

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

Autor: M.C. Vanzulli^{IIIMPI}

Director de tesis: J.M. Pérez Zerpa^{IET}

Director académico: G Usera^{IIIMPI}

11 de agosto de 2021

Tabla de contenidos:

Introducción y preliminares

- Agradecimientos
- Introducción
- Preliminares

Metodología

- Modelado estructural
- Modelo de viento

Resultados Numéricos

- Viga en voladizo con ángulo recto
- Modelo simplificado de una línea
- Viga en voladizo con péndulo
- Sistema de transmisión

Conclusiones

Agradecimientos:

Gracias a:

- Mis tutores de la Facultad de Ingeniería Udelar por guiarme en este proceso de aprendizaje.

Agradecimientos:

Gracias a:

- Mis tutores de la Facultad de Ingeniería Udelar por guiarme en este proceso de aprendizaje.
- La *Comisión Académica de Posgrado* por financiar este proyecto y permitirme dedicarme a la investigación.

Agradecimientos:

Gracias a:

- Mis tutores de la Facultad de Ingeniería Udelar por guiarme en este proceso de aprendizaje.
- La *Comisión Académica de Posgrado* por financiar este proyecto y permitirme dedicarme a la investigación.
- Mis compañeros de trabajo por cuestionarme, impulsarme y hacer reír al malhumor.

Motivación internacional:

- En Australia el 90 % de las torres de alta tensión dañadas fallaron debido a fenómenos de tormentas severas. ([Li,2000](#))

Motivación internacional:

- En Australia el 90 % de las torres de alta tensión dañadas fallaron debido a fenómenos de tormentas severas. ([Li,2000](#))
- 55 torres de alta tensión fueron **destruidas** en Chubut en el año 2020.

Motivación internacional:

- En Australia el 90 % de las torres de alta tensión dañadas fallaron debido a fenómenos de tormentas severas. ([Li,2000](#))
- 55 torres de alta tensión fueron **destruidas** en Chubut en el año 2020.

Motivación local:

- El 10 de marzo de 2002 azotó una tormenta devastadora, con velocidades de ráfaga desmesuradas provocando el **colapso** de 67 torres eléctricas.

Motivación internacional:

- En Australia el 90 % de las torres de alta tensión dañadas fallaron debido a fenómenos de tormentas severas. ([Li,2000](#))
- 55 torres de alta tensión fueron **destruidas** en Chubut en el año 2020.

Motivación local:

- El 10 de marzo de 2002 azotó una tormenta devastadora, con velocidades de ráfaga desmesuradas provocando el **colapso** de 67 torres eléctricas.
- Se destinaron **12 millones de USD** a cubrir las perdidas y daños al servicio de distribución eléctrica. ([Durañona,2019](#))

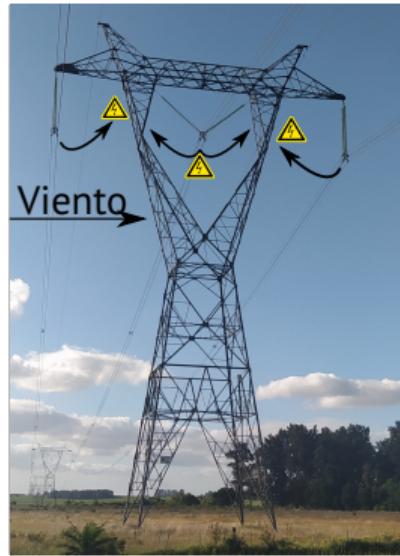
Motivación internacional:

- En Australia el 90 % de las torres de alta tensión dañadas fallaron debido a fenómenos de tormentas severas. ([Li,2000](#))
- 55 torres de alta tensión fueron **destruidas** en Chubut en el año 2020.

Motivación local:

- El 10 de marzo de 2002 azotó una tormenta devastadora, con velocidades de ráfaga desmesuradas provocando el **colapso** de 67 torres eléctricas.
- Se destinaron **12 millones de USD** a cubrir las perdidas y daños al servicio de distribución eléctrica. ([Durañona,2019](#))
- Se registraron más de veinte eventos de desconexión en el periodo de 2000-2007 en la línea de alta tensión Palmar-Montevideo.

