



UNIVERSIDAD
DE LA REPUBLICA
URUGUAY

Implementación de una formulación corrotacional en dinámica no lineal y aplicación al modelado de líneas de transmisión eléctrica

Mauricio Camilo Vanzulli Pena

Programa de Posgrado en Ingeniería Estructural
Instituto de Estructuras y Transporte
Universidad de la República

Montevideo – Uruguay

Marzo de 2021

1 Tabla de contenidos

2	1 Resultados numéricos	1
3	1.1 Vigas en voladizo con ángulo recto	1
4	1.2 Modelo simplificado de una linea	7
5	1.3 Sistema de transmisión eléctrica	13
6	2 Conclusiones	21
7	2.1 Conclusiones técnicas	21
8	2.1.1 Sobre el fenómeno	21
9	2.1.2 Sobre los resultados	22
10	2.2 Conclusiones de formación	23
11	2.3 Limitaciones	23
12	2.4 Trabajos a futuro	23

Capítulo 1

Resultados numéricos

1 En este capítulo se presentan los resultados numéricos obtenidos durante el
2 desarrollo de este trabajo. En primera instancia, se valida la implementación
3 corrotacional detallada en ??, para luego aplicarse a modelos específicos de
4 conductores. Todas las simulaciones fueron realizadas utilizando un compu-
5 tador portátil con un procesador i7 6700HQ y una memoria ram de 8 Gb. La
6 formulación se implementó en el software de código abierto ONSAS ¹ el cual
7 se ejecutó en GNU-Octave **Octave** visualizándose los resultados haciendo
8 uso de la herramienta Paraview **squillacote2007paraview**. Vale notar que
9 el hilo conductual de este capítulo fue ideado con un aumento progresivo de
10 complejidad. Capturando en modelos simples y académicos los movimientos
11 fundamentales de los elementos, para garantizar así una representación cabal
12 del fenómeno de oscilación del conductor en servicio.

13 1.1. Vigas en voladizo con ángulo recto

14 Este ejemplo fue publicado por primera vez en **simo1988dynamics** y es
15 usualmente considerado en la literatura para validar formulaciones de elemen-
16 tos de viga tridimensionales aplicadas a estructuras no lineales (**albino2018co**
17 **Le2014**). El mismo consta de dos barra idénticas en ángulo recto formando
18 una forma de L. Cada miembro que la integra, mide un largo $L = 10$ m tal y
19 como se ilustra en las Figuras 1.1.

20 Las propiedades del rigideces de torsión, flexión y directa del ejemplo se se-
21 leccionaron de manera sintética por el autor original. Estos valores artificiales,

¹<https://github.com/ONSAS/ONSAS/>

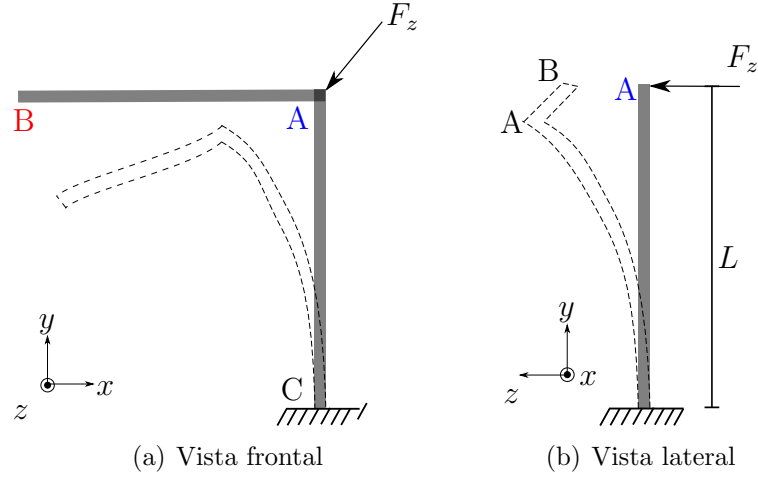


Figura 1.1: Disposición geométrica de la estructura.

1 garantizan movimientos de gran amplitud y para esto deben cumplir determi-
2 nadas igualdades Por esta razón la elección de dichas magnitudes se obtiene
3 resolviendo el sistema compatible indeterminado de Las Ecuaciones (1.1) y
4 (1.2) descritas en la bibliografía. Para este trabajo los segundos momentos de
5 inercia según el eje z e y además de los valores del módulo de elasticidad lineal
6 y transversal valen: $E = G = 10^6$ $A = 1$ $I = J = 10^{-3}$ y $\nu = 0.3$. Se hace notar
7 que el carácter arbitrario de los parámetros implica que sus unidades carezcan
8 de sentido.

$$GA = EA = 10^6 \quad (1.1)$$

$$GJ = EI = 10^3 \quad (1.2)$$

9 La estructura se encuentra empotrada en su base imponiendo desplaza-
10 mientos y ángulos nulos en el nodo C. Este apoyo ejerce reacciones que per-
11 miten aplicar una fuerza en el sentido del eje z tal y como se muestra en la
12 Figura 1.2. Este forzante flecta y trosiona al sistema en un plano saliente al xy ,
13 produciendo oscilaciones de gran amplitud. En la expresión anterior el adjetivo
14 gran, hace alusión a que los movimientos desarrollados durante el movimiento,
15 son del mismo orden de magnitud que las dimensiones de la estructura. Estos
16 desplazamientos significativos, están ligados al perfil brusco de aplicación de la
17 carga. Esta fuerza actúa linealmente en los dos segundos iniciales, crece hasta
18 un valor máximo de 50 N en el primer segundo de simulación y luego decrece

1 hasta cero. Imponiendo en el perfil un impacto severo y gradual en un corto
2 intervalo de tiempo. Para reproducir este comportamiento altamente dinámico
3 se eligieron 10 elementos por miembro y un incremento de tiempo $\Delta T = 0.25$
4 s.

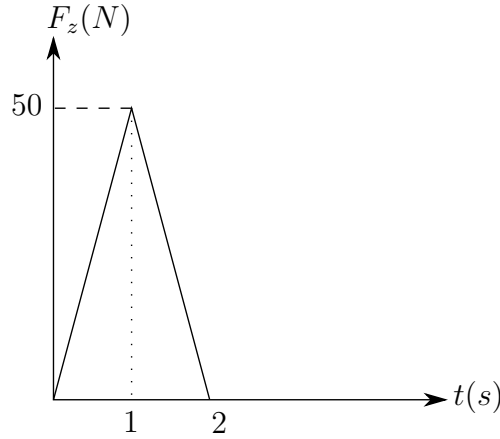


Figura 1.2: Perfil de fuerza transversal en el nodo A.

5 El objetivo principal del ejemplo es el validar la librería de códigos corro-
6 tacional incorporados en el software ONSAS ¹, por ende, tanto el método de
7 resolución, como los parámetros, se ajustaron idénticos a los explicitados en
8 el artículo **Le2014**, comparando así resultados semejantes. Consecuentemente
9 se implementó un algoritmo que lleva el nombre de sus creadores (HHT) y
10 se selecciono un valor característico $\alpha = -0.05$ y un valor de parada en des-
11 plazamientos de 10^{-7} m. Se fraccionaron 20 s de simulación en intervalos de
12 $\Delta T = 0.25$ s.

13 Para comparar con el paper de referencia se plasmaron gráficamente de-
14 terminados grados de libertad correspondientes al nodo A. Estos son: el des-
15 plazamiento lineal vertical (según el eje y) y el transversales (según z). Los
16 resultados extraídos del modelo se muestran en las Figuras ?? y ?? en fun-
17 ción de la variable temporal. En estas se constata efectivamente la significativa
18 magnitud de los desplazamientos en comparación con las dimensiones de la es-
19 tructura. En particular, la Figura ?? denota oscilaciones que alcanzan varios
20 metros en menos de 30 segundos, esto muestra el carácter exigente en térmi-
21 nos dinámicos del ejemplo. Con respecto a este movimiento no armónico de
22 vaivén en el eje z , se puede notar la presencia no conservativa de la formulación

¹<https://github.com/ONSAS/ONSAS/>

1 corrotacional, ya que las amplitudes prestan una tendencia atenuante con el
2 tiempo.

