que imperioso desarrollar metodologías para predecir los posibles escenarios ante la ocurrencia de fallas prematuras. Surge así la necesidad de desarrollar modelos dinámicos adecuados para el diseño de futuras estructuras de líneas de transmisión de alta tensión y capaces de determinar el comportamiento de las actuales, con el objetivo de minimizar los daños producidos a partir de una falla no prevista. En el presente trabajo se plantea un modelo para la simulación de la dinámica de estructuras de tipos reticulares, aisladores de soporte y cables de transporte de alta tensión, contemplando las no-linealidades geométricas y de material que aparecen en el fenómeno y los efectos de pandeo en las barras reticulares, como así también la dinámica en la rotura de los elementos estructurales y de soporte. Se presenta además un software diseñado especialmente para la resolución de este tipo de problemas.

La motivación de esta investigación fue el estudio del siniestro producido en una estación transformadora del sistema de interconexión de la República Argentina en Noviembre del 2002^{1, 2}. Este siniestro, producido a partir de la rotura de uno de los elementos estructurales de conexión entre las líneas de generación y las líneas de transformación, causó una reacción en cadena culminando con el colapso de la estructura entera. Durante este fenómeno las protecciones eléctricas del sistema se vieron dañadas ya que distintos elementos del conexión cayeron aún energizados con 500 kV. Si bien sólo se produjeron daños materiales, este fenómeno dejó sin energía eléctrica a una gran porción de la provincia de Buenos Aires generando un importante malestar y perjuicio económico a sus habitantes. Para prevenir este tipo de accidentes, se hace necesario el desarrollo de una técnica predictiva que permita mostrar los posibles efectos causados por la rotura prematura de diversos componentes estructurales en este tipo de líneas.

En los siguientes párrafos se describirá el modelo numérico desarrollado, las hipótesis asumidas y el software desarrollado para la implementación del modelo. Se especificarán los métodos numéricos utilizados para la simulación y se mostrarán los resultados obtenidos a partir de la simulación del siniestro mencionado con anterioridad^{1, 2}.

2 MODELIZACIÓN

2.1 Mallado

Para la representación de la estructura se utilizan elementos de tipo barra de dos nodos. Estos elementos son utilizados para representar tanto barras propiamente dichas como cables³.

2.2 Discretización de las Masas

Las masas nodales provienen de dos orígenes distintos:

- Masas de elementos externos vinculados a la estructura: por ejemplo la masa de morsetos, aisladores vinculados a la estructura, etc. Estas masas son concentradas directamente en los nodos a los que se encuentran vinculadas
- Masas propias de la estructura: son las correspondientes a la estructura propiamente dicha. Se utiliza un modelo del tipo “Lumped mass matrix⁴”, el cual se obtiene a partir de considerar que la masa de una barra se distribuye la mitad en un nodo al cual concurre la misma y la otra mitad en el otro.

2.3 Material

Para simular el comportamiento de las barras ante la acción de cargas debemos primeramente adoptar un modelo que represente la relación entre la tensión aplicada y la deformación específica de las barras. A tales efectos se adoptó un modelo elasto-plástico ideal⁵.

Según este modelo podemos dividir al comportamiento de las barras a tracción en dos rangos:

- Elástico ideal: se caracteriza por la linealidad existente entre la tensión aplicada y la deformación específica de la barra. La pendiente de dicha recta está dada por el módulo de elasticidad E del material.
- Plástico ideal: una vez alcanzada una tensión máxima S_{tmax} característica para cada material, la barra no toma más carga y comienza a fluir, continuando su elongación hasta alcanzar una deformación específica máxima e_{max} , también característica para cada material. Una vez alcanzada esta deformación se produce la rotura (falla por tracción).

