

RESPUESTA ESTRUCTURAL DE SISTEMAS DE TRANSMISIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN LA PROVINCIA DE MISIONES, ARGENTINA

Ing. Civil Fernando R. Detke ^a, Ing. Co. Javier A. Duarte ^a, Dr. Ing. Oscar Möller ^b

^a *Departamento de Ingeniería civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones, Oberá, Misiones, Argentina, detke@fiobera.unam.edu.ar*

^b *Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras (IMAE), Universidad Nacional de Rosario, Rosario, Argentina, mollier@fceia.unr.edu.ar*

Palabras clave: Sistemas de transmisión de energía eléctrica, Hormigón pretensado, Respuesta Estructural, Acción dinámica del viento, Redes neuronales.

Resumen.

Se presenta en este trabajo un modelo estructural y su respuesta analizada en función de conjuntos de variables de diseño, que caracterizan numéricamente el comportamiento de un sistema formado por dos vanos de 250 metros de longitud, representativo de una línea de transmisión de energía eléctrica de 132kV, considerando datos de velocidad de viento para la Provincia de Misiones, Argentina. Los conductores, cable de guardia, cadenas de aisladores, crucetas y ménsulas son considerados como cargas. Dicho modelo es analizado aplicando técnicas de elementos finitos, esto es: el poste de hormigón pretensado es representado por elementos de barra, con un resorte rotacional en la unión con la fundación para representar el comportamiento no lineal físico que puede ocurrir en esa zona del poste. La fundación y el suelo circundante se modelan con elementos-sólido, teniendo en cuenta así la interacción suelo estructura para evaluar los desplazamientos reales del conjunto. Las acciones son la carga estática gravitatoria permanente y la acción dinámica del viento horizontal considerada como un proceso estocástico. El comportamiento del modelo para una serie de combinaciones de las variables de diseño, serán aproximadas con técnicas de simulación de respuesta, mediante el método de redes neuronales.

Abstract.

Is presented in this paper a structural model and response analyzed in terms of sets of design variables that characterize numerically the behavior of a system of two spans of 250 meters long, representing a transmission line of 132kV power considering wind speed data for the Province of Misiones, Argentina. Overhead conductors, guard cable, chain insulators, crossarms and brackets are considered as loads. This model is analyzed using finite element techniques, that is, the prestressed concrete pole is represented by bar elements, with a rotational spring at the junction with the foundation to represent the physical nonlinear behavior that can occur in the area of post. The foundation and surrounding soil are modeled with solid elements, taking into account soil structure interaction and to analyze the actual movement of the whole. Actions are the gravitational constant static and dynamic action of the horizontal wind regarded as a stochastic process. Behavior model for a series of combinations of the design variables are approximated by simulation techniques response by the neural network.

INTRODUCCIÓN

En la región en estudio, la estabilidad de sistemas estructurales de líneas aéreas de transmisión de energía eléctrica, se ve fuertemente influenciado por la incidencia de las fuerzas dinámicas generadas por la acción del viento en conductores eléctricos, cables de guardia, aisladores y estructura soporte. Dichas fuerzas son trasladadas al suelo de fundación, generando en el sistema una respuesta en términos de desplazamientos y esfuerzos internos.

Estas fuerzas que resultan de la integración de presiones, actuantes sobre los componentes del sistema, presentan un carácter no determinístico, pues derivan de la acción del viento, problema que se aborda con adecuada aproximación a través de su consideración como procesos aleatorios o estocásticos ^[1].

El modelo estructural aquí tratado representa numéricamente el comportamiento bajo la acción aleatoria del viento de la fracción de un sistema de líneas de transmisión con nivel de tensión nominal de 132kV, modalidad característica en los proyectos implementados en la Provincia de Misiones, conforme se observa en la Figura 1.

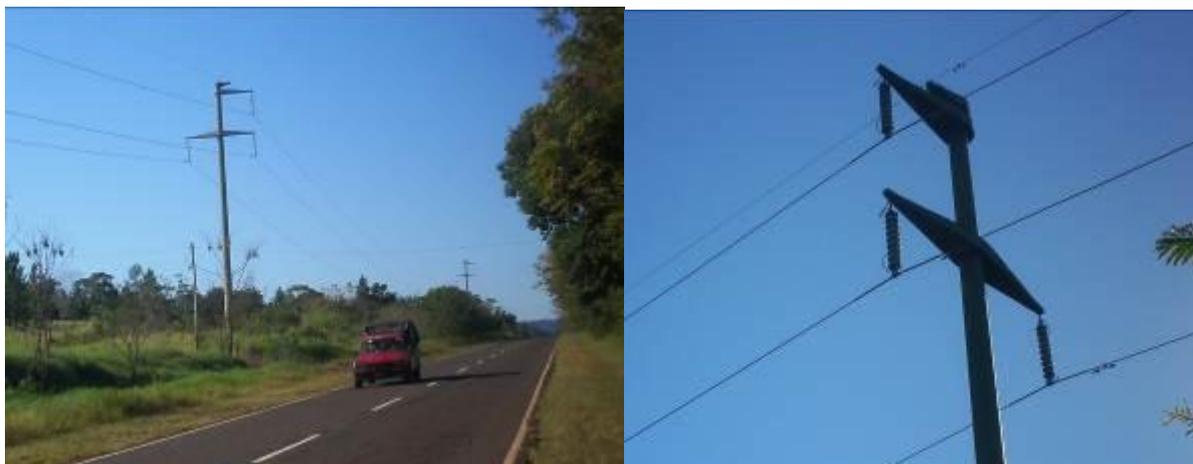


Figura 1: Línea de 132kV. Aristóbulo del Valle, Provincia de Misiones, Argentina.

El objetivo de este trabajo es presentar un modelo numérico que permita recopilar en forma eficaz, con técnicas de simulación numérica, resultados de comportamiento estructural que puedan ser útiles en la elaboración de diversas herramientas de diseño probabilístico. Para ello se define un conjunto de variables principales y otro grupo de variables secundarias, seleccionadas aleatoriamente entre los rangos de ocurrencia. Mediante un número adecuado de análisis de solicitaciones de la estructura, es posible obtener las respuestas, para poder definir el grado de confiabilidad del sistema. Se podrá detectar en un estudio posterior qué variables son más importantes y generar funciones de costo del sistema estructural, con el fin de optimizar el uso de los recursos y la seguridad de los mismos.

Además, los parámetros de respuesta de la estructura se utilizan para efectuar una evaluación cuantitativa de prestación del sistema y su comparación con los resultados de la aplicación de procedimientos reglamentarios de base determinística^[2]. Proceso presentado con anterioridad, y que en general arrojó valores de respuestas de entre un quince y un veinticinco por ciento menores para el modelo en estudio ^[3].

1 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS Y MECÁNICAS DE LOS ELEMENTOS COMPONENTES

La aplicación de este trabajo se realiza sobre un tramo de dos vanos de 250 metros, representativo de una línea de 132kV, con desarrollo lineal sobre terreno plano de ambiente rural. El sistema está constituido por estructuras de suspensión simple, conformadas por: poste premoldeado de hormigón armado y pretensado, crucetas y ménsulas de hormigón armado que sustentan tres conductores eléctricos, cadenas de aisladores y un cable de guardia, como se ilustra en la Figura 2, con sus correspondientes bases de hormigón simple y terreno de fundación.

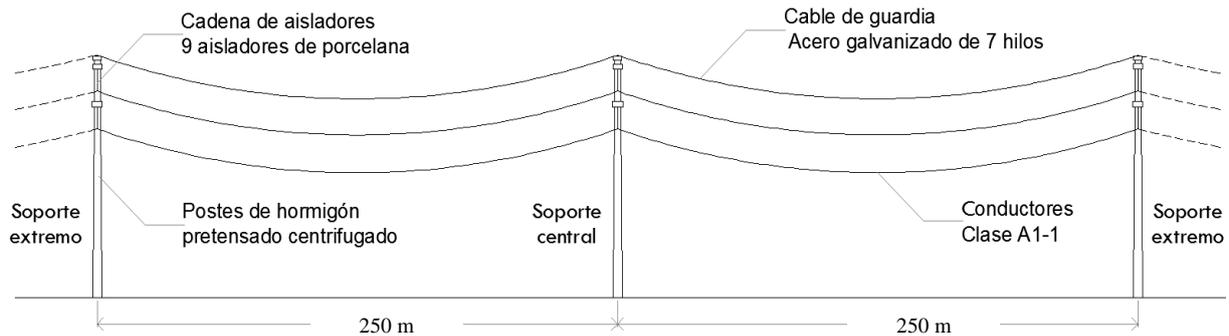


Figura 2: Tramo del sistema considerado en el modelo estructural.

En el presente trabajo los componentes del sistema estructural estudiado se dividen en dos grupos:

a) Elementos simulados en forma de acción externa, compuestos por crucetas y ménsulas de hormigón armado, conductores eléctricos, cadenas de aisladores y cable de guardia.

b) Elementos que constituyen el modelo computacional, formados por poste de hormigón armado y pretensado, base de hormigón simple y suelo de fundación.