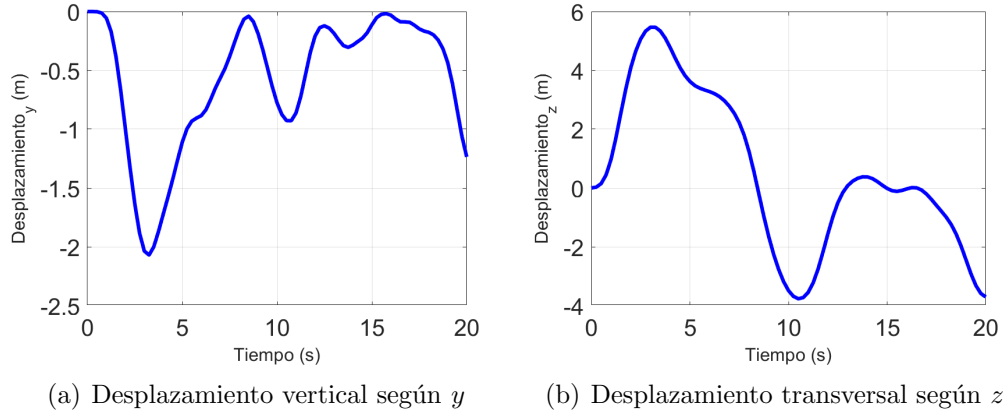


Figura 1.3: Desplazamientos de control del nodo A

3 Por otra parte al analizar en la Figura ?? se observa que los desplazamientos
4 en y , son menores a cero para todo instante, esto se vincula al sentido de la
5 fuerza aplicada. Al observar la estructura desde un plano yz con el versor x
6 saliente, el movimiento del nodo A es análogo al de una viga empotrada con
7 una fuerza cortante en su extremo. De esta manera, el desplazamiento de A es
8 siempre en el sentido de $-y$, lo que se refleja en La Figura ?? y se condice con
9 la respuesta esperada. Contrastando los resultados de la implementación con
10 los presentados en la bibliografía de referencia **Le2014**, observamos similares
11 valores de máximos y mínimos alcanzados durante el movimiento respecto
12 a las Figuras 1.3 y 1.4. También así los valles y las crestas de la curvas se
13 suceden en tiempos muy próximos. Congruentemente, es posible afirmar que
14 el software implementado reproduce correctamente el ejemplo y es capaz de
15 capturar movimientos de flexo-torsión cabalmente.

16 Resulta oportuno analizar los movimientos en el nodo B. En la Figura ??
17 se muestra una oscilación de 16 metros de amplitud aproximadamente, y una
18 forma que se asemeja a una senoide. Esto podría vincularse al modo flector en
19 el plano xz de la barra A-B excitado por la fuerza externa en la dirección z . Una
20 vez retirada la carga se manifiestan los modos torsionales de AC superpuestos
21 con los flexionales de A-B C-B incidiendo en el movimiento. El autor del trabajo
22 **Le2014** publicó el desplazamiento en z de B y los resultados de este trabajo
23 ajustan con exactitud a dicha curva. Complementando este análisis podemos
24 comparar los desplazamientos de los nodos A y B concluyendo que los movimientos

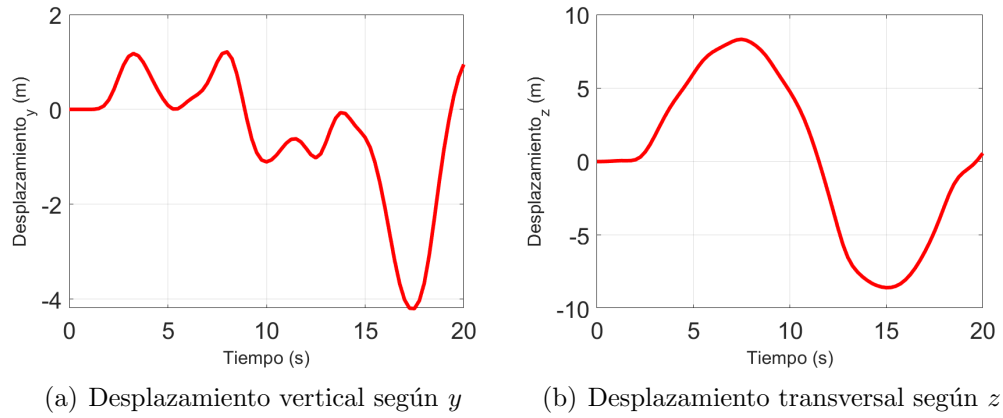


Figura 1.4: Desplazamientos de control del nodo B

1 inerciales de la barra A-B afectan notoriamente a los desplazamientos del nodo
 2 B respecto de A, tanto en frecuencia como en magnitud.

3 Para ilustrar al lector en la cinemática del movimiento, se visualizaron me-
 4 diante el software *Paraview* las deformadas para diferentes instantes de tiempo:
 5 $t_1 = 4$ s, $t_2 = 11$ s y $t_3 = 19$ s. En la Figura 1.5 se observan las oscilaciones
 6 flexionales para distintos planos yx e yz . Estos movimientos son originados por
 7 diferentes razones, en la barra CA se asocia al forzante F_z mientras que en el
 8 miembro AB son generados por los vínculos cinemáticos e inerciales debido a
 9 su unión rígida con el resto de la estructura.

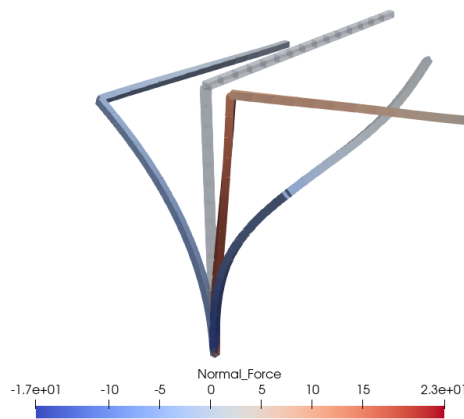


Figura 1.5: Estructura deformada en los instantes 4 s, 11 s y 21 s

10 Habiéndose ahondado en las variables cinemáticas, resta por analizar las
 11 magnitudes dinámicas. Para esto se colorearon los esfuerzos normales inma-

1 nentes a cada elemento en La Figura 1.5. En esta se identifica que el esfuerzo
 2 alcanza valores de compresión y tracción en similar magnitud presentando
 3 considerables fluctuaciones temporales. En simultaneo, la viga horizontal A-B
 4 desarrolla fuerzas normales en todo su largo. Se suceden tanto positivas como
 5 negativas, es oportuno notar que un modelo lineal para pequeños despla-
 6 zamientos concluiría que los esfuerzos en esa viga serían nulos. Además este
 7 modelo lineal arrojaría desplazamientos triviales en x para ambos nodos, in-
 8 duciéndose significativos errores para este tipo de cargas de alto impacto en
 9 estructuras de exigua rigidez. El modelo implementado desarrolla magnitudes
 10 no despreciables de desplazamientos en x tal y como se constata en las Figu-
 11 ras 1.6. He aquí las principales diferencias y la importancia de implementar
 12 un modelo considerando no linealidad geométricas, estas consideraciones son
 13 esenciales para la aplicación principal de este trabajo.