Debido a que el programa busca simular solamente el comportamiento de reticulados espaciales y cables, no tendremos en cuenta el rango plástico para los estados de compresión. En vez de esto último se utilizó un modelo que contempla un comportamiento lineal caracterizado por la constante de elasticidad del material E hasta alcanzar una tensión máxima de compresión S_{cmax} . Una vez alcanzada esta tensión se produce el pandeo de la barra en cuestión. La determinación de S_{cmax} es efectuada acorde a las teorías de Euler-Johnson⁶ para las barras. Los cables son representados con el material anteriormente descrito, asumiendo que $S_{cmax}=0$.

2.4 Modelización de la falla por rotura de elementos estructurales o vínculos

La falla por rotura de los elementos estructurales o vínculos de apoyo se simulo de la siguiente manera;

- Falla de elementos estructurales: se implemento un criterio de actualización dinámica de las conectividades entre los nodos. Todo elemento que supere su deformación admisible a la tracción o que supere la tensión de pandeo a compresión es eliminado dinámicamente, con excepción de los cables que no fallan por compresión.

- Falla de vínculos: para la modelización de la falla de los vínculos se construye un elipsoide a partir de los datos de la carga de rotura de los mismos según tres direcciones ortogonales. Si el vector de fuerzas totales aplicado a dicho vínculo se encuentra fuera de dicho elipsoide, se procede a eliminar el vínculo en cuestión.

3 MÉTODO NUMÉRICO

El modelo dinámico equivalente mencionado en párrafos anteriores puede ser descrito matemáticamente por un sistema de ecuaciones diferenciales de segundo orden, el cual puede ser expresado en forma matricial como:

$$[M] \cdot \{\dot{X}\} + [K] \cdot \{X\} = \{F\} \quad (1)$$

Donde $[M]$ es la matriz másica, $[K]$ es la matriz rigidez del sistema, $\{X\}$ el vector de coordenadas nodales y $\{F\}$ el vector de cargas nodales externas. La matriz rigidez del sistema cambia dinámicamente para contemplar tanto las no linealidades geométricas y de material como la rotura de elementos estructurales o vínculos.

Este sistema de ecuaciones diferenciales es resultado por medio de integración explícita mediante el método de Euler⁷. Por cuestiones de inestabilidad derivadas del método de resolución, fue necesario modificar el sistema de ecuaciones diferenciales agregándoles efectos de viscosidad. De este modo, las ecuaciones resultantes son,

$$[M] \cdot \{\dot{X}\} + [C] \cdot \{\ddot{X}\} + [K] \cdot \{X\} = \{F\} \quad (2)$$

En donde $[C]$ es la matriz de viscosidad obtenida como resultado de agregar un amortiguador viscoso en paralelo con cada elemento.

Tanto los modelos propuestos como el método numérico de resolución planteado fueron implementados en un programa diseñado específicamente para resolver este tipo de situaciones. Dicho programa automatiza todas las cuestiones aquí planteadas quedando a manos del usuario únicamente la descripción geométrica del problema y el mallado. Con una interfaz gráfica tridimensional desarrollada utilizando rutinas OpenGL se obtiene un entorno intuitivo en el cual se pueden visualizar adecuadamente los resultados obtenidos.

4 VALIDACIÓN

Este modelo fue validado a partir de preparar distintos tipos de configuraciones estructurales y se procedió a resolver su comportamiento estático. A tal fin se asignaron valores de amortiguamiento viscosos elevados, de modo tal que la simulación alcance el régimen estacionario con rapidez. Finalmente se compararon los valores obtenidos en régimen estacionario con resultados obtenidos a partir de softwares de elementos finitos comerciales. Los resultados obtenidos mantuvieron diferencias menores al 1%.