Problema:



(a) Ilustración de balanceos excesivos torre Ruta 5. (b) Colapso de torre en Chubut-Argentina, 2020
Noticia Clarín

Tormentas convectivas:

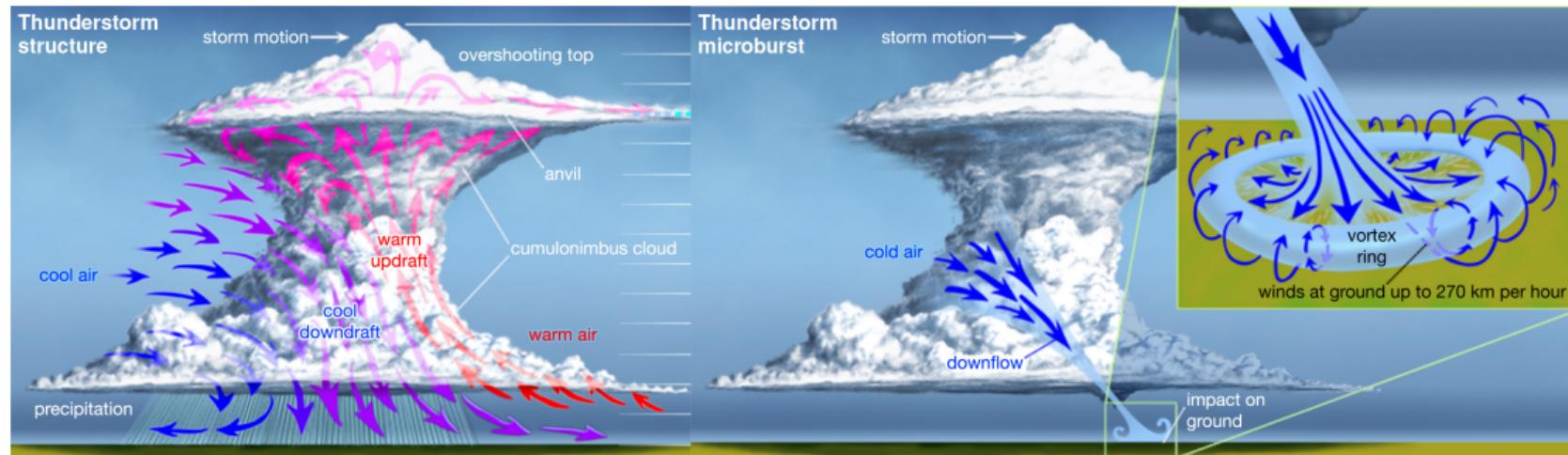
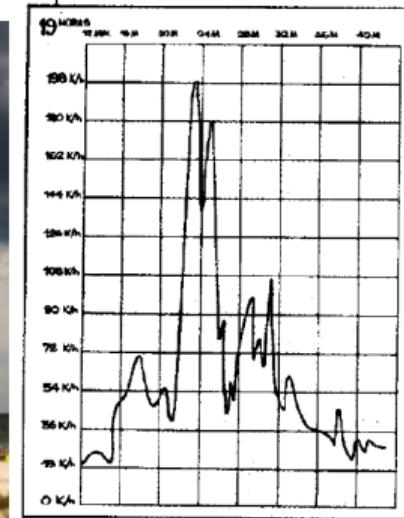


Figura: Esquema de tormentas convectivas extraído de [Encyclopedia britannica](#)

Tormentas en Uruguay:



(a) Foto de tormenta convectiva en Cabo Polonio
INUMET



(b) Tormenta convectiva
publicada en [\(Viera, 1969\)](#)

¡Cambio climático!

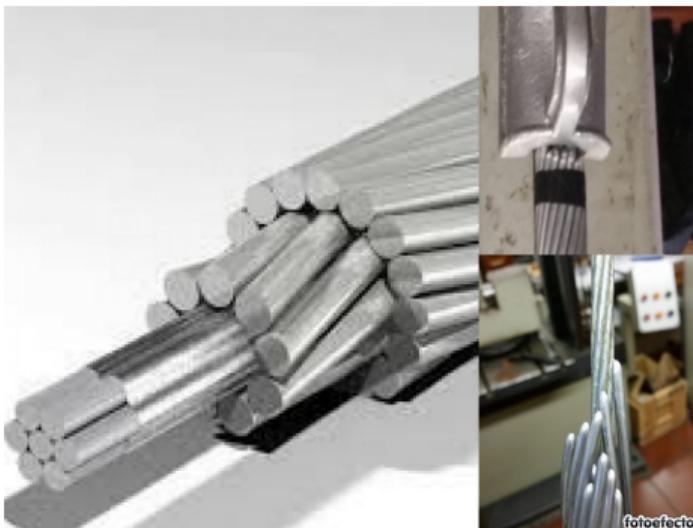
Según [\(Brook, 2013\)](#) este agudiza la intensidad y frecuencia de tormentas convectivas.