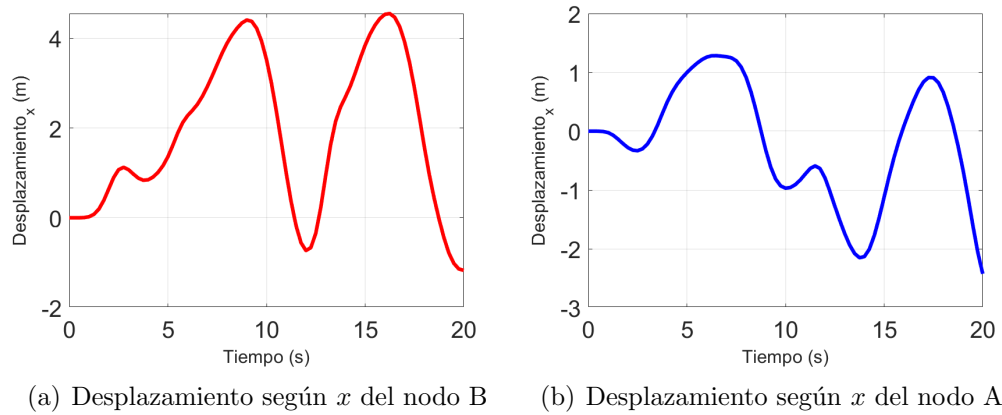


Figura 1.6: Desplazamientos en x de los nodos A y B

1.2. Modelo simplificado de una linea

En este apartado se presenta un primer modelo simplificado del enfoque central de esta tesis. El mismo fue contrastado con el trabajo de **foti2018finite** mas ha sido abordado por destacados investigadores en el pasado, como ser el caso de: **luongo1998non** y **martinelli2001numerical**. El ejemplo consiste en un conductor de transmisión eléctrica reforzado con núcleo de acero. La raíz de acero forjado tiene como propósito aportar rigidez mecánica al componente, disminuyendo la deflexión y flexibilidad del conjunto. Esto suele ser ventajoso para largos vanos donde la rigidez del conductor es una variable decisiva. Además su construcción no afecta significativamente la resistividad eléctrica debido al efecto de reluctancia radial variable. que obliga a la corriente a fluir principalmente en la superficie.

El modelo del conductor esta estandarizado bajo la norma IEC europea **IEC6081** y se identifica con la nomenclatura DRAKE ASCR 7/26. Esto hace referencia a la cantidad de cables en el núcleo y en la periferia respectivamente. El diámetro se calcula entonces como la composición del área de los 26 conductores hechos de aluminio (color gris en la Figura 1.7) y los 7 de acero (color azul). Además asumiremos despreciables, sobre las propiedades del flujo y la geometría, las irregularidades de su perfil en la silueta.

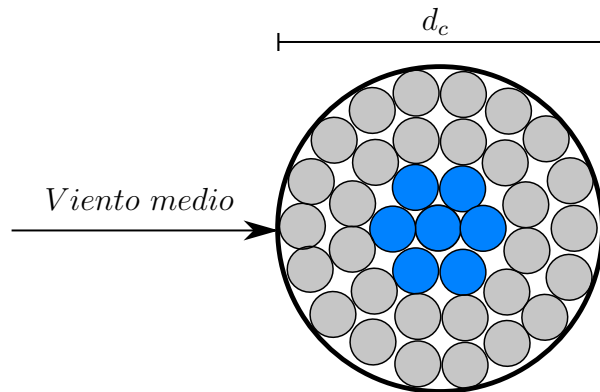


Figura 1.7: Esquema del conductor ASCR 7/26.

El vano tiene un largo $L_c=267$ m mientras que el cable en su configuración deformada mide 269 m. Esta diferencia de longitudes del conductor en su eje axial, responde a un tensado que se realiza durante su instalación. En la etapa de montaje del conductor, se ajusta la pre-tensión de manera tal que la altura ratifique los requerimientos de seguridad según la urbanización, contaminación

1 magnética y tipografía del terreno. Para esta simulación no se tendrá en cuenta
2 la tensión previa al momento de la colocación pero si la tensión debida a la
3 carga del peso. Vale notar que el valor de los esfuerzos generados durante la
4 instalación es menor a un 2 % respecto a los esfuerzos axiales desarrollados
5 durante su movimiento.

6 El material que constituye al cable tiene un módulo de elasticidad E , módu-
7 lo de poisson ν , una densidad similar ρ y una rigidez flexional y torsional EI
8 y GJ respectivamente. Estas propiedades descritas se obtuvieron de la norma
9 *ISO:9001* y se presentan en La Tabla ??.

$d_c(\text{cm})$	$m(\text{kg/m})$	$EA \text{ kN}$	$EI \text{ N m}^2$	$GJ \text{ Nm}^2$
2.81	1.8	29700	2100	159

Tabla 1.1: Propiedades mecánicas del conductor DRAKE ASCR 7/26

10 Con el propósito de aproximarse a la configuración del conductor dispuesto
11 en un sistema de transmisión eléctrica real, se introdujeron al ejemplo dos ca-
12 denas aisladoras en posición vertical, de un largo $L_a = 3 \text{ m}$ cada una de ellas.
13 Estos elementos no reciben fuerza y no se estudiará el desplazamiento ni es-
14 fuerzos en los mismos. Esto se aseguró en las condiciones de borde impuestas,
15 para el modelo se consideró una condición de desplazamiento y ángulo nulo en
16 las tres direcciones en x , z e y en los puntos B y C. Dado esto, las cadenas solo
17 toman un rol ilustrativo gráfico y las restricciones de borde representan correc-
18 tamente las presentadas por **foti2018finite**, donde los extremos se encuentran
19 sujetos. Habiendo detallado someramente los componentes que integran al
20 ejemplo se presenta un esquema de la geometría en la Figura 1.8.

21 Existen una diferencias sustancial respecto al ejemplos originales postula-
22 dos por **luongo1998non** y **martinelli2001numerical**, en donde se resolvió
23 mediante elementos de barra trinodal y de viga corrtacional respectivamente.
24 Para amibos trabajos se consideraron efectos de turbulencia generadas arti-
25 ficialmente mediante procesos estocásticos, mientras que para este estudio se
26 despreciaran las componentes fluctuantes, teniendo en cuenta el mismo flu-
27 jo medio W en la coordenada axial del conductor. Este perfil es parabólico
28 y alcanza la velocidad media máxima W_{max} en 20 segundos. Este valor de
29 velocidad se calculó según **euroCode** considerando un flujo tipo capa límite
30 atmosférica con las propiedades indicadas en La Tabla ?? asociadas a un tipo
31 de terreno sub-urbano o industrial.

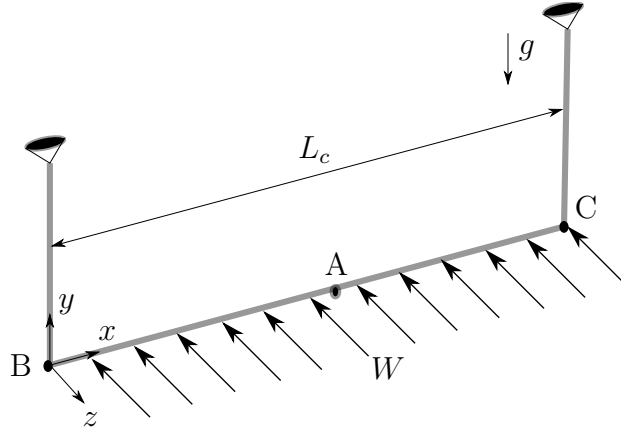


Figura 1.8: Esquema ilustrativo del ejemplo de un conductor simplificado.

k_r	z_0	z_{min}
0.22	0.3 m	8 m

Tabla 1.2: Parámetros del flujo tipo capa límite atmosférica para W_{max}

La simulación consta de dos etapas, primeramente se aplica la fuerza gravitatoria según el eje $-z$ tal cual se muestra en la Figura 1.8. No se muestran los resultados de esta etapa debido a que carecen de relevancia y en el trabajo de referencia se toma la catenaria como condición inicial. La fuerza peso es relevante desde un punto de vista dinámico pues mitiga posibles inestabilidades cuando las normales de los elementos son próximas a cero. Una vez estabilizada la respuesta del sistema por el amortiguamiento interno, se aplica una fuerza lineal de media positiva según el eje $-z$ desde cero hasta W_{max} . Esta forma del perfil podría emular el aumento modulado de un presiones en un túnel de viento entre las bocas de entrada y descarga. La forma se muestra en La Figura 1.9.