5 PLANTEO DEL PROBLEMA Y RESULTADOS OBTENIDOS

Luego de estudiar la configuración estructural de las líneas de conexión de alta tensión hacia los transformadores⁸ se observó que existen distintos mecanismos que pueden inducir fallas en servicio por roturas no previstas por un cálculo estático como las provenientes de fatiga (por vibraciones eólicas), rotura prematura de algún componente, daños en operaciones de mantenimiento, etc. La motivación de esta investigación fue el estudio de un siniestro que produjo un corte de energía eléctrica generalizado debido a la falla estructural del sistema de suspensión de las líneas de conexión al transformador de potencia. Muchos de estos mecanismos son difíciles de predecir o de estimar a ciencia cierta. Para conocer los distintos escenarios de falla se diseñó, a partir de las hipótesis planteadas en párrafos anteriores el modelo numérico.

Este modelo se volcó a un software para conocer los distintos comportamientos que el conjunto estructural tendría en caso de eventuales fallas de cada uno de sus miembros componentes. Este software fue alimentado por los datos experimentales y las simulaciones realizadas a través de programas de elementos finitos comerciales. Se ensayaron distintos componentes de morsetería de la línea, como así también aisladores soportes, estos datos fueron utilizados de referencia para alimentar el modelo numérico.

Se consideraron distintas condiciones iniciales, es decir, la existencia de la falla catastrófica de algún elemento estructural. Cada una de estas condiciones iniciales o posibles fallas en servicio fueron dando distintas secuencias de rotura del conjunto estructural de conexionado al transformador de alta tensión.

Para el modelado se consideraron los resultados de resistencia estructural previamente hallados y la geometría se modeló a partir del relevamiento realizado en las distintas visitas a la estación transformadora (ver Figura 1). Estas geometrías se volcaron en el software, realizado con un entorno grafico del tipo Open GL.



Figura 1.- Distintas vistas de la planta transformadora (zona analizada)

Estudiadas dichas secuencias fueron descartados los mecanismos de falla menos probables, los cuales también se alejan de las evidencias del hecho. A partir de este análisis se pudo arribar al mecanismo de falla que representa lo documentado en el sitio del siniestro

en la forma más aproximada. Este mecanismo es el que se genera a partir de producir la caída del morseto de unión cable/tubo por la rotura del bulón de sujeción del mismo al aislador. A partir de inducir dicha condición inicial se desata una reacción en cadena que culmina con el colapso total del sistema y coincide en forma aceptable con la situación encontrada después del siniestro acaecido en el mes de noviembre del 2002^{1,2}.

La secuencia final de la rotura que describe el escenario del siniestro analizado puede verse en las siguientes figuras (Figuras 2 a 8).

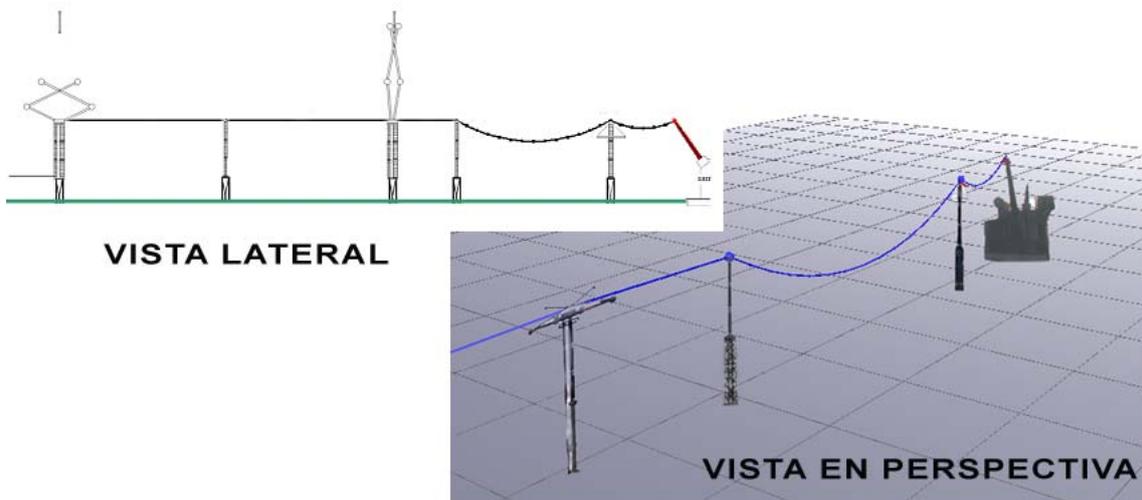


Figura 2.- Vista en perspectiva y lateral del modelo realizado sobre la estructura de conexionado al transformador de distribución. (t = 0.0 seg)