Enfoque:

¿Cómo?

- Se estudiaron diferentes ejes temáticos que involucra el fenómeno. Se exploraron distintas formulaciones para el modelado de líneas eléctricas.
- Se eligió la metodología corrotacional de vigas 3D presentada en ([Le, 2014](#)), debido a sus atractivos para el modelado de estructuras con movimientos de gran amplitud.
- Se agregaron componentes aerodinámicos lineales debido a la interacción sólido-fluido.
- Se implementó esta formulación en la herramienta de código abierto *Open Nonlinear Structural Analysis Solver*.
- Se desarrollaron tres modelos computacionales validando la formulación y aplicando la implementación a sistemas de transmisión eléctrica.

Componentes del sistema:



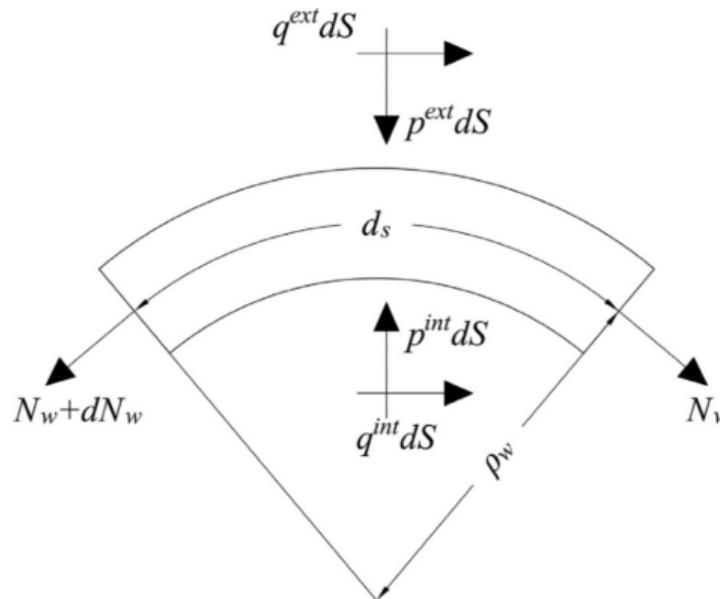
(c) Ilustración conductores norma IEC 60183
y ensayo MT UTE.



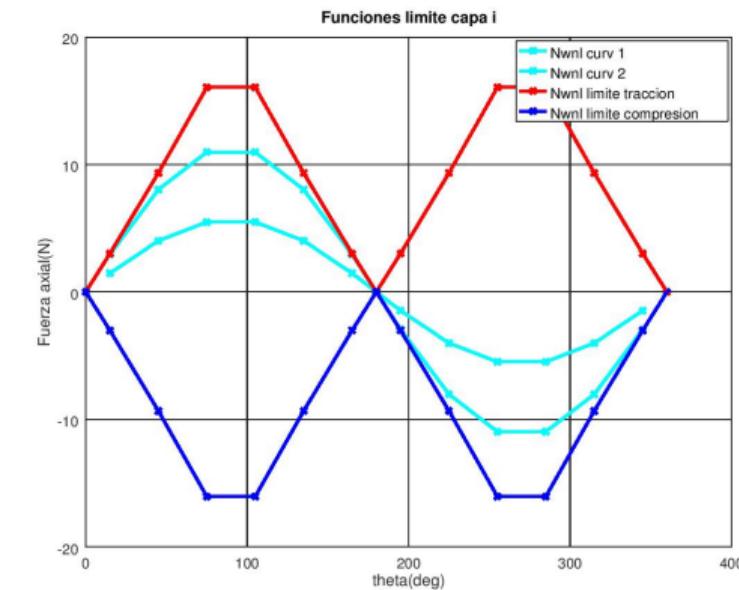
(d) Aisladores de alta tensión.

Deslizamiento en conductores:

Según (Foti, 2016) existe un comportamiento de **hysterisis no lineal** al interior del conductor...