Para este estudio no se considerará la fuerza perpendicular al sentido de flujo: lift. Esta es despreciada por diferentes autores (lee1992nonlinear) (Foti2016) (Papailiou1997) principalmente porque la razón de fuerzas en las componentes perpendiculares a los flujos esta relacionada posibles asimetrías tangenciales en el perfil. Para conductores sin formaciones de hielo en su superficie, la circulación del campo de velocidades relativo circundante es próxima a cero, lo que se traduce en una fuerza de lift nula. Esta es la principal di-

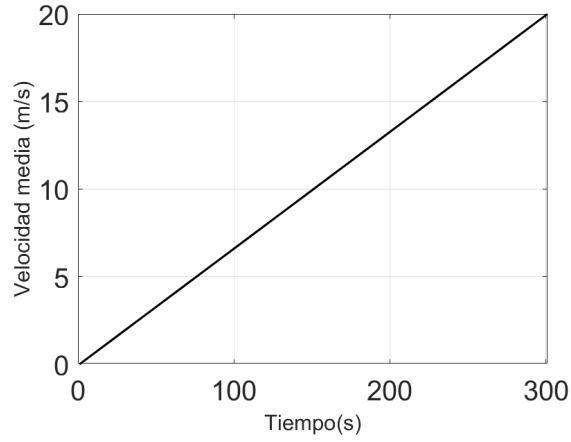


Figura 1.9: Perfil de velocidad progresiva z .

1 referencia de este caso en comparación por lo propuesto en la literatura fuente
 2 (**luongo1984planar**) y (**foti2018finite**) donde si son considerados perfiles
 3 con formaciones de hielo.

4 El perfil de velocidades en la Figura 1.9 genera fuerzas sobre la estructura.
 5 La orientación del cable es tal que el flujo en todo punto es transversal a el.
 6 Los valores de $C_d = 1.5$ se extrajeron la referencia (**foti2018finite**). Se aclara
 7 que el angulo de ataque varía durante la trayectoria del cable, no obstante el
 8 coeficiente C_d permanece constate debido a la simetría de revolución del perfil.
 9 Se gráfica entonces las fuerzas sobre cada nodo del conductor en La Figura
 10 1.10.

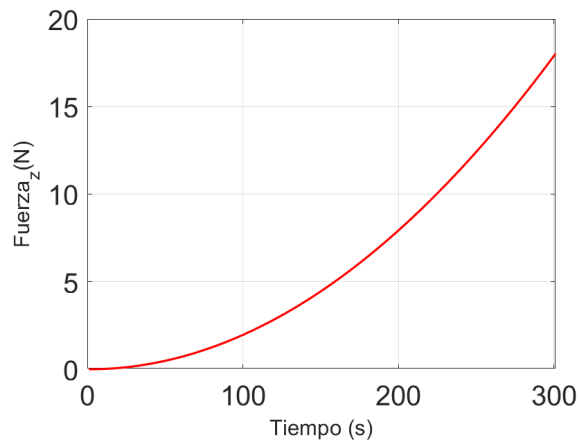


Figura 1.10: Perfil de fuerza nodal según el eje z .

11 A continuación se exponen los desplazamientos verticales y horizontales del
 12 nodo A. En estos se observa un comportamiento inercial y una relación entre el

1 perfil de fuerza y desplazamientos. Esta homología entre los perfiles de ambas
2 magnitudes es explicable mediante un análisis de Fourier del sistema. Haciendo
3 referencia a la función de transferencia que relaciona a ambas variables, la
4 misma produce unicamente en desfazaje en estado estacionario. Como la curva
5 de carga es de manera gradual y no presenta exabruptos en el tiempo, podemos
6 suponer que la respuesta es cuasi-estática. Se presentan entonces en las Figuras
7 1.11 los desplazamientos en vertical y transversal respectivamente del nodo A
8 situado en el punto medio del vano.

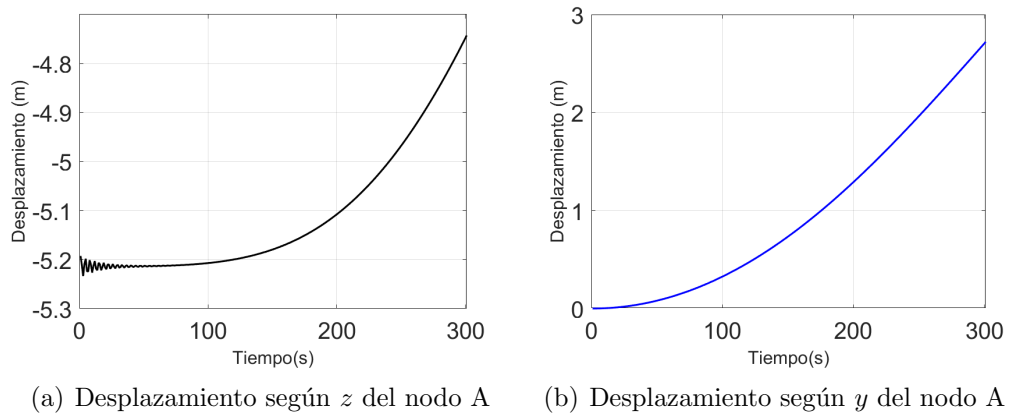


Figura 1.11: Desplazamientos del nodo A

9 Con el objetivo de contrastar los resultados tomando como referencia la
10 literatura fuente (**foti2018finite**), se capturo el ángulo de balanceo del punto
11 A para todo tiempo. Esta variable se halla mediante la función tangente que
12 vincula el ángulo respecto da la deformada en el eje x con los desplazamiento
13 en z e y . Para ilustrar al lector se realizó el esquema mostrado en la Figura
14 1.12 del ángulo Φ en cuestión.

15 Se graficaron las trayectorias del ángulo para diferentes valores de velocidad
16 media de viento, generando así una curva carga desplazamiento aerodinámica.
17 Es posible notar que la forma de la Figura 1.12 describe un perfil semejante
18 al de que desarrollan tanto la fuerza, como los desplazamientos en las Figuras
19 1.11 y 1.10. Esta similitud se fundamenta en que la velocidad es lineal con el
20 tiempo y por tanto, su escala es proporcional a la temporal. Por otra parte,
21 en comparación con los resultados presentados por **foti2018finite** se observan
22 valores similares de ángulo para las diferentes velocidades. Asimismo la for-
23 ma del perfil es idéntica para todo el dominio temporal. Sin embargo, el valor
24 máximo de ángulo alcanzado en este modelo es mayor comparativamente, lo

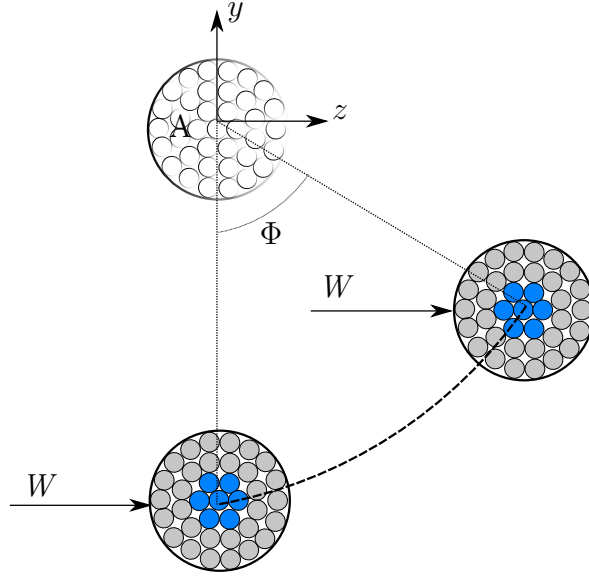


Figura 1.12: Esquema ilustrativo del ejemplo de un conductor simplificado.

que se puede atribuir al menos a dos factores. En primera instancia la turbulencia introducida en la bibliografía atenúa los desplazamientos debido a que las fluctuaciones axiales en el perfil de viento, se ejercen fuerzas desincronizadas a lo largo del vano mientras que en este modelo las fuerzas se acompasan produciendo mayores amplitudes. El segundo factor se vincula a la presencia del lift y la variación del ángulo de ataque con el ángulo. Como en la referencia **foti2018finite** se toman en cuenta un perfil con formaciones de hielo, y por tanto sin simetría de revolución, las fuerzas generadas afectan de diferente forma al conductor de estudio produciendo resultados discordantes.