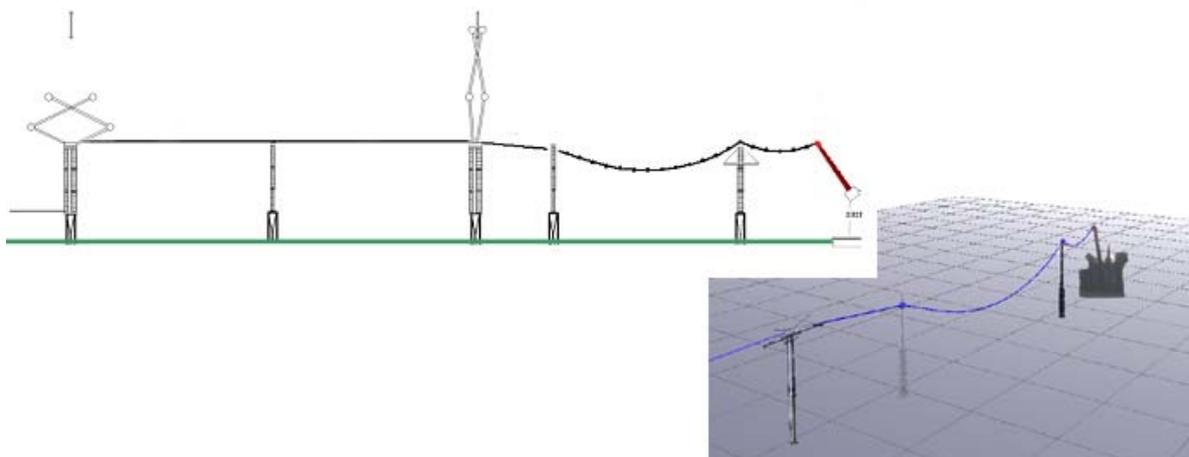


Figura 3.- Comienzo de la simulación con la rotura del morseto del aislador soporte (t = 0.3 seg)

Se produce la rotura inicial del morseto de sujeción sobre el primer aislador soporte donde se encuentra la transición entre los conductores de conexionado rígidos (cilindros huecos) y los conductores flexibles (cables)