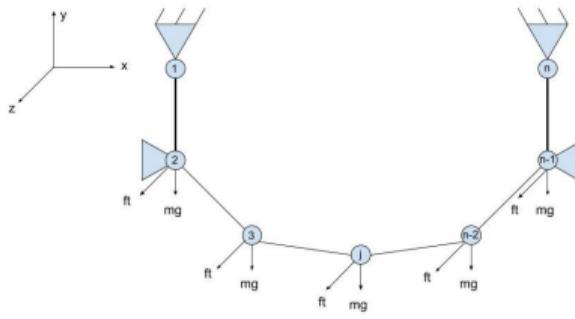


(e) Modelo de contacto diferencial

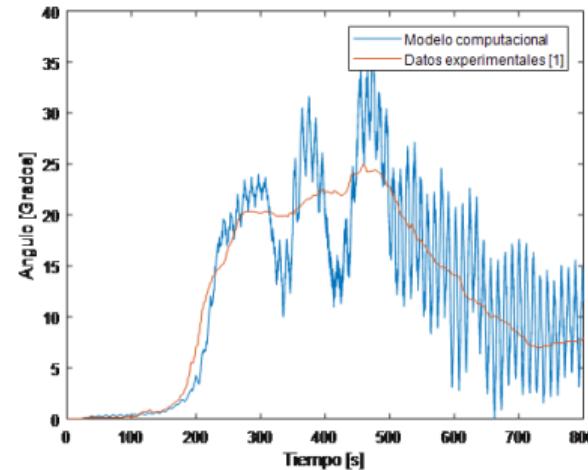


(f) Límite de tensión no lineal para diferentes curvaturas.

Elementos de barra reticulados:



(g) Modelo de un conductor considerando elementos de barra.



(h) Resultados del ángulo de balanceo.

Equilibrio de fuerzas:

Ecuación de equilibrio no lineal:

$$\mathbf{f}_{\text{ext},t+\delta_t} - \mathbf{f}_{\text{int},t+\delta_t} - \mathbf{f}_{\text{ine},t+\delta_t} = \mathbf{0} \quad (1)$$

Métodos iterativos:

$$\begin{aligned} \mathbf{r}(\mathbf{d}_{t+\delta_t}) &= (-\mathbf{f}_{\text{ext},t+\delta_t} + \mathbf{f}_{\text{int}}(\mathbf{d}_{t+\delta_t}) + \dots \\ &\dots + \mathbf{f}_{\text{ine}}(\mathbf{d}_{t+\delta_t}, \mathbf{v}_{t+\delta_t}(\mathbf{d}_{t+\delta_t}, \mathbf{d}_t, \mathbf{v}_t, \mathbf{a}_t), \mathbf{a}_{t+\delta_t}(\mathbf{d}_{t+\delta_t}, \mathbf{d}_t, \mathbf{v}_t, \mathbf{a}_t))) \approx \mathbf{0} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\mathbf{r}(\mathbf{d}_{t+\delta_t}^{k+1}) = \mathbf{r}(\mathbf{d}_{t+\delta_t}^k) + \frac{\partial \mathbf{r}(\mathbf{d}_{t+\delta_t})}{\partial \mathbf{d}_{t+\delta_t}}|_k \delta \mathbf{d}_{t+\delta_t}^{k+1} = \mathbf{0}. \quad (3)$$

Ecuación del residuo:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{r}^{HHT} = & (1 + \alpha_{HHT})(-\mathbf{f}_{ext,t+\delta_t} + \mathbf{f}_{int,t+\delta_t} + \mathbf{f}_{vis,t+\delta_t}) \dots \\
 & \dots - \alpha_{HHT}(-\mathbf{f}_{ext,t} + \mathbf{f}_{int,t} + \mathbf{f}_{vis,t}) + \dots \\
 & \dots + \mathbf{f}_{ine,t+\delta_t} \approx \mathbf{0}
 \end{aligned} \tag{4}$$

Método de HHT

Características en problemas lineales:

- Incondicionalmente estable para dinámica lineal.
- Amortiguamiento numérico ficticio para altas frecuencias.
- La disipación no depende del parámetro característico α_{HHT}
- Según [\(Hilber,1979\)](#) es más preciso para bajas frecuencias en comparación con Newmark y con Wilson

Matriz tangente global:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{K}_{tot} = & (1 + \alpha_{HHT})\mathbf{K}_g + \left(\frac{4}{(1 - \alpha_{HHT}^2)\delta_t^2} \right) \mathbf{MB}_t \dots \\
 & \dots \left(\frac{1^2 + \alpha_{HHT}^2}{2\delta_t} \right) (\mathbf{C}_k + \mathbf{C}_{vis}) \mathbf{B}_t
 \end{aligned} \tag{5}$$

ONSAS:

¿Qué es?