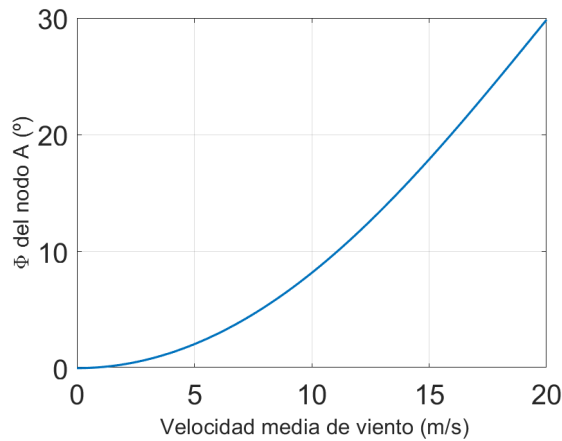


Figura 1.13: Ángulo de balanceo Φ en función de la velocidad media $W(t)$.

1 El ejemplo permite conjeturar que la respuesta numéricas del modelo re-
 2 presentan de manera acorde y aceptable las dinámicas del fenómeno para con-
 3 ductores de transmisión eléctrica bajo ciertas hipótesis. Dada la semejada en los
 4 resultados arrojados por la formulación, respecto a la bibliografía estudiada,
 5 es posible aventurarse a la aplicación de casos más complejos.

6 1.3. Sistema de transmisión eléctrica

7 Este apartado ataca el objetivo central de este trabajo: modelar sistemas
 8 de transmisión eléctricas afectados por vientos extremos no sinópticos, en par-
 9 ticular, tormentas conectivas. Las estructuras de suministro en alta tensión
 10 constan de un tendido eléctrico anclado mediante torres, las que sostienen el
 11 conductor garantizando un traslado de la corriente de manera segura y con-
 12 fiable. El dominio del ejemplo consta de tres torres equiespaciadas colocadas
 13 consecutivamente y dos vanos de idéntico largo $D_v = 206.5 \text{ m}$ tal cual se índi-
 14 ca el Esquema 1.14. Para el conductor de control se etiquetan los puntos de
 15 fijación A y D a la torre 1 y 2 respectivamente. También, se identifican los
 16 nodos en el punto medio del primer y segundo vano con los literales C y B
 17 respectivamente. Con el objetivo de representar una geometría real de una
 18 línea de alta tensión y no aborrecer al lector con descripciones de propiedades,
 19 los conductores de la simulación se corresponden con el Ejemplo 1.2 y cuyas
 20 propiedades mecánicas se explicitan en la Tabla ??.

21 En Uruguay los tendidos eléctricos de alta tensión son aquellos que trans-
 22 portan un voltaje mayor a 72.5 kV . Este valor de tensión es eminentemente
 23 peligroso y para asegurar que la torre se encuentre aterrada se utilizan elemen-
 24 tos aisladores. Estas cadenas aisladoras tradicionalmente de vidrio y cerámicas
 25 han ido mutando a poliméricas con un núcleo sólido, aumentando así su tena-
 26 cidad y flexibilidad. Según la normativa Norma IEC 60815, para alta tensión,
 27 deben medir un largo de 10 in. Para el modelo las cadenas se modelaron co-
 28 mo barras de Green, debido a su exigua rigidez a flexión y su articulación de
 29 anclaje en ambos extremos. Además se consideró un modulo de elasticidad
 30 aproximado $E = 70 \text{ GPa}$ según los estudios experimentales realizados por la
 31 referencia **TesisMexicano**.

32 Al igual que los aisladores, las barras de la estructura metálica se modelaron
 33 con elementos de tipo green, con una ley materialsaint venant kirchhoff con
 34 $E = 300 \text{ GPa}$ y $\nu = 0.3$. Estos valores se corresponden con un acero ASTM

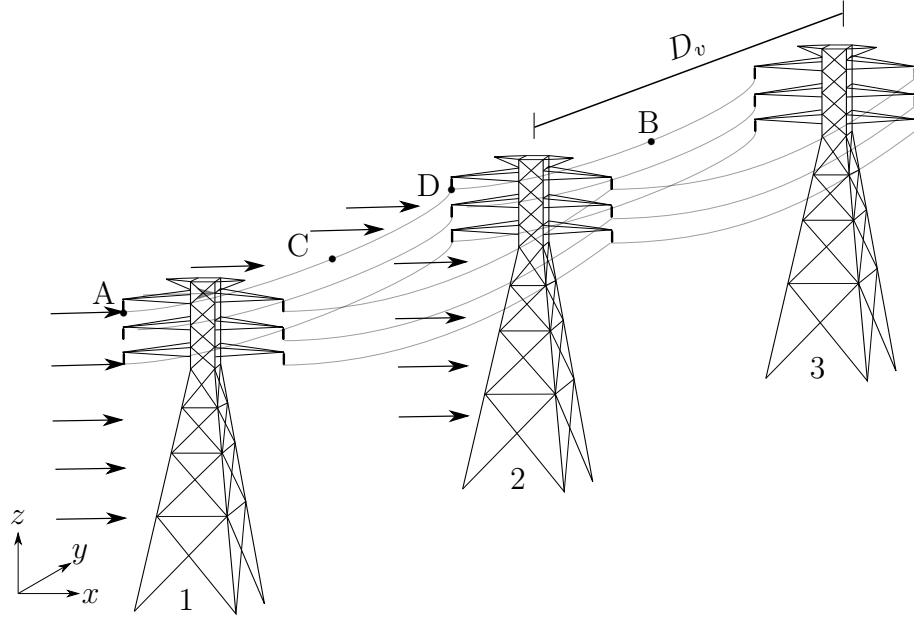


Figura 1.14: Ilustración de desplazamientos y ángulos de balanceo.

1 A 572 laminado en caliente, usual en este tipo de estructuras, junto al A36 y
2 ASTM ^o65. Estas torres tienen una altura máxima de 44 m y un ancho entre
3 los opuestos de la cercha 14.8 m. Además son capaces de sostener 6 líneas,
4 estas se corresponden a cada altura, con cada una de las fases eléctricas. Las
5 líneas se encuentran colocadas a tres cotas distintas $L_1 = 31.75$ m, $L_2 = 26.03$
6 m, $L_3 = 39.76$ m, tal y como se muestra en 1.15.

7 La simulación consta de dos etapas, primeramente partiendo de la confi-
8 guración solución al problema estático del peso propio, se aplica la gravedad
9 según el eje $-z$ tal cual se muestra en la Figura 1.15. Nuevamente, al igual que
10 en el Ejemplo 1.2 , esto suprime posibles inestabilidades cuando las tensiones
11 son próximas a cero. Esta etapa tomó 100 segundos y es estabilizada por el
12 amortiguamiento aerodinámico en desplazamientos. Este se calculó como una
13 aproximación a partir de la literatura **matheson1981simulation** promedian-
14 do la velocidad media de viento, resultando $c = \rho_a C_d d c l_{elem} \bar{v} = 0.15$ Ns/m.