Los parámetros que definen las características de los elementos del grupo a) son fijos y representativos de los sistemas de transmisión eléctrica utilizados en la región.

Los elementos del grupo b) poseen algunos parámetros geométricos y mecánicos variables (principales y secundarias), para ser utilizados a posteriori en un proceso de confiabilidad y optimización estructural. En la tabla 1 se definen las variables principales y sus límites, superior e inferior, de aplicación en el modelo estudiado.

<i>Variable</i>	<i>Símb</i>	<i>Denom.</i>	<i>Lím. INF.</i>	<i>Lím. SUP.</i>	<i>Ud.</i>
Diámetro de la cima del poste	\varnothing_p	X(1)	0,21	0,45	m
Espesor del poste	e_p	X(2)	0,07	0,12	m
Cuantía de armadura de pretensado	ρ_{pret}	X(3)	0,15	2,5	%
Cuantía de armadura pasiva	ρ_{pas}	X(4)	0,3	5	%
Lado de la base cuadrada	a_b	X(5)	0,80	1,80	m
Profundidad de la base	h_b	X(6)	1,80	3,00	m
Elasticidad del suelo	E_s	X(7)	6000	30000	$\frac{kN}{m^2}$
Velocidad básica del viento	V_o	X(8)	5	80	$\frac{m}{s}$

Tabla 1: Variables principales y sus límites numéricos.

2 ACCIONES SOBRE EL MODELO

Respecto a las acciones gravitatorias de los elementos del grupo a) son modeladas como una masa aplicada y reducida a la cima del poste, reproduciendo las propiedades mecánicas y de comportamiento características de los cables bajo la acción del peso propio, con límites máximos reglamentarios de flecha en el centro de los vanos, y la fuerza de tiro correspondiente en sus extremos.

El efecto dinámico del viento aplicado sobre el modelo (elementos del grupo b), se reduce a una carga puntual, dependiente del tiempo, ubicada en la cima del poste. Esta carga produce el mismo esfuerzo instantáneo de flexión en el pie del poste que la acción distribuidas en todo el modelo.

Para cuantificar la acción del viento a aplicar se utilizan distintas hipótesis dependiendo del elemento considerado. Así, para el caso del poste, se obtiene una carga que representa al diagrama de presiones exponencial tal como se observa en la Figura 3.

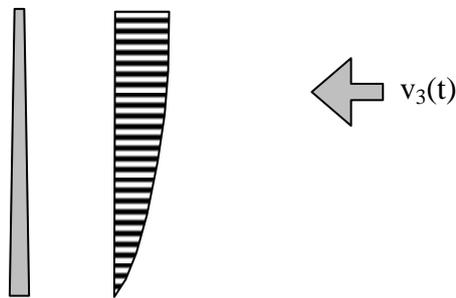


Figura 3: Acción del viento sobre el poste.

En cuanto para los cables (conductores e hilo de guardia), el frente de ráfagas se discretiza en bandas o fajas de 50m de ancho, considerando la correlación espacial y temporal en la dirección transversal y las distintas alturas medias de cada tramo de cable según se muestra en la Figura 4.

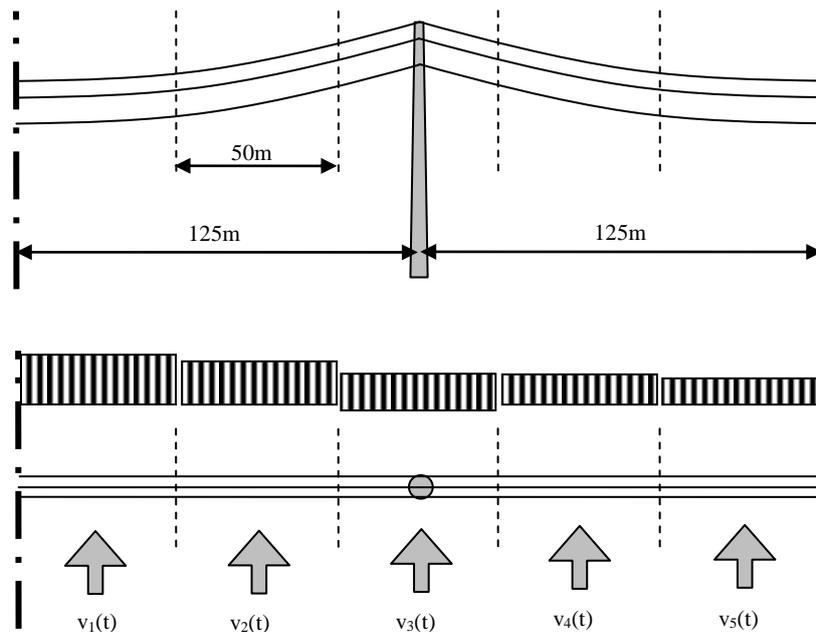


Figura 4: Acción del viento sobre cables.

Los registros de viento son simulados numéricamente mediante rutinas en lenguaje FORTRAN de las que se toma un intervalo de duración total de 300 segundos, considerando una componente de turbulencia adicionada a la velocidad media ⁴, uno de los cuales se detalla en la Figura 5.

Para evitar efectos de impacto por aplicación súbita de la carga, que distorsionan el comportamiento del modelo, se contempla una “rampa de carga y descarga” de crecimiento y descenso progresivo en los primeros y últimos 30 segundos, del intervalo analizado. Las presiones generadas por esta acción son integradas en toda la estructura y reducido a la cima del poste como se observa en la Figura 6.

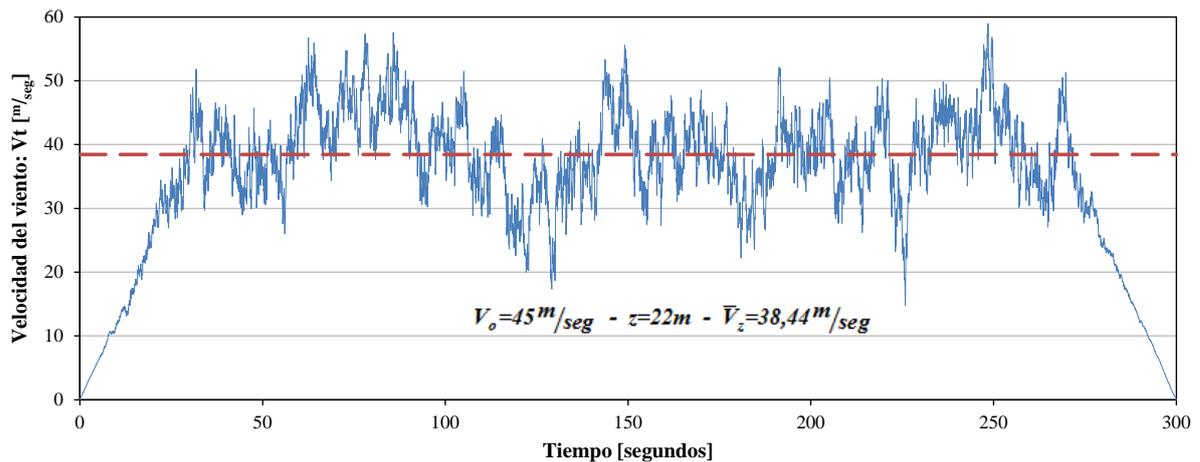


Figura 5: Registros de viento de una combinación.

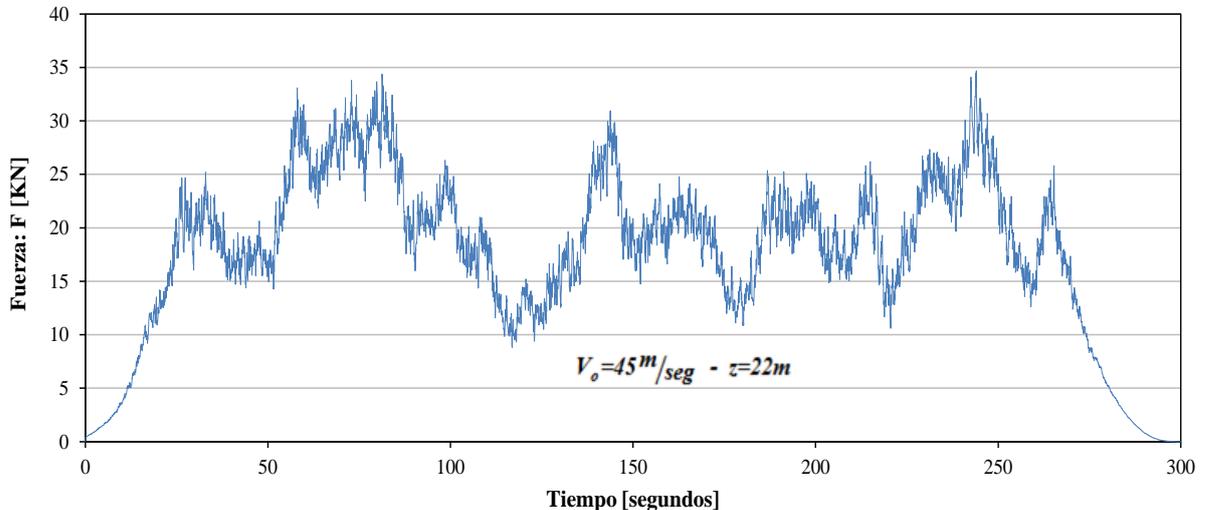


Figura 6: Acción del viento reducida a la cima del poste.