Es un software de código abierto desarrollada en GNU-Octave para análisis estático/dinámico lineal/no lineal de estructuras.

Características:

- Código abierto <https://github.com/ONSAS/ONSAS.m> y visualización en **Paraview**.
- Elementos de barras binodales, de viga corrotacional y tetraedros.

Principales institutos involucrados:

- Instituto de Estructuras y Transporte (IET), FIIng, Udelar.
- Instituto de Mecánica y Producción Industrial (IIMPI), FIIng, Udelar.
- Department of Civil and Architectural Engineering, KTH, Sweden.

Demostración ONSAS:

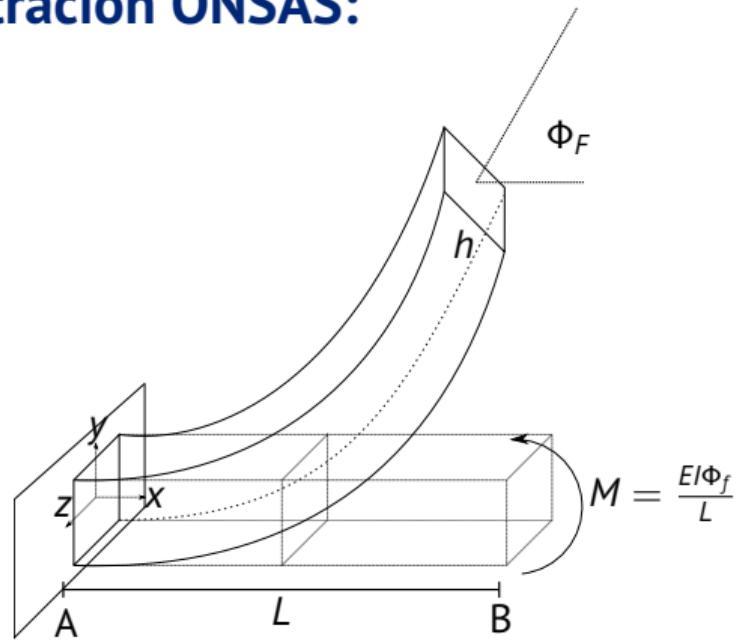
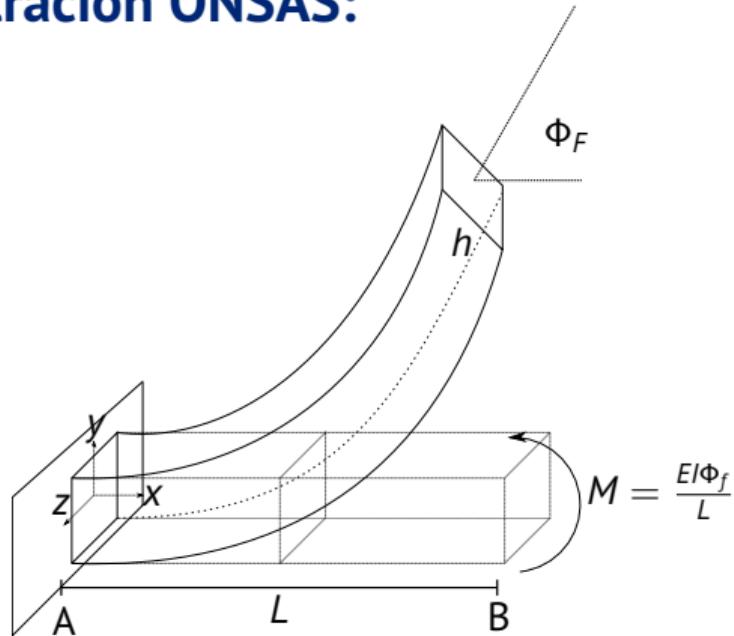


Figura: Ilustración del problema.

Demostración ONSAS:



Propiedades y dimensiones:

- $L = 10 \text{ m}$ $h = 10 \text{ cm}$ $b = 30 \text{ cm}$
- $E = 200 \text{ GPa}$ $\nu = 0,3$

Figura: Ilustración del problema.