15 Posteriormente se aplica una fuerza correspondiente a un perfil de tormen-
16 ta convectiva capturado en la referencia **Stengel2017a**, positiva según el eje
17 x . No se tienen en cuenta fluctuaciones espaciales en la coordenada axial del
18 cable, asociada a una función de coherencia de correlación espacial debida
19 a la turbulencia. Es menester destacar que la tormenta convectiva se aplicó
20 únicamente al vano que sitúa entre la torre 1 y 2, con el objetivo de extraer

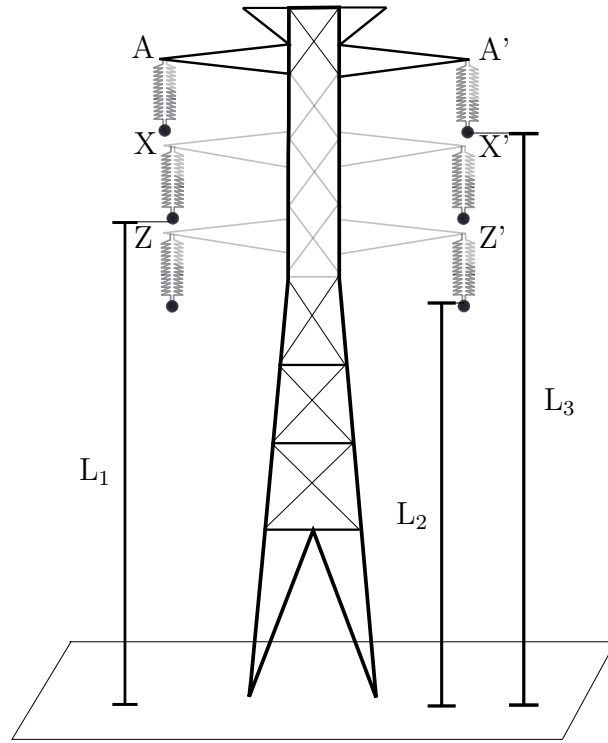
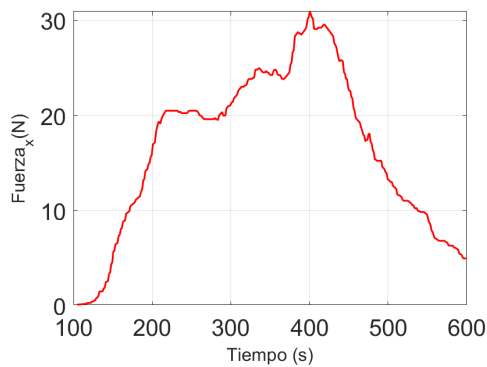
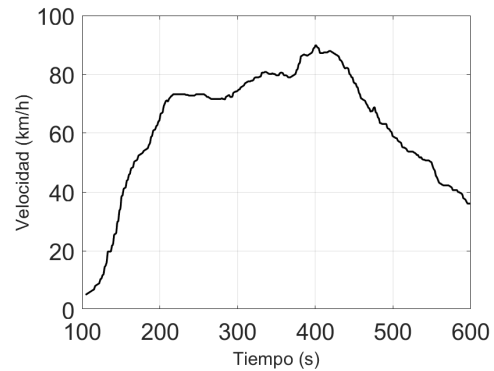


Figura 1.15: Esquema geométrico de cotas principales en la torre.

1 resultados respecto al comportamiento flexional en el plano yz , lo que se evi-
2 denciará a continuación en disímil desarrollo de las trayectorias entre los nodos
3 A, C, D y B. La aplicación de la tormenta en una fracción del dominio se basa
4 en que estos fenómenos tienen dimensiones espaciales del orden de 40 metros
5 a 40 kilómetros **fujita1985downburst**, consecuentemente es factible que la
6 tormenta afecte a una fracción del tendido. Se muestra continuación en las
7 Figuras ?? los valores de fuerza y velocidad aplicados en la coordenada x entre
8 los nodos A y D para cada instante.



(a) Carga aplicada sobre los nodos.



(b) Perfil de velocidades de viento.

1 Las tormentas severas generan corrientes descendentes donde las veloci-
2 des aumentan vertiginosamente en pequeños intervalos de tiempo, alcanzando
3 umbrales de hasta 270 km/h **fujita1985downburst**. Para este modelo, el
4 perfil representado es menor tenor, mas no el aumento súbito del fenómeno.
5 La velocidad se eleva del valor nulo a 80 km/h en menos de 3 minutos, tal
6 y como se observa en la Figura ?? . Debido al impacto de del viento sobre el
7 conductor se generan fuerzas, estas se calcularon con los valores de coeficiente
8 drag y fórmula detalladas en el Ejemplo 1.2 anterior extraídos de la referencia
9 **Foti2016**.

10 Ya se ha resaltado en retiradas ocasiones los posibles daños severos que
11 puede ocasionar un excesivo balanceo del conductor. Volores desmedidos de
12 esta variable deben controlarse en todos los aisladores rotulados en el Esque-
13 ma 1.15. Consecuentemente, se compararon cuantitativamente las oscilaciones
14 entre fases (A-A', X-X', Z-Z'), no apreciándose sensibles diferencias, tanto en
15 desplazamientos lineales como angulares. Por otra parte, no existen aprecia-
16 bles variaciones a ambos lados del plano transversal de simetría (entre A-A').
17 Esto se explica debido a la distribución espejada de la geometría y el hecho
18 de omitir las variaciones en el flujo de aire aguas abajo del cable que recibe
19 antes el impacto del flujo. Aclarados los aspectos mencionados, y considerando
20 que los desplazamientos de la torre aumentan con la cota, se eligió el nodo A
21 como variable de control. Para este nodo se registraron su desplazamiento en
22 los ejes x y z como también el ángulo de oscilación Φ tal y cual se observa en
23 la Figura 1.16.

24 El modelado numérico del ejemplo se realizó considerando 200 elementos
25 de viga corrotacional por conductor, utilizando un paso temporal de $\Delta T = 0.5$
26 s y un algoritmo de resolución numérica HHT con un parámetro característico
27 $\alpha = -0.05$, luego de un arduo y tedioso procedimiento iterativo de ajuste de
28 parámetros se realizaron las simulaciones en un período 30 hs aproximado con
29 tolerancias en desplazamientos y en fuerzas residuales de 10^{-5} m y 10^{-5} N
30 respectivamente.

31 A continuación se figuran los desplazamientos verticales y horizontales de
32 los extremo libre de las cadenas aisladoras, nominadas con las letras A, D. En
33 estos se observa un comportamiento inercial y una relación entre el perfil de
34 fuerza y desplazamientos. Este comportamiento homólogo entre ambas magni-
35 tudes externas, responden a un argumento basado en el análisis en frecuencia
36 del sistema, donde la función de transferencia desfasa a ambas magnitudes en

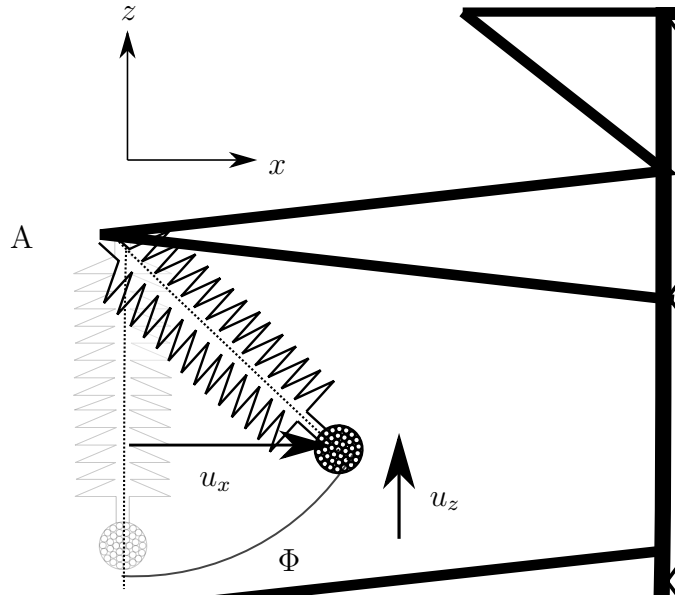


Figura 1.16: Ilustración de magnitudes de balanceo.