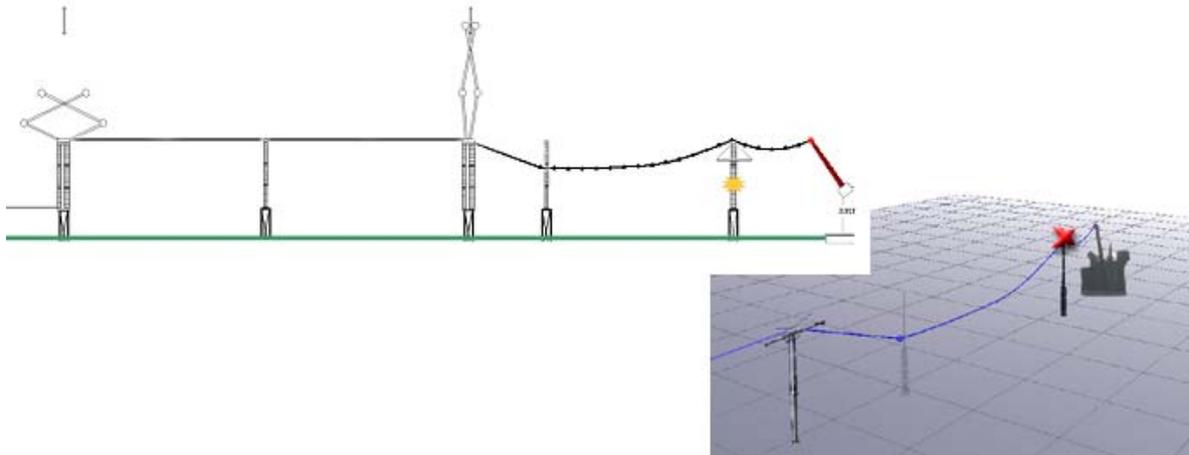


Figura 4.- Se produce la rotura del segundo morseto de apoyo en otro aislador soporte (descargador) ($t = 0.6$ seg)

Al correr las décimas de segundo se alcanza la tensión máxima que es capaz de resistir el aislador soporte del descargador de la línea produciendo su rotura a medio altura, la masa de esta sección de aislador se agrega al sistema en caída para continuar el análisis.

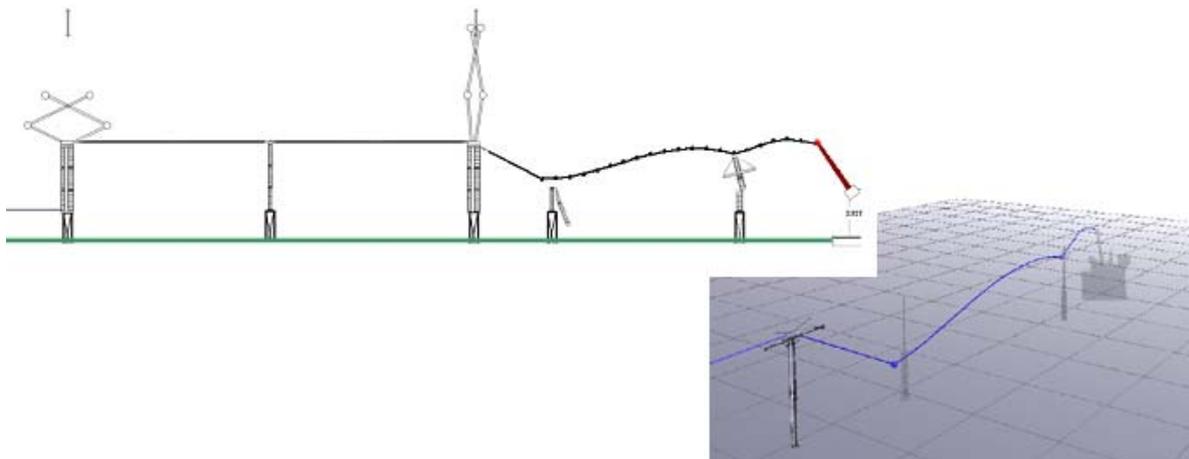


Figura 5.- Continúa la caída del conjunto ($t = 0.9$ seg)

Ya para este punto la cinemática de la caída del conjunto hace que el estado tensional del soporte de entrada al transformador (bushing) llegue también a sus valores máximos produciendo la rotura de este extremo liberando completamente la línea.