3 GENERACIÓN Y ANÁLISIS DEL MODELO

La composición y desarrollo de la solución al problema abordado del modelo estructural, caracterizado anteriormente, se realiza a partir de la modelación digital en el software de análisis estructural SAP2000 Versión V.14.2.0, que resuelve el problema por el método de los elementos finitos, y cuya discretización se ilustra en la Figura 7.

3.1 Definición de los materiales utilizados

Se definen para este modelo seis tipologías de materiales:

1.- Hormigón para poste: Material hormigón utilizado para los postes, en el cual se definen la resistencia especificada y el módulo de elasticidad. Para este hormigón se ha establecido que la descripción constitutiva del material en el campo plástico se efectúa con el modelo de Takeda ^[5]. La definición de la curva Tensión-Deformación sigue el modelo de Mander ^[6]. Las propiedades mecánicas de este material forman parte del conjunto de variables secundarias.

2.- Hormigón para base: Material hormigón que conforma el dado de fundación del sistema soporte. El mismo sigue idéntica configuración constitutiva que la utilizada en el material precedente. Este material no tiene sujeta ninguna variable aleatoria (principal o secundaria).

3.- Acero pretensado para sección: Material acero de refuerzo generado para simular la cuantía de armadura activa en las secciones del poste que están elaboradas mediante el módulo SECTION DESIGNER. Los parámetros mecánicos de este material son incluidos en el grupo de variables secundarias

4.- Acero de armaduras pasivas: Material acero de refuerzo generado para simular la cuantía de armadura pasiva en las secciones del poste, elaboradas mediante el módulo SECTION DESIGNER. Los parámetros mecánicos de este material son incluidos en el grupo de variables secundarias ^[7].

5.- Acero para tendones: Material acero de refuerzo tipo tendón generado para simular la acción de pre compresión de la armadura activa sobre el hormigón del poste. Este material es asignado al elemento tendón. Sus características mecánicas también forman parte de las variables secundarias.

6.- Suelo Colorado: material definido de modo genérico que simula el comportamiento mecánico del suelo regional con aproximación razonable y suficiente para los alcances de este estudio. Sus parámetros son obtenidos de una serie de ensayos realizados en el laboratorio de estructuras de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Misiones. El módulo de elasticidad de este material constituye una de las variables principales del problema.

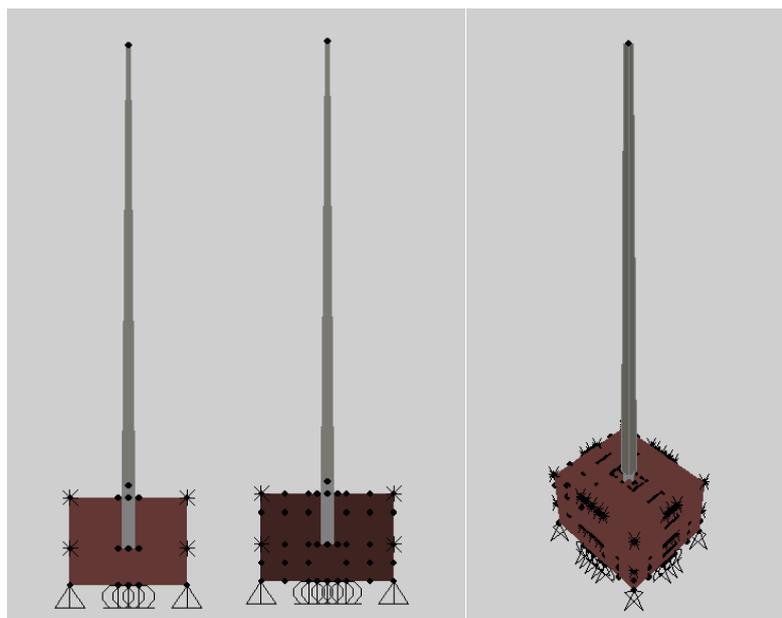


Figura 7: Modelo digital.

3.2 Definición de los elementos componentes en el modelo digital

Con respecto a los elementos finitos que se han utilizado para representar a la estructura, se puede decir:

1.- Para la estructura soporte (poste) se consideraron elementos de barra de sección circular anular variable, modeladas en hormigón armado y pretensado, en función de un diámetro de partida en la cima y de la conicidad propia del poste. Esta barra de sección variable está definida mediante dos secciones elaboradas en el módulo SECTION DESIGNER del SAP2000, tal como muestra la figura 8. A estas secciones se asignan los materiales correspondientes definidos en los párrafos anteriores. Esto permite ajustar al máximo las propiedades geométricas y mecánicas de los elementos con la realidad de la estructura.

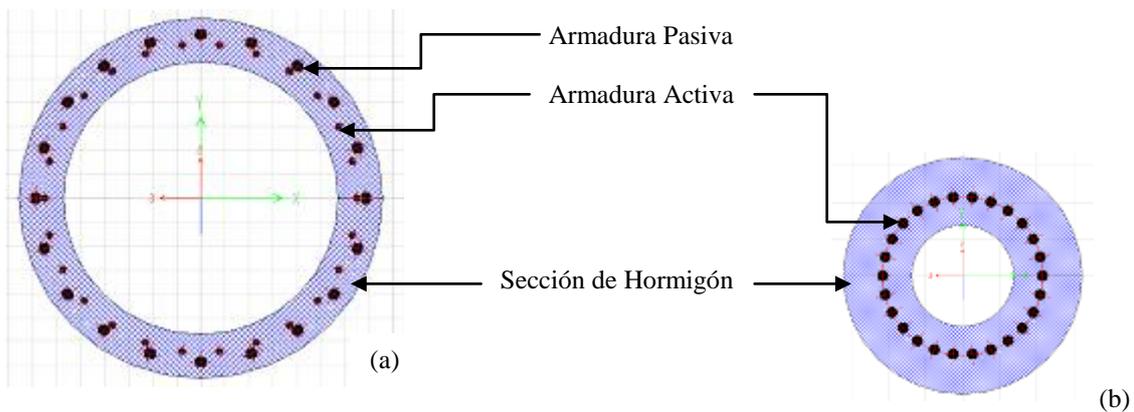


Figura 8: Secciones del Poste. (a) en la base. (b) en la cima.

Se comienza definiendo una sección anular de diámetro pertinente a la combinación que se está elaborando, luego se agregan las armaduras pasivas y activas asignando los materiales correspondientes a cada caso. Una ventaja del uso de este módulo es la posibilidad de poder visualizar diagramas momento-curvatura de las secciones creadas como así también los límites entre el campo elástico y la zona de plastificación de la sección. También provee datos de estados límites últimos (momento de rotura y curvatura en ese instante).

2.- El efecto de pretensado aplicado al poste es modelado como una carga aplicada en ambos extremos mediante la concatenación con la barra de un elemento tendón, el cual cumple el objetivo de simular el efecto de precompresión en forma de acción externa. El mismo se combina con el elemento barra que simula al poste, de manera tal de obtener como consecuencia una barra precomprimida por una carga equivalente a la fuerza de pretensado.

3.- En la unión del poste con la base se ubica un resorte no lineal, que es el elemento mecánico incorporado para estudiar la falla por agotamiento seccional del poste, se configura bajo las siguientes hipótesis:

P-M2-M3, es el modelo utilizado para el resorte no lineal que combinado con el modelo de fibras ^[8] contempla un mecanismo de interacción entre esfuerzo axial (P) y flexión (M2-M3). El mecanismo P-M2-M3 de esta rotula, modela el comportamiento de una serie de "fibras" representativas, distribuidas en forma longitudinal, en toda la sección transversal del elemento barra. Cada fibra tiene una ubicación, un área tributaria y una curva de tensión-deformación. Los esfuerzos están integrados en la sección para calcular los valores de P, M2 y M3.

La precisión de la respuesta del modelo depende de la finura de la discretización que se emplee. En este trabajo se utiliza un mallado de 10 por 10 en ambas direcciones de la sección. Un mayor número de fibras proporciona una mayor precisión de la respuesta obtenida, a costa de un mayor coste computacional tanto en tiempo de cálculo como en las necesidades de memoria ya que, al tratarse de un modelo no lineal, será necesario almacenar un mayor número de variables históricas necesarias para seguir la pista al ciclo de histéresis de cada una de las fibras.

La idealización de Caltrans ^[9], constituye un criterio simplificado para la idealización de la relación momento-curvatura, representándolo en forma bilineal de manera de compensar las energías a ambos lados de la curva real, tal como lo muestra la Figura 9.