1 estado estacionario. En ?? y ?? se observan los desplazamientos en vertical y
2 transversal respectivamente. En ambas figuras es posible notar que debido a
3 la intensidad del viento sobre los conductores entre la torre 1 y 2, el nodo A
4 desarrolla un movimiento de mayor amplitud. No obstante, cabe destacar el
5 carácter sintético de las condiciones de borde para el nodo ya que el modelo
6 no representa los cargas inerciales de los vanos contiguos a este.

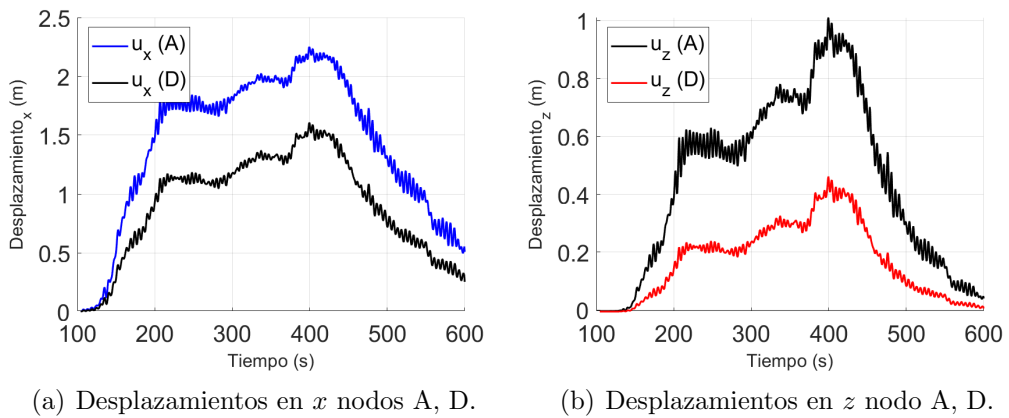


Figura 1.17: Desplazamientos de las cadenas aisladoras A y D

7 Además de los elementos aisladores, los puntos medios en el vano del con-
8 ductor también despliegan grandes desplazamientos, este fenómeno resulta
9 indeseable debido a múltiples factores, entre ellos: las restricciones de segu-

1 ridad sobre movimientos máximos, las inductancias magnéticas que puedan
2 generar voltajes peligrosos a objetos paramagnéticos circundantes, y la proxi-
3 midad entre fases que puede devenir en cortocircuito y daño sobre los compo-
4 nentes. Por estas razones, en las Figuras 1.18 se ilustran los desplazamientos
5 para los nodos B y C.

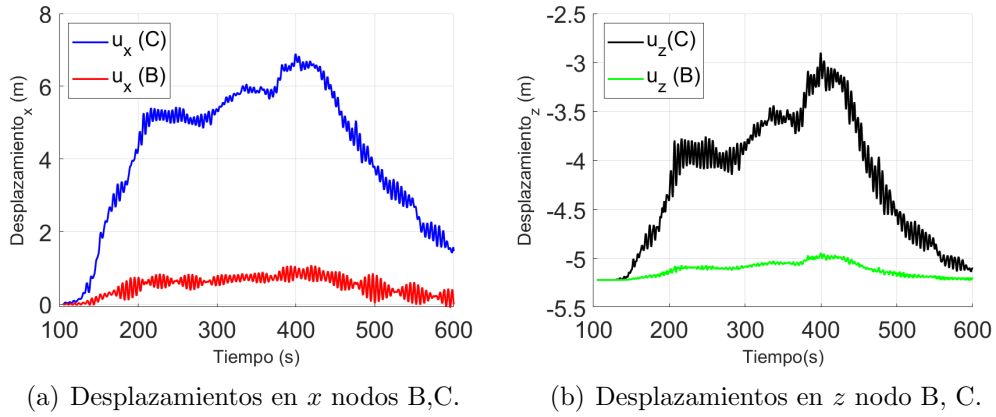


Figura 1.18: Desplazamientos de los nodos medios B y C

6 En la Figura ?? se aprecia que el orden de los movimientos, para ambos
7 nodos, es menor 8 m durante el dominio temporal. Como la separación entre
8 estos es de unos 14 metros podremos garantizar que no habrá impactos en-
9 tre conductores, aun sin considerar desplazamientos sincrónicos entre ambas
10 líneas. No obstante, otras arquitecturas de torres poseen un conductor central,
11 para este caso las posibilidades de choque son mayores y la amenaza debe
12 considerarse a la hora del diseño. En la Figura ?? se muestra que el descenso
13 máximo de la línea se presenta en la primer etapa de simulación, alcanzando
14 un valor de 5.2 m. Esto resulta evidente y trivial dado el sentido de la fuerza
15 ejercida por el viento, pero es una magnitud relevante de seguridad al momento
16 de la instalación, para regular la fuerza de pre-tensado. Al igual que en el par
17 de Figuras 1.17, en 1.18 se aprecian comportamientos morfológicos semejantes
18 en las historias de desplazamiento entre nodos. Cabe notar que, a pesar de
19 que los perfiles son análogos entre los distintos puntos, los desplazamientos en
20 puntos medios representados en las Figuras 1.18 presentan una mayor fluctua-
21 ción temporal respecto los de las cadenas aisladoras mostradas en las Gráficas
22 1.17.

23 En virtud de escudriñar la relación entre los perfiles de fuerza y las variables
24 cinemáticas se elaboró la Figura ?? carga desplazamiento para el nodo A. En

1 abscisas, se colocó el valor del ángulo de balanceo, y en ordenadas la fuerza no-
2 dal originada por la tormenta. Además de plasmar los resultados numéricos se
3 graficó un calculo estático ampliamente utilizado en la bibliografía, sobre todo
4 en el área de ingeniería del viento (Stengel2017a), (duranona2009analysis)
5 (yang2016nonlinear).

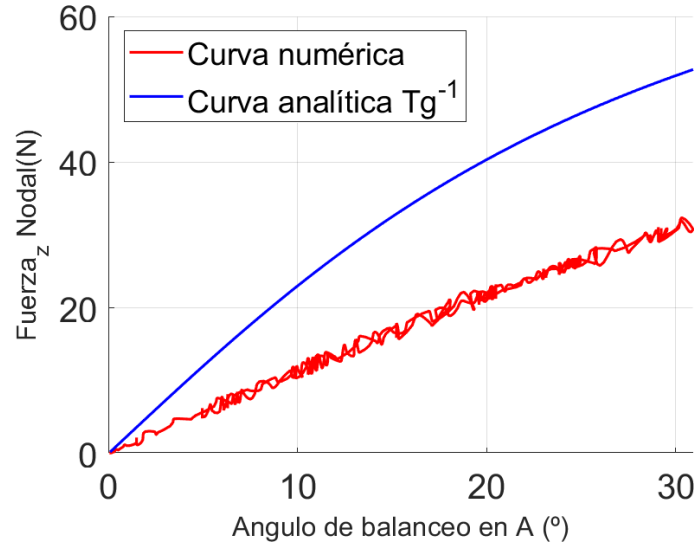


Figura 1.19: Curva analítica y numérica carga desplazamiento.

6 El cálculo analítico resulta de análisis estático plano, donde se iguala la tan-
7 gente del ángulo con el cociente entre la fuerza total ejercida sobre el conductor
8 y su peso. Este razonamiento no tiene en cuenta las componentes inerciales,
9 tanto de la cadena aisladora como también del conductor, cuyas aceleraciones
10 pueden afectar las fuerzas internas transmitidas al elemento aislador. Asimismo,
11 ese calculo desprecia la componente 3D del movimiento en la coordenada axial,
12 proveniente de las distintas orientación de la linea respecto al ángulo de inci-
13 dencia del flujo. En la Figura ?? se evidencian las diferencias entre los modelos
14 y como el cálculo analítico arroja valores sobredimensionados, respecto al um-
15 bral de velocidad que produciría el impacto, según los resultados del modelo
16 implementado. Con el objetivo de ilustrar visualmente sobre las deformaciones
17 de la estructura y las fluctuaciones axiales mencionadas, se muestran la con-
18 figuración indefomradas en gris y las deformadas con una barra de colores en
19 desplazamientos para el instante $t = 400s$ en la Figura ??.