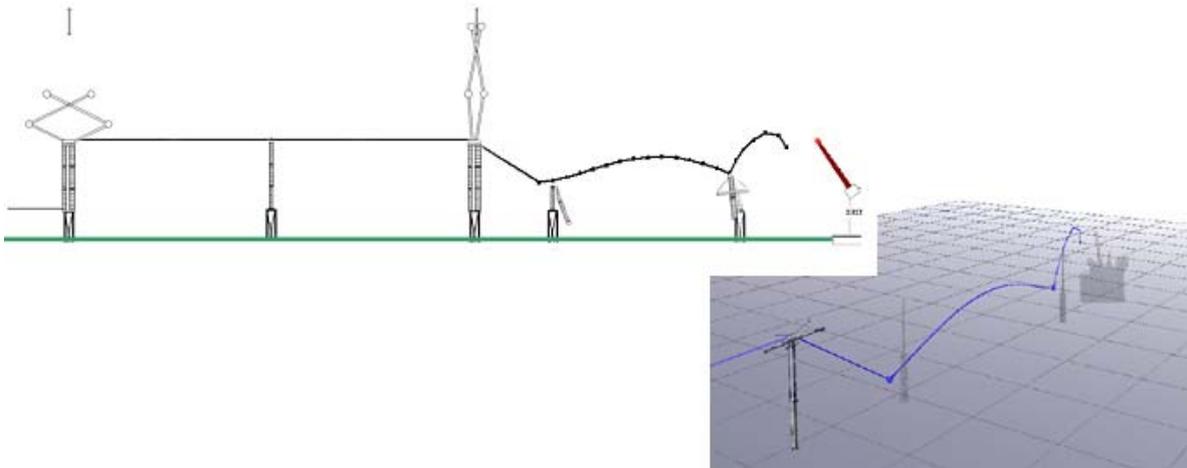


Figura 6.- Se rompe el soporte del “bushing” en la entrada al transformador ($t = 1.2$ seg)

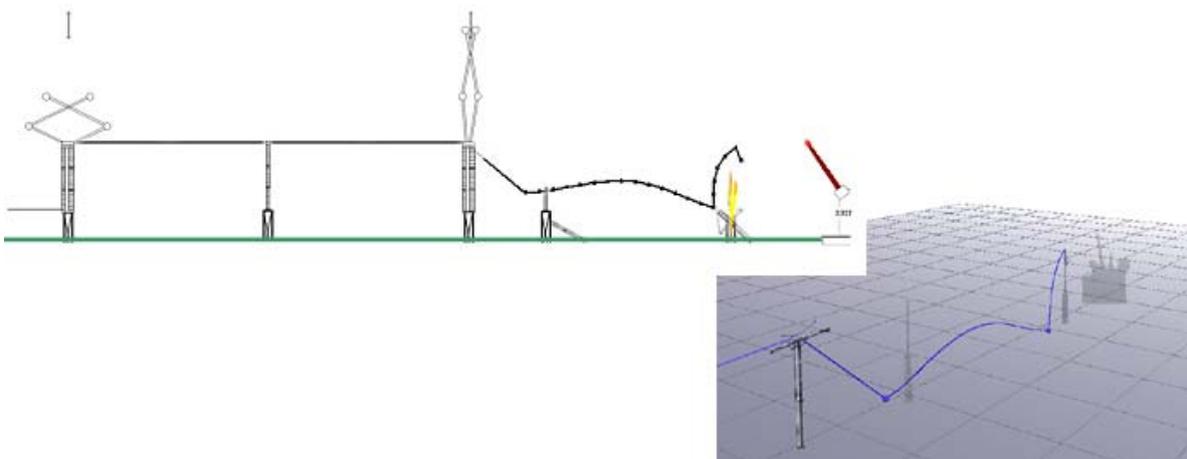


Figura 7.- La continua caída libre del conjunto estructural logra la distancia suficiente para tener la primer descarga a tierra ($t = 1.5$ seg)

La línea energizada durante su caída comienza a realizar descargas de electricidad hacia al suelo a medida que se acerca a este. Este fenómeno se produce hasta que todo este extremo de la línea de conexión se detiene al llegar a su estado de reposo sobre el suelo. Las descargas cesan al accionarse las protecciones eléctricas correspondientes.