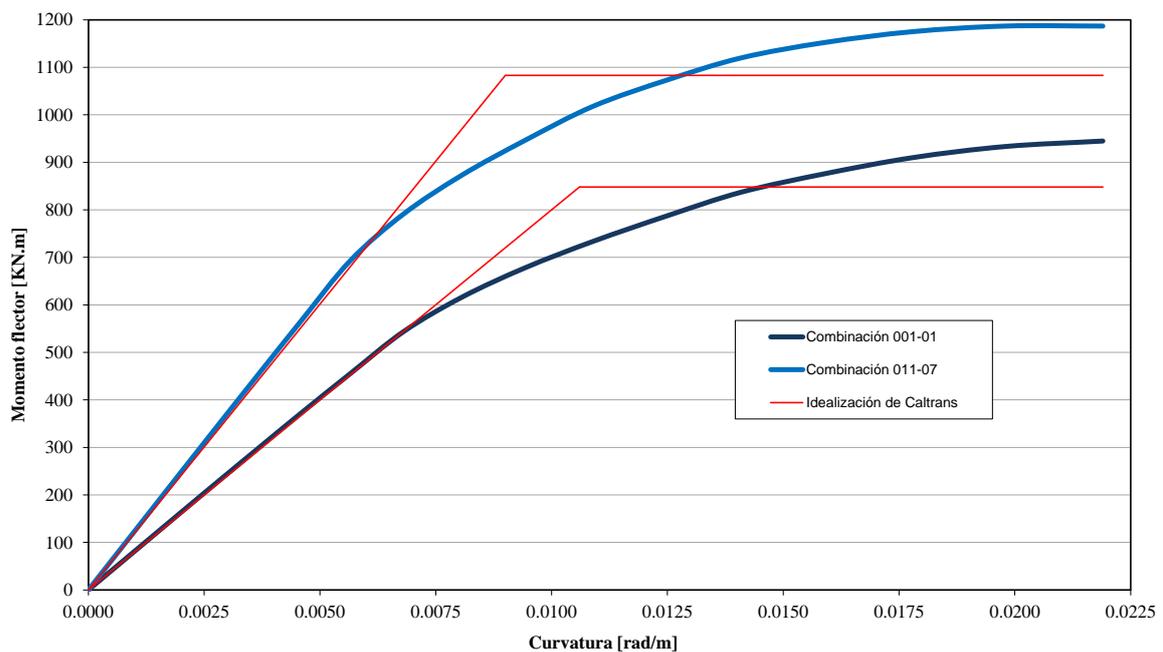


Figura 9: Relaciones momento-curvatura para modelo de fibras e idealización de Caltrans.

4.- La cimentación se modela como elementos sólidos tridimensionales convenientemente discretizados que simulan la fundación propiamente dicha, conformando un prisma de hormigón simple de sección rectangular y eje vertical, en el cual se superpone el elemento barra que modela el poste, generándose de esta manera un empotramiento del mismo en la fundación.

5.- Se modela a su vez una porción limitada del suelo circundante con el fin de capturar la interacción suelo-estructura. Las propiedades del suelo se asumen elásticas, despreciando los efectos de amortiguamiento.

En cuanto a los límites de análisis del suelo, se establecieron mediante una serie de pruebas que permitieron definir una solución de compromiso entre el costo computacional y la relevancia de los límites impuestos en los resultados obtenidos. Es así que se fijó en 2.70m el suelo circundante en las direcciones coincidentes con la planta de la base, y en 1.80m en la dirección vertical. En cada una de estas direcciones se estableció como condición de borde la restricción al desplazamiento en la dirección normal al plano de borde.

3.3 Casos de análisis utilizados.

1.- Análisis gravitatorio: analiza la estructura considerando solo las cargas muertas aplicadas al sistema, incluyendo el peso propio de la estructura. Este análisis es de tipo lineal estático. Las cargas permanentes comprenden los pesos de la estructura de suspensión (postes, cruceta, ménsulas, cadenas de aisladores, herrajes) y de los conductores y cable de guardia, según especificaciones de fabricantes.

2. Análisis No lineal de Precompresión (Pretesado): este análisis es el primer caso no lineal que se resuelve en el problema. El mismo intenta simular el efecto del pretensado en los elementos que componen el poste de hormigón estructural.

3.- Análisis No lineal Dinámico de la acción del viento: este análisis es de tipo no lineal y aplica a la estructura por intermedio de un patrón de carga predefinido y una señal temporal de amplitud y periodo estocásticos. Para la resolución de las ecuaciones de movimiento de la estructura se define el método de Newmark como técnica de integración paso a paso.

4 RESPUESTAS LÍMITES DE LA ESTUCTURA

Para evaluar la “Perfomance” de la estructura, se establecen dos estados límites:

1.- Operacional o de servicio: definido por cuestiones operacionales del sistema, en el cual el nivel de daños no supere un valor económicamente reparable. En este trabajo, este estado es evaluado mediante valores restrictivos a dos repuestas de la estructura, como lo son el desplazamiento máximo en el extremo superior del poste o cima, medido en la dirección del viento (ELS1), y la rotación de la base del poste, medida desde una de sus caras (ELS2).

2.- Colapso o agotamiento de resistencia: en esta instancia algún elemento de la estructura alcanza valores intolerables en los parámetros de resistencia que implican el colapso de la misma. Las respuestas que definen este estado son agotamiento mecánico del poste, evaluado mediante el giro relativo en el resorte no lineal (rotula plástica), ubicada en el extremo inferior del poste (ELU1), y colapso del suelo de fundación en contacto con la base, medido a través de su deformación específica (ELU2).

5 PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESPUESTAS

Se presenta a continuación las respuestas individuales del modelo estudiado, elegidas como representativas de su comportamiento, de cuatro combinaciones de variables principales, cuyos parámetros se muestran en la tabla 2.

Variable	Ud.	Denom.	Combinaciones			
			C 001	C006	C011	C015
Diámetro de la cima del poste	m	X(1)	0.245	0.324	0.341	0.322
Espesor del poste	m	X(2)	0.070	0.078	0.086	0.090
Cuantía de armadura de pretensado	%	X(3)	2.260	0.890	1.16	1.14
Cuantía de armadura pasiva	%	X(4)	4.800	4.840	3.75	4.28
Lado de la base cuadrada	m	X(5)	1.000	1.050	1.10	1.10
Profundidad de la base	m	X(6)	2.450	2.300	2.15	2.85
Elasticidad del suelo	kN/m^2	X(7)	27427	20232	9306	7073
Velocidad básica del viento	m/s	X(8)	63.0	54.9	11.7	42.6

Tabla 2: Combinaciones y variables principales seleccionadas.

5.1 Análisis de resultados del poste

Como respuesta del comportamiento del poste se muestra el desplazamiento de su cima, medido en la dirección del viento y la relación momento-rotación de la rótula plástica ubicada en la base del poste.

En la Figura 10 y Figura 12 se puede apreciar el desplazamiento de la cima del poste y las relaciones momentos-rotaciones de la sección de la base del mismo. El comportamiento del elemento se desarrolla preponderantemente en el campo elástico, para acciones del viento moderadas a bajas (ver Tabla 2).

Por otro lado las Figuras 11 y 13 muestran las mismas respuestas del poste indicadas en el párrafo precedente, pero la conjunción de los parámetros de las combinaciones utilizadas hace que el comportamiento del elemento se realice mayoritariamente en el campo plástico.

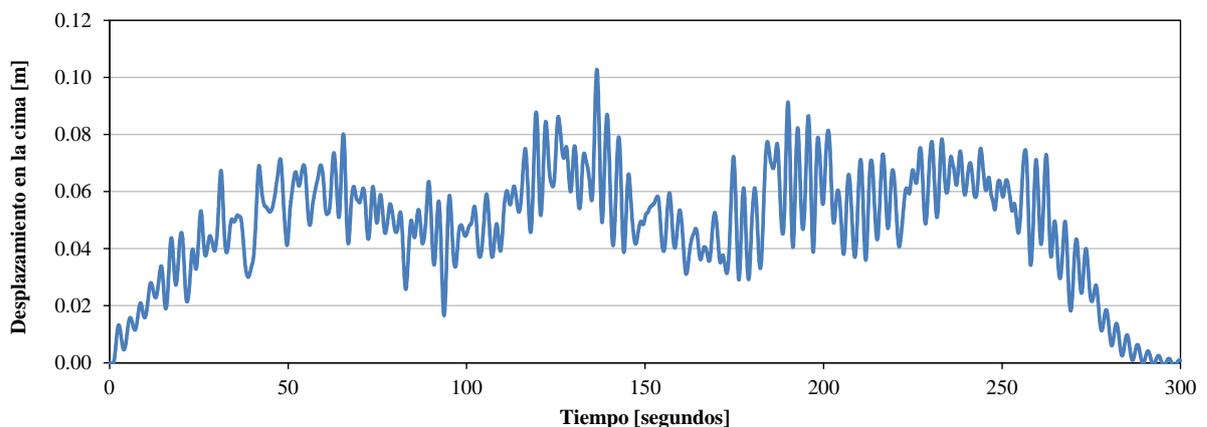


Figura 10: Respuesta desplazamiento en la cima. Combinación C011-07.