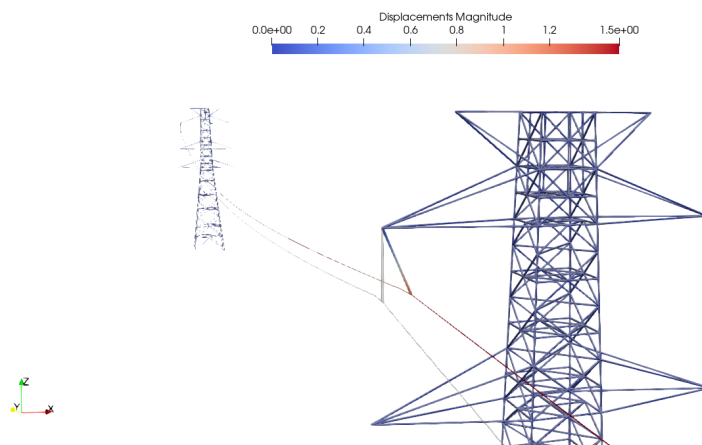


Figura 1.20: Estructura indeformada y deformada para $t = 400$ s.

1 **Capítulo 2**

2 **Conclusiones**

3 El presente capítulo puede separarse en tres secciones que se relacionan
4 con diferentes aristas o perspectivas del trabajo llevado a cabo. En primera
5 instancia, se detallan las consideraciones finales y de síntesis, desde un punto
6 de vista técnico sobre los resultados obtenidos. Posteriormente, se narran los
7 aspectos del desarrollo académico de esta tesis como trabajo culmine dentro de
8 una etapa formativa fundamental para quien escribe. Luego de esto, se realizan
9 recomendaciones y posibles trabajos a futuro para finalizar con una reflexión
10 sobre las limitaciones críticas de este trabajo y el método científico en general.

11 **2.1. Conclusiones técnicas**

12 **2.1.1. Sobre el fenómeno**

13 Según la bibliografía consultada hay vasta evidencia de que el fenómeno
14 de tormentas convectivas ha afectado severamente la calidad e integridad de
15 vida a lo largo y ancho del globo terráqueo. En particular, debido condiciones
16 climáticas singulares de la región, y el progresivo calentamiento global, han
17 intensificado los daño devastadores en los sistemas de transmisión y distribu-
18 ción eléctrica nacionales. Induciendo inevitablemente en costos millonarios de
19 reparación sobre las instalaciones y mas las perdidas de ganancias durante in-
20 terrupción del suministro. Además, estos eventos extremos se manifiestan en
21 corrientes descendentes o tornados extra-tropicales que han puesto en peligro
22 la salud y condiciones de vida de las personas.

23 A partir de las bibliografías consultadas y los resultados del ejemplo 1.3 po-
24 sible teorizar que la mayoría de las incidencias ocurridas en las líneas Palmar-

1 Montevideo de 500kV pueden deberse al pasaje de tormentas severas sobre
2 la zona. Estas tormentas producen corrientes descendentes que ejercen cargas
3 desmesuradas sobre el conductor, en el orden de minutos, imponiendo ángulos
4 de balanceo excesivos que acercarían los conductores a las torres a una distan-
5 cia tal que inminentes descarga a tierra pueden sacar del servicio a la línea.
6 Además según los estudios, el diseño de sistemas de transmisión considerando
7 flujos tipo capa límite atmosférica poliandria estar subdimensionando ya que
8 los periodos de retorno para velocidades de hasta 100 km/h es menor para
9 corrientes descendentes respecto de vientos capa límite atmosférica.

10 Dada la problemática esta investigación la atacó generando herramientas
11 de simulación computacional, capaces de emular los desmedidos desplazamien-
12 tos y esfuerzos que estos eventos producen sobre los sistemas de transmisión
13 eléctrica de alta tensión. Para esto, inicialmente se consulto el estado del arte
14 desde un foco de ingeniería del viento y estructural. Se analizaron bibliografías
15 en materia de simulaciones numéricas aplicadas a conductores eléctricos, con
16 abordajes semi analíticos y computacionales. También, se estudiaron trabajos
17 nacionales e internacionales, desde un punto de vista cualitativo y experimen-
18 tal de corrientes descendentes y sus posibles perjuicios en líneas de transmisión
19 eléctrica. Asimismo, el autor se interiorizó y eligió la formulación corrotacional
20 de vigas 3D. Una vez ahondado en la temática, se implementó y validó un
21 modelo corrotacional consistente robusto y eficaz capaz de captar y reproducir
22 desplazamientos de gran amplitud con numero reducido de elementos.

23 2.1.2. Sobre los resultados

24 Esta formulación se valido con el ejemplo 1.1 benchmark del folclore corro-
25 tacional presentado en **simo1988dynamics**. Este es cargado con una fuerza
26 abrupta y de severa magnitud que alcanza un valor de 50 N en apenas 2 se-
27 gundos de simulación tal y como se muestra en la Figura 1.2, esta fuerza pose
28 una naturaleza similar al fenómeno de tormentas convectivas pues la fuerza
29 aumenta estrepitosamente en un corto lapso de tiempo, por ende la capacidad
30 del implementación de reproducir este tipo de impactos es vital para poder
31 emular el fenómeno. En la Figura ?? se observan amplitud que alcanzan las
32 unos 8 metros cuando la estructura mide 10. Esto muestra la fuerte presencia
33 de grandes desplazamientos y rotaciones. Asimismo, en la dirección z , se puede
34 observar el carácter no conservativo de la formulación corrotacional, ya que las

1 amplitudes prestan una tendencia decreciente con el tiempo. En relación con
2 los desplazamientos en el sentido de y del nodo A presentado en la Figura ?? se
3 evidencia el signo negativo de este, concordando con lo esperado intuitivamente
4 según el sentido de la fuerza aplicada. Por último el resultado mas importante
5 de este ejemplo se destila al cotejar las respuestas de las Figuras ?? ?? ?? con
6 lo publicado por el artículo de referencia (Le2014). Al espejar estas figuras
7 se concluye que el modelo implementado es capaz de representar cabalmente
8 movimientos de gran amplitud con apenas 10 elementos por miembro y un
9 paso temporal de 0.25 s. Esto permitió extrapolar y aplicar la formulación a
10 dominios mas complejos aplicadas específicamente al modelado de conductores
11 eléctricos.

12 2.2. Conclusiones de formación

13 El desarrollo de este trabajo constituyó una instancia de formación fun-
14 damental y enriquecedora para el autor enmarcada dentro del programa de
15 Magister en Ingeniería Estructural. Este documento es la síntesis y aplicación
16 de un conjunto de conocimientos profundizados durante la actividad programa-
17 da, aplicada al modelado numérico de estructuras. Desde la óptica del autor, la
18 creación de herramientas endógenas con foco en atacar problemáticas a nivel
19 nacional constituye un pilar fundamental en el desarrollo autónomo y origi-
20 nal de la ingeniería uruguaya. Este trabajo es una muestra de la convicción
21 y determinación, que el conocimiento académico, debe desarrollarse de forma
22 transparente, comunitaria y democrática. Es por esto, que todos los códigos
23 utilizados en esta investigación se implementaron en el software libre ONSAS.
24 Esto abre la posibilidad a cualquier tercero ya sea una organización o persona
25 de estudiar, modificar y difundir los códigos creados como también aplicarlos
26 a sus propias necesidades.

27 2.3. Limitaciones

28 2.4. Trabajos a futuro