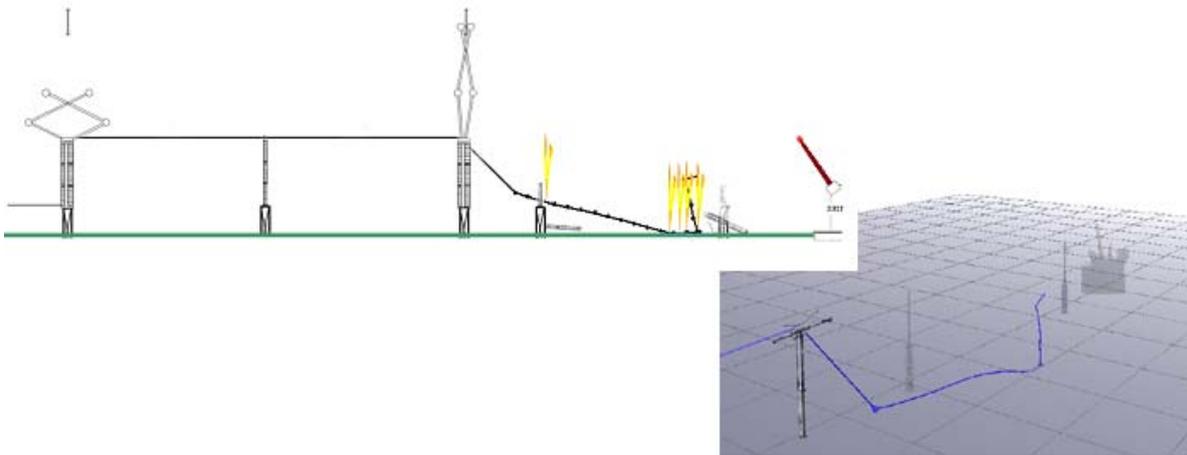


Figura 8.- El conjunto se encuentra en el piso produciendo la descarga final, pocas décimas de segundo después se detiene el efecto de la caída ($t = 1.8$ seg)

6 CONCLUSIONES

El modelo presentado fue capaz de reproducir con un excelente grado de exactitud el siniestro acaecido el pasado noviembre del 2002¹. Los conceptos generalmente utilizados para el diseño de este tipo de líneas poseen deficiencias que deben salvarse para evitar este tipo de accidentes. Como existe un gran número de estructuras de este tipo en servicio hoy en día, es necesaria la aplicación de esta técnica o técnicas similares para conocer el posible comportamiento de éstas ante una eventual falla estructural.

La aplicación de las hipótesis y del modelo numérico ha llevado a la generación de una teoría capaz de mostrar los posibles escenarios ante la salida en servicio de distintos miembros estructurales. La aplicación sobre este modelo de una interfaz gráfica y del tipo amigable hace que la versatilidad de uso del software desarrollado sea una herramienta útil para los ingenieros de mantenimiento e ingenieros de seguridad.

Los parámetros límites de resistencia del modelo a través del ensayo de los componentes estructurales del conjunto hacen que los resultados finales de la dinámica estructural del conjunto sean muy cercanos a los que se producirán ante un colapso real. De esta manera se pueden diseñar las medidas y acciones a tomar ante una posible falla, anticipando de ante mano, los escenarios y los inconvenientes que se pudieran producir.

7 REFERENCIAS

- [1] IITREE – LAT, “Informe ENR 349”, UNLP Facultad de Ingeniería, 2003
- [2] UID GEMA, Informe GEMA 030116 “Estudio de la Causa de Falla de la Fase R T2EZ de la Estación Transformadora Ezeiza”, UNLP Facultad de Ingeniería, 16 de Enero de 2003
- [3] McClure, M. Lapointe, “Modeling the structural dynamic response of overhead transmission lines”, *Computers and Structures* 81 (2003)825–834

- [4] Cook, RD “Finite Element Modeling for Stress Analysis”, Wiley, 1995
- [5] Bathe K.J., “Finite element procedures”, Upper Saddle River, NJ. Prentice-Hall; 1996.
- [6] Bruhn, E.F., “Analysis & Design of Flight Vehicle Structures”, Jacobs Publishing, Inc, 1973
- [7] Björck, G. & Anderson, N., “Numerical Methods”, Prentice may, 1974
- [8] UID GEMA, Informe GEMA 030519 “Análisis de la Situación Estructural de los Componentes Relacionados al T2EZ de la Estación Transformadora Ezeiza”, UNLP Facultad de Ingeniería, 09 de Enero de 2004