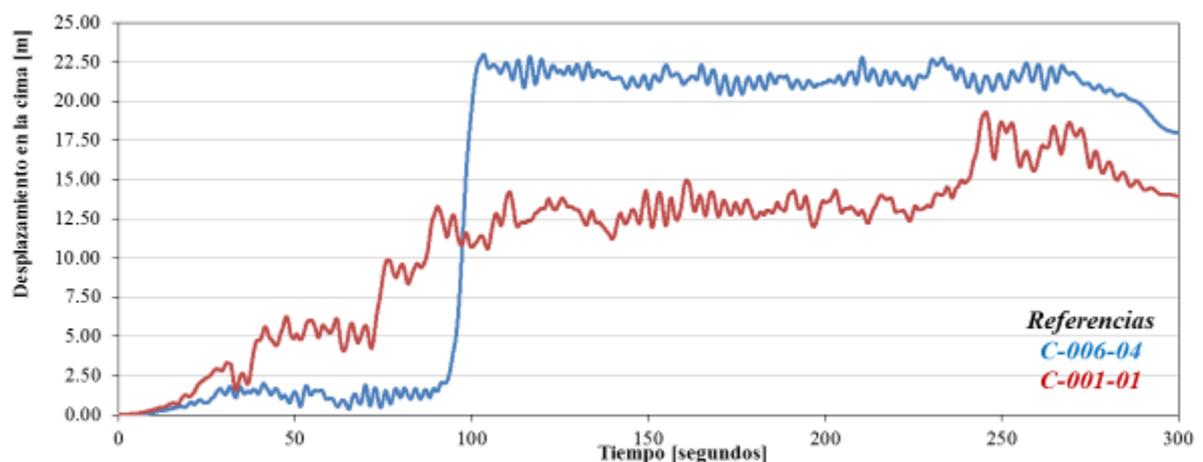


Figura 11: Respuesta desplazamiento en la cima. Combinación C001-01 y C006-04.

Se destaca que para la subcombinación 001-01, la respuesta es fuertemente cíclica debido a cargas y descargas del sistema producto de la acción dinámica del viento. Este fenómeno de fatiga que se observa, señala un nuevo punto de estudio a corto plazo, dado que es interesante detectar que incidencia tienen los procesos de fatiga en una estructura de estas características en términos de su capacidad portante.

En la figura 12 también podemos observar que si bien el comportamiento del

modelo es predominantemente elástico, existen perdidas en términos de recuperación elástica, para ciertos rangos de sollicitación, cuestión que es observable en ensayos de rotura para estos elementos.

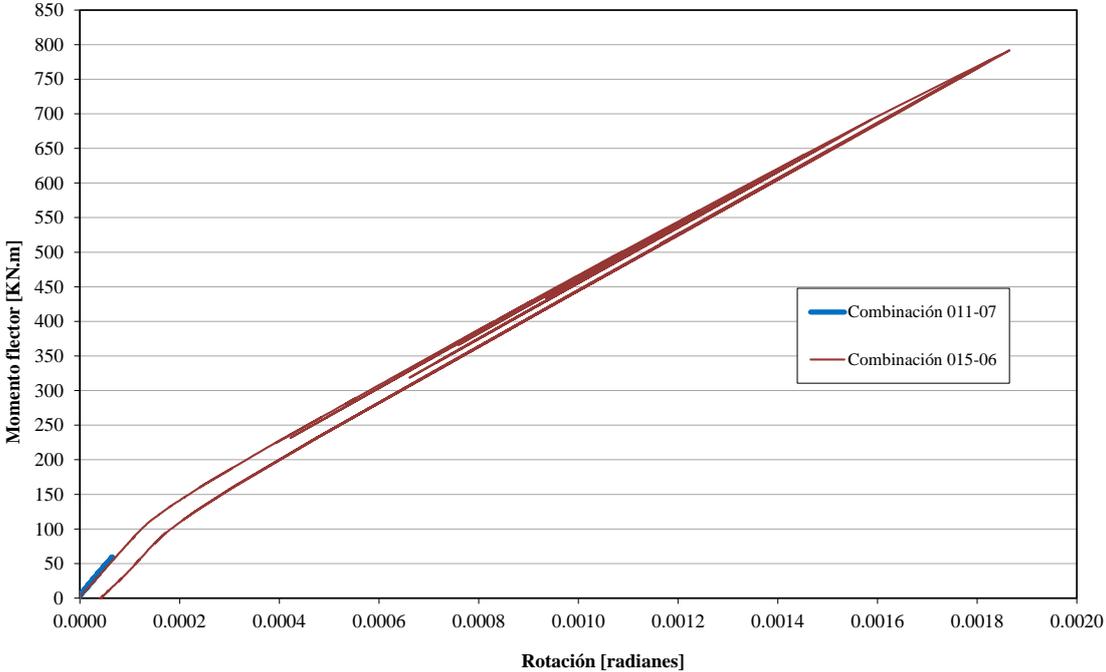


Figura 12: Relación momento-rotación. Resorte no lineal. Comportamiento elástico.

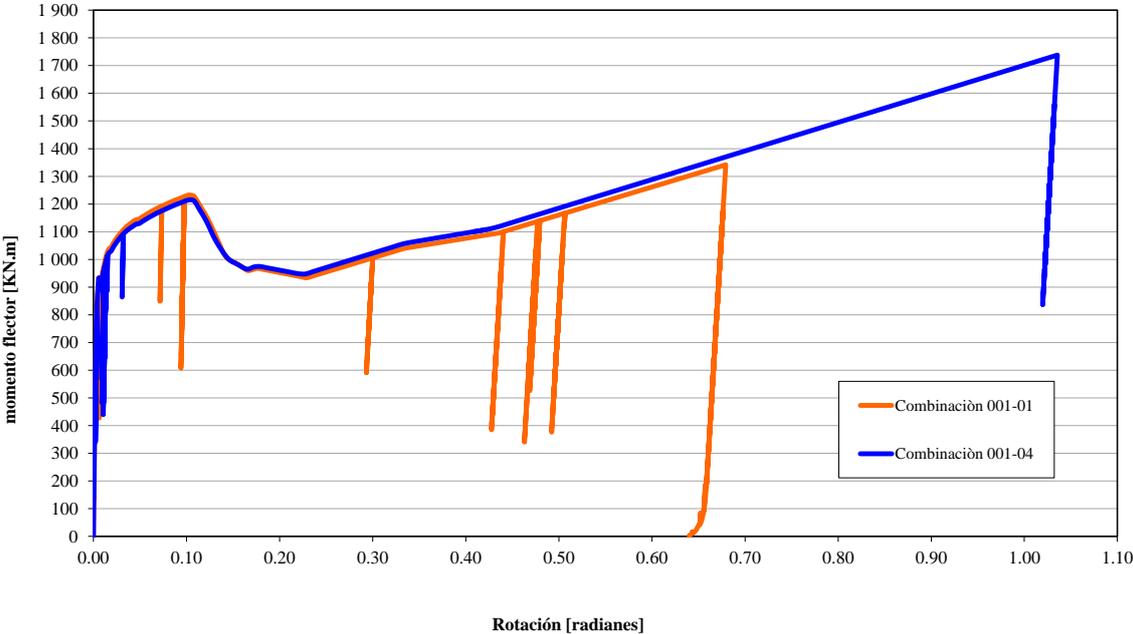


Figura 13: Relación momento-rotación. Resorte no lineal. Comportamiento plástico.

5.2 Análisis de resultados de la interacción base-suelo

Como respuesta del comportamiento del sistema base-suelo de fundación se muestra la rotación de la base en la dirección de la acción del viento y la deformación específica de elementos de suelo ubicados a ambos lados de las caras

perpendiculares a la dirección del viento de la base.

Se tiene en cuenta aquí que los parámetros mecánicos que definen al material suelo colorado del modelo tienen un comportamiento lineal. Comparando las deformaciones específicas mostradas en la Figura 14 con los resultados obtenidos experimentalmente, los modelos correspondientes a estas combinaciones actúan en el régimen elástico.

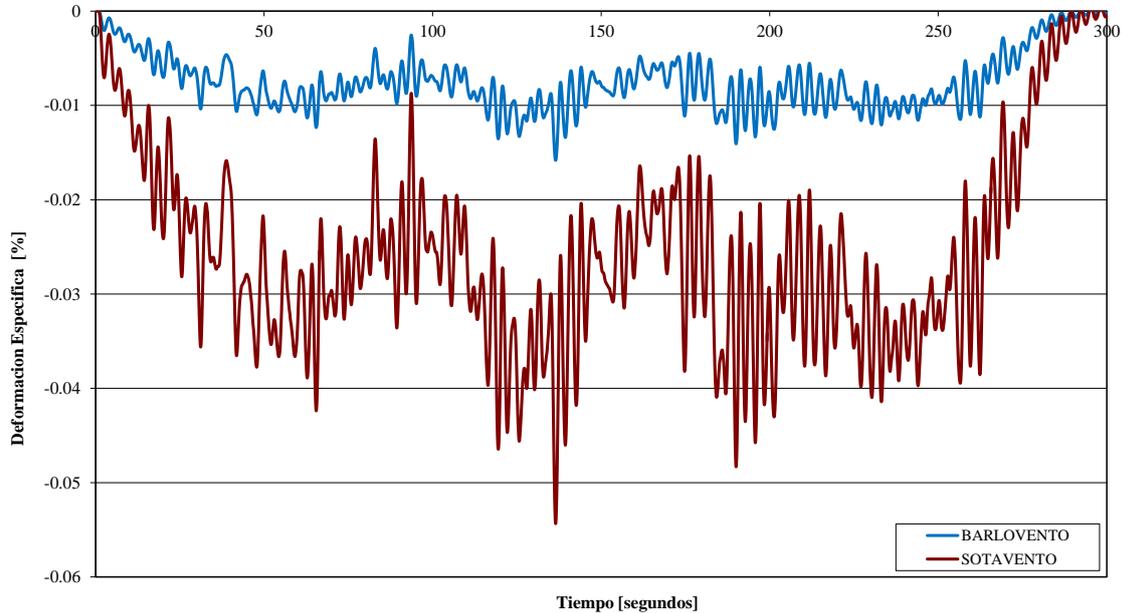


Figura 14: Deformación unitaria del suelo. Combinación 011-07.

Por otro lado, la misma comparación realizada para el modelo cuya respuesta se observa en la Figura 15, responde a un comportamiento no lineal del material, dado que la deformación específica supera el límite elástico determinado en laboratorio para ese tipo de suelo.

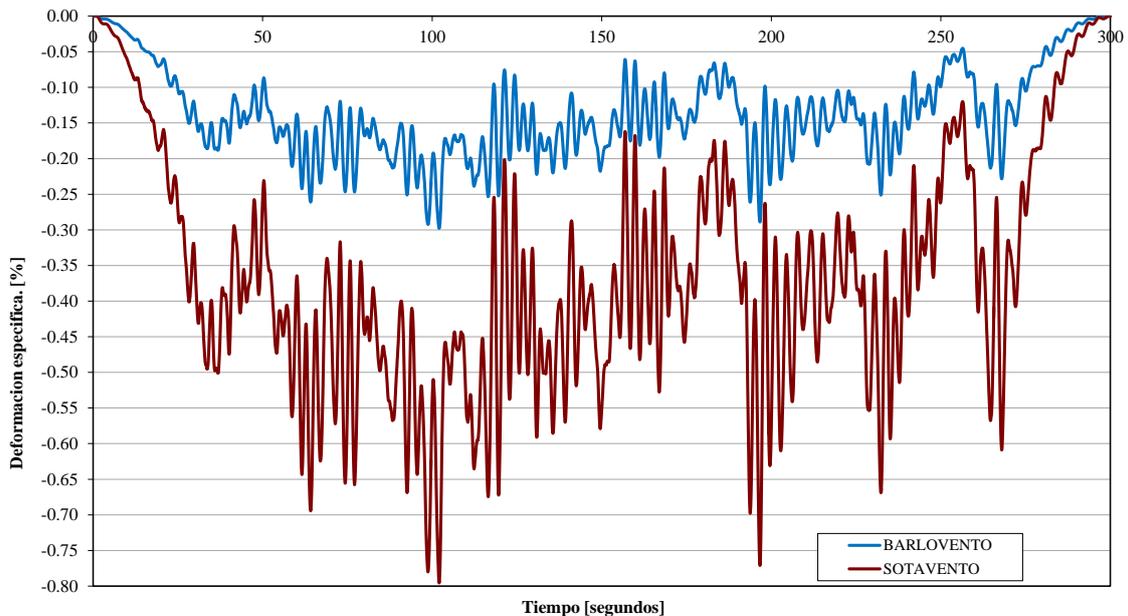


Figura 15: Deformación unitaria del suelo. Combinación 015-06.

El análisis de la Figura 16 indica que tanto las combinaciones 011-07 y 001-01 presentan giros de la base de pequeña magnitud, correspondiéndose con las respuestas mostradas para las deformaciones del suelo de los mismos modelos.

Así mismo existe correspondencia biunívoca con las respuestas de la combinación 015-06 en la cual las deformaciones y los giros resultan mayores, indicando su pertenencia al campo elasto-plástico.

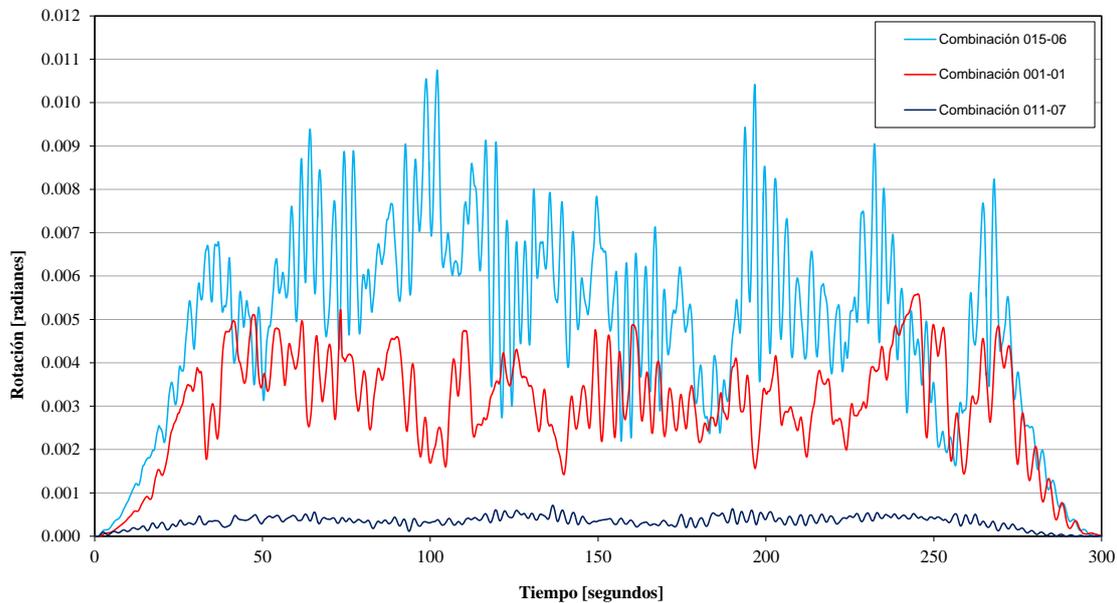


Figura 16: Giro de la base para distintas combinaciones.

6 APROXIMACIÓN DE LA RESPUESTA ESTRUCTURAL

Con el objetivo de abordar en trabajos posteriores el grado de confiabilidad de estos sistemas estructurales, se han realizado 2.500 corridas del modelo presentado, para combinaciones aleatorias de las variables principales y secundarias.

Las variables principales con sus respectivos límites (definidas en la Tabla 1) se utilizan para obtener una muestra de 250 combinaciones mediante la técnica de Diseño de Experimentos ^[10], con el fin de adquirir una cantidad suficiente de resultados para realizar la aproximación de los parámetros de respuesta aplicando Redes Neuronales ^[11].

Por otro lado, se definen variables secundarias para considerar la aleatoriedad de las propiedades mecánicas de los materiales y de la acción dinámica del viento. Se asignan curvas teóricas de distribución estadística log-normal de resistencias, con coeficientes de variación de 0,15 y 0,07 para hormigón y acero, respectivamente. Utilizando un generador de números aleatorios, se obtienen 10 sub-combinaciones de valores para resistencias nominales del hormigón y de las armaduras pasivas y activas. La acción del viento es simulada numéricamente contemplando la aleatoriedad en uno de sus parámetros de la función periódica, el ángulo de fase ^[12].

El procesamiento de las respuestas del sistema sigue el siguiente procedimiento: con cada combinación de las variables principales y las correspondientes 10 sub-combinaciones de variables secundarias, se realiza el análisis estructural del modelo con el software SAP 2000; se extrae de cada corrida los valores máximos de las respuestas; se determina para cada grupo de 10 sub-combinaciones, los valores

medios y desvíos estándares. Queda de esta manera constituida la base de datos para el entrenamiento de las Redes Neuronales, con 250 valores de respuestas máximas medias y sus desvíos, definidas en el punto 5.

Una vez colectados los datos, se define la arquitectura de red, en resumen, cantidad de neuronas en capa de entrada: una por cada variable principal más una neurona. Luego se define la cantidad de neuronas para la capa oculta o de procesamiento de datos; partiendo con un número máximo sugerido de neuronas, se determina el número óptimo de ellas como aquel que arroja menor error de resultados evaluados por mínimos cuadrados. Para completar el diseño se define la capa de salida. Los criterios adoptados en este segmento son utilizados en estudios de optimización estructural aplicados al campo de la sismología ^[11].

Al efectuar el aprendizaje estadístico, necesario para la simulación de la respuesta del sistema, se aplica un algoritmo de entrenamiento de la red. En la capa de procesamiento de datos, se ajusta la diferencia entre las respuestas del modelo y las predicciones, por medio de una función sigmoide que convierte la distribución de probabilidades de los resultados del modelo, en un lote de números que varía de 0 a 1, insertándolos luego en las ecuaciones de predicción de la red, que está afectada por coeficientes de peso. Se efectúan 5 pruebas, dividiendo la cantidad de neuronas totales de esta capa en 5 grupos. De los cuales, 4 se utilizan para ajustar los coeficientes de peso, y 1 sirve de validación de datos. En cada una de las pruebas mencionadas se determina el error generalizado, el cual se minimiza utilizando el algoritmo iterativo de retro propagación de errores ^[11].

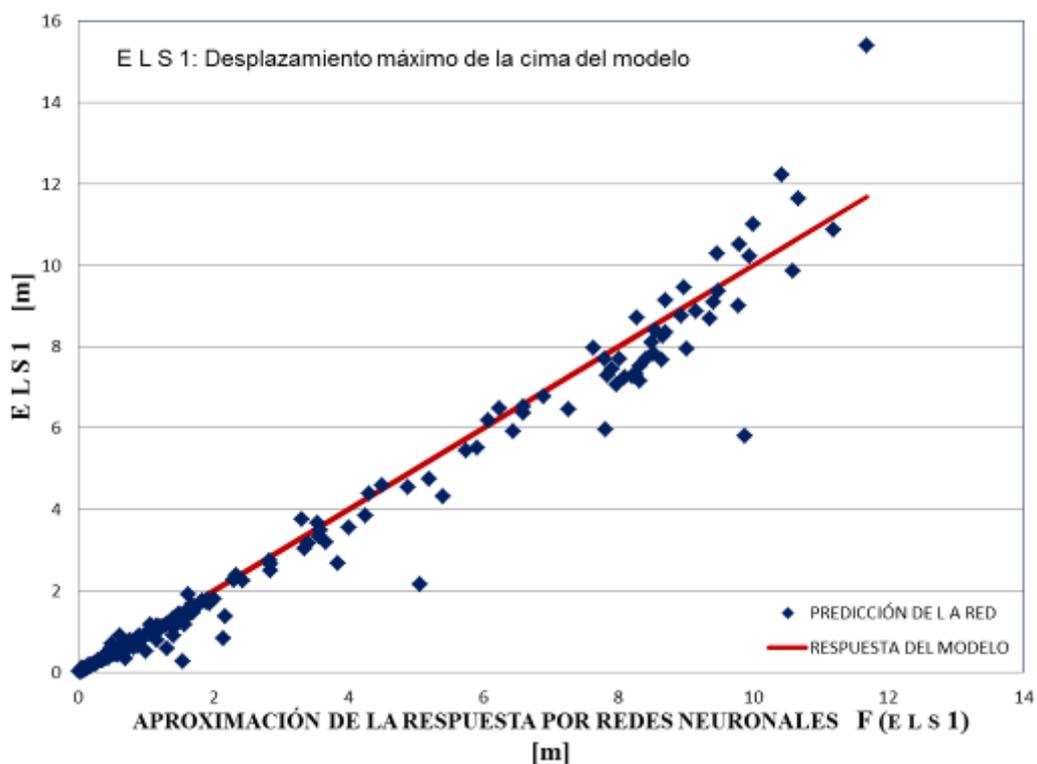


Figura 17: Relación entre respuestas del modelo y su predicción para E L S 1.

Al analizar los resultados comparados para el desplazamiento en la cima de la estructura, en las figuras 17 y 18 se aprecia que las dispersiones entre respuestas del modelo y predicciones de la red, en términos de valores medios, son menores que para los desvíos estándar, un hecho a tener en cuenta ya que ambos valores se utilizan en la aproximación de la superficie de respuesta del sistema.

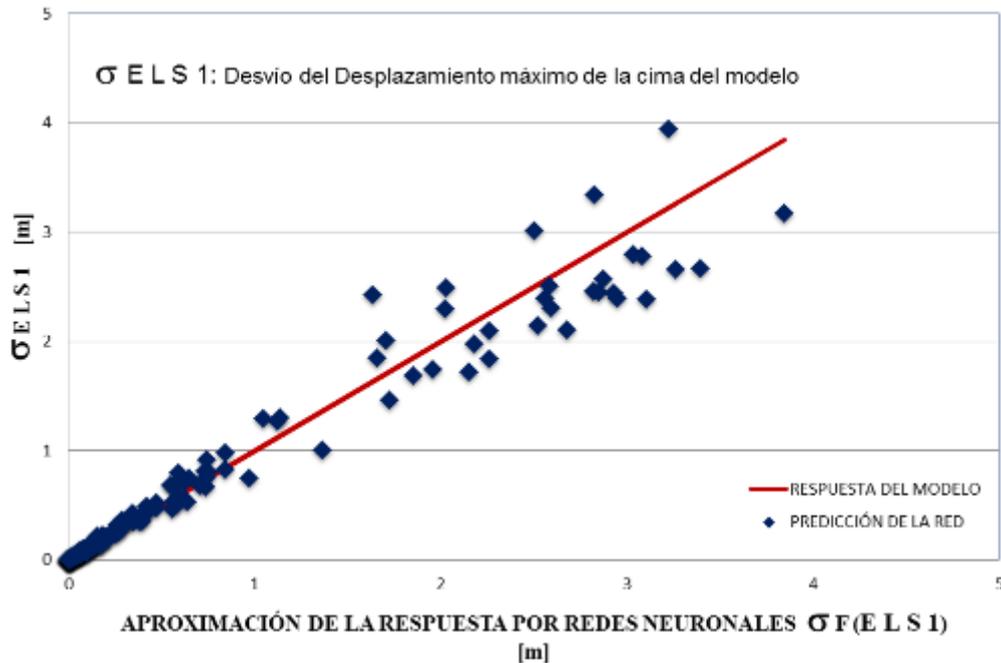


Figura 18: Relación entre desvíos del modelo y su predicción para E L S 1.

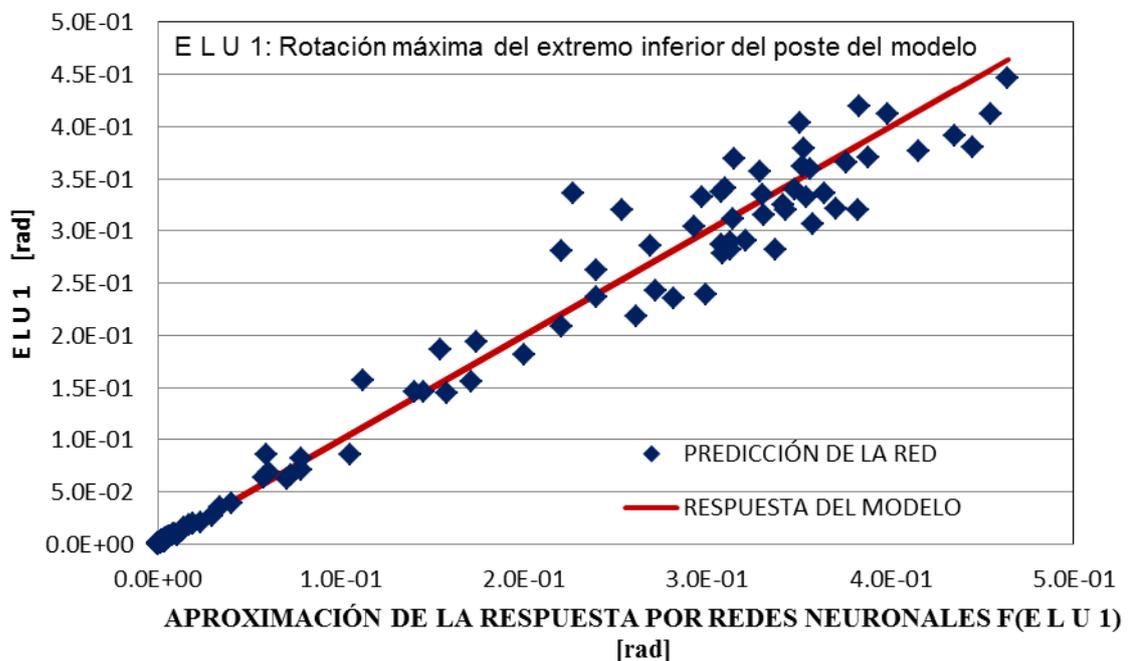


Figura 19: Relación entre respuestas del modelo y su predicción para E L U 1.

Las figuras 19 y 20, muestran esquemas comparativos de igual tenor que los anteriores, en el análisis de la rotación del extremo inferior del poste.

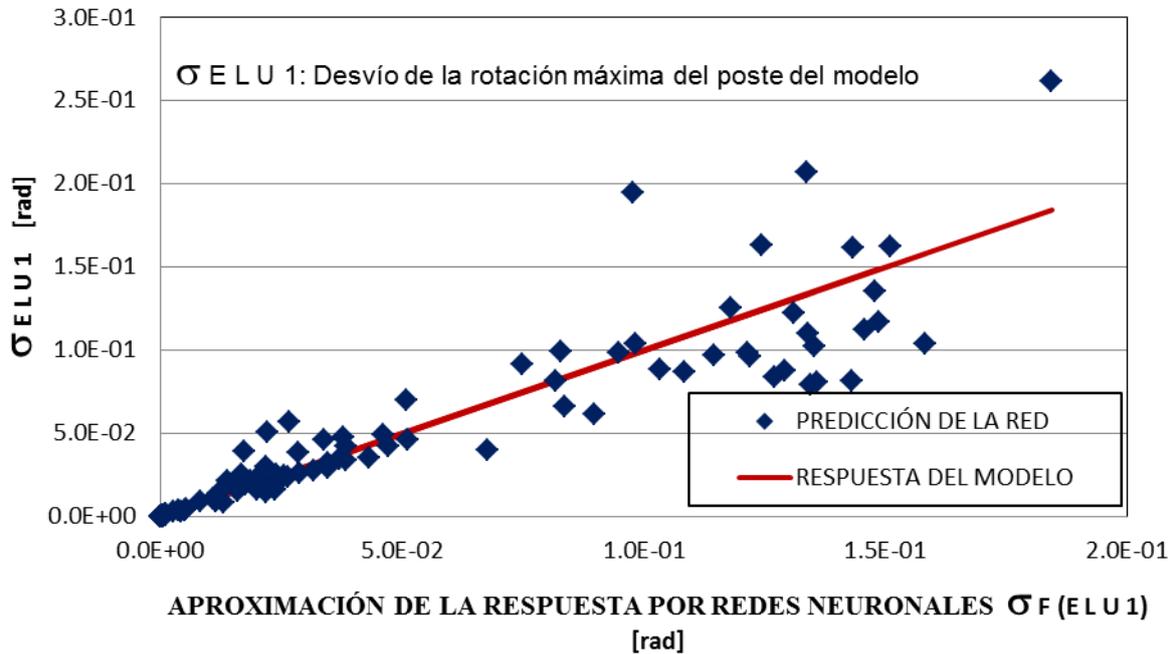


Figura 20: Relación entre desvíos del modelo y su predicción para E L U 1.

7 CONCLUSIONES

El análisis de los parámetros de respuesta individuales, muestra que los mismos son consistentes tanto para el comportamiento elástico como para las incursiones en el campo plástico, indicando que el modelo estructural propuesto es razonable. Las comparaciones cuantitativas con procedimientos de cálculo estático equivalente de reglamentos también manifiestan que el modelo digital es aceptable.

Los límites establecidos en la idealización de Caltrans son aceptables para definir fronteras entre los comportamientos de tipo elástico y plástico. De todas formas es necesario realizar la confirmación experimental de los resultados arrojados por el modelo. Así también se debe validar el comportamiento elastoplástico del suelo, recurriendo a técnicas de idéntica índole, atendiendo que el mismo es considerado como un material elástico en el modelo computacional.

La técnica de simulación del análisis estructural planteada se puede extender a otro tipo de problemas estructurales, pudiendo la misma cubrir un amplio espectro. Los conceptos y criterios utilizados para la confección del modelo computacional así lo confirman, puesto que se logra captar diferentes situaciones estructurales en un mismo modelo, las que pueden ser aplicadas a otro tipo de problemas.

Respecto a las comparaciones efectuadas entre respuesta del modelo y predicciones de la red neuronal, lo obtenido hasta aquí es el inicio de la aplicación de las técnicas de simulación estadística de una respuesta sustituta a un problema estructural. Dicha respuesta artificial se termina de elaborar con la aplicación de la ecuación (1), que resume el proceso de obtención de la superficie de respuesta sustituta.

$$R_{(x)} \approx F_{(x)} + \sigma_{(x)} * R_N \quad (1)$$

Donde $R_{(x)}$ representa la respuesta del modelo, $F_{(x)}$ es el valor medio de la respuesta de cada parámetro individual obtenido por redes neuronales, $\sigma_{(x)}$ son sus desvíos standard correspondientes, y R_N es una variable aleatoria con distribución normal standard.

8 COLABORADORES.

Docentes.

Mgster. Ing. Civil Hugo Orlando Reinert ^a

Ing. Civil Julio Aníbal Mercanti ^a

Ing. Civil Horacio Daniel Pizzutti ^a

^a *Departamento de Ingeniería civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones, Oberá, Misiones, Argentina,*

Egresados

Ing. Civil Pamela Yohana Fank.

Estudiantes

Álvaro Sebastián Benítez.

Miguel Ángel Aguirre.

REFERENCIAS

- [1] Álvarez Marín, D.A. Control estructural estocástico de puentes sometidos a vibraciones producidas por el viento usando aletas separadas. *Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia. Manizales*, 2003. Blessmann, J. *O vento na engenharia estrutural*. Editora da Universidade. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1988. Castro, H.G., De Bortoli, M.E., Wittwer, A.R.; Marighetti, J.O. Simulación numérica del campo de velocidades del viento atmosférico utilizando el método de representación espectral. *Mecánica computacional*, Vol XXVI, pp. 144-160, AMCA, 2007.
- [2] AEA 95301. *Reglamentación de líneas aéreas exteriores de media tensión y alta tensión*. Asociación Electrotécnica Argentina, Buenos Aires, 2007. NBR 6123. Forças devidas ao vento em edificações. *Associação Brasileira de Normas Técnicas*. Rio de Janeiro, 1988. Schiffrer, M., Bruschi M. G. Construcción de líneas aéreas de energía eléctrica de tensiones nominales mayores de 1 kv. *DIN VDE 0210/12.85*, 1985.
- [3] Detke F.R., Reinert H.O., Duarte J.A., Klimczuk C. M., Fank P.Y., Möller O., Modelo estructural de sistemas de transmisión de energía eléctrica en la Provincia de Misiones, Argentina, *I Jornadas Regionales de Investigación en Ingeniería - UTN FRRe*, 2010.
- [4] Mercanti, J.A., Aguirre M.A., Fank P.Y., Möller O., Acción dinámica del viento como proceso estocástico aplicado a sistemas de transmisión de energía eléctrica, *I Jornadas Regionales de Investigación en Ingeniería - UTN FRRe*, 2010.
- [5] Takeda, T., Sozen, M. and Nielsen, N. Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes, *Journal of the Structural Division, ASCE*, Vol. 96, ST12, pp. 2557-2573, 1970.
- [6] Priestley, M. N. J., Seible, F. and Calvi, G. M. *Seismic Design and Retrofit of Bridges*, tenth edition, United States of America, chapters 1, 4 y 5, 1996.
- [7] Park, R., Paulay, T. *Estructuras de concreto reforzado*, Primera Edición, México, Editorial Limusa, 1979.
- [8] Taucer F. et al. A fiber beam-column element for seismic response analysis of reinforced concrete structures, *EERC University of California, Berkeley*. 1991; Fernández Ruiz M., Evaluación no lineal de los efectos estructurales producidos por las deformaciones diferidas del hormigón y el acero. *Departamento de mecánica de medios continuos y teoría de estructuras, ETSICCP Universidad Politécnica de Madrid*. 2003.
- [9] Stone W. y Taylor A.W, "Seismic Performance of Circular Bridge Columns Designed in Accordance with AASHTO/CALTRANS Standard", *National Institute of Standard and Technology, Gaithersburg MD*, 1998.

- [10] Zhang, J. Performance-based seismic design using designed experiments and neural networks, *PhD. Thesis, Department of Civil Engineering, University of British Columbia, Canada, 2003.*
- [11] Zhang, J., Foschi, R.O. Performance-based design and seismic reliability analysis using designed experiments and neural networks. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 19, 259-267, 2004. Möller, O., Foschi, R., Rubinstein, M., Quiroz, L. “Vulnerabilidad sísmica de estructuras: una aproximación probabilística usando redes neuronales” Memorias XIX Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural, CD, 050, AIE. 2006. Möller, O., Foschi, R., Rubinstein, M., Quiroz, L. “Confiabilidad de estructuras sismoresistentes utilizando diferentes aproximaciones de la respuesta dinámica no lineal” Memorias del Séptimo Encuentro de Investigadores y Profesionales Argentinos de la Construcción VII EIPAC 2007, CD E08-01. ISBN 978-987-9381-84-7.
- [12] Mercanti, J.A., Aguirre M.A., Fank P.Y., Möller O., Acción dinámica del viento como proceso estocástico aplicado a sistemas de transmisión de energía eléctrica, *I Jornadas Regionales de Investigación en Ingeniería - UTN FRRe*, 2010.
- [13] Mohamed Al Satari and Saif Hussain., Vibration Based Wind Turbine Tower Foundation Design Utilizing Soil - Foundation -Structure Interaction. *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*. Beijing, China. October 12-17, 2008.