Demostración ONSAS:

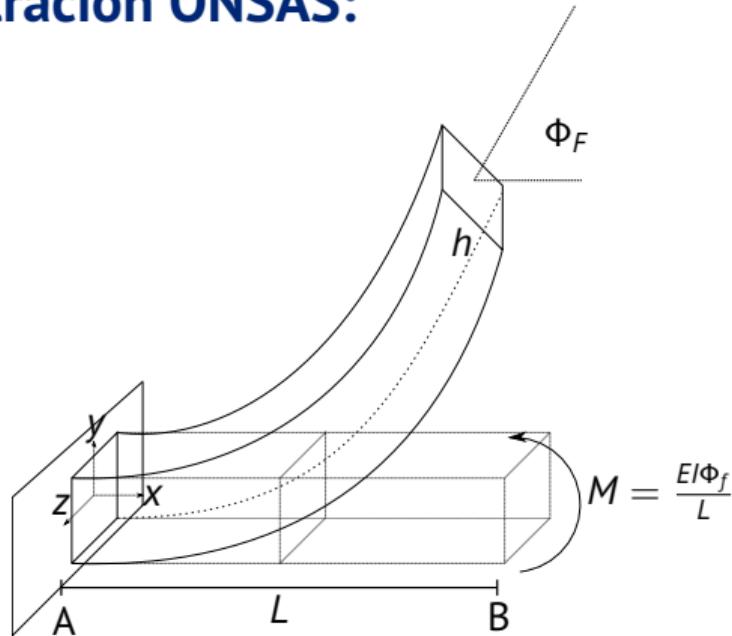


Figura: Ilustración del problema.

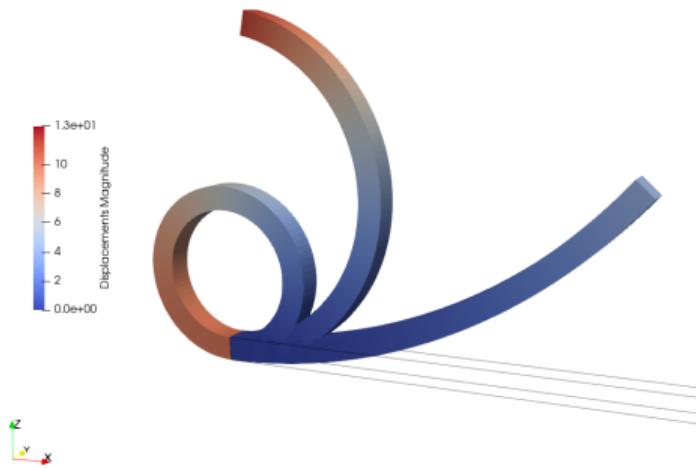
Propiedades y dimensiones:

- $L = 10 \text{ m}$ $h = 10 \text{ cm}$ $b = 30 \text{ cm}$
- $E = 200 \text{ GPa}$ $\nu = 0,3$

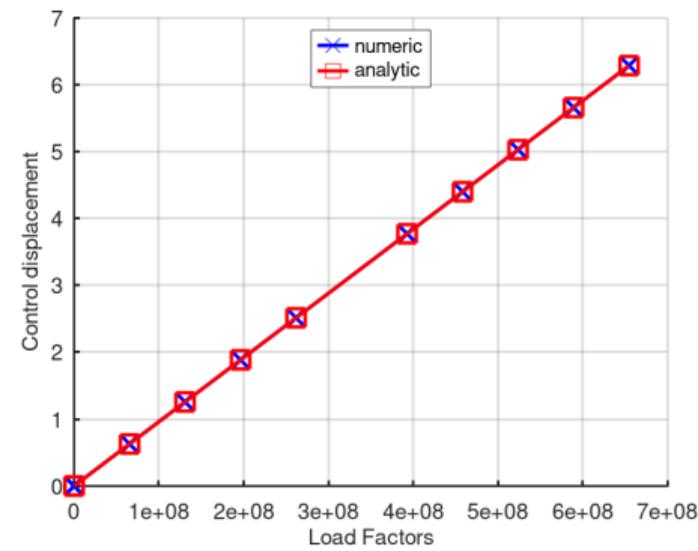
Parámetros computacionales:

- 10 elementos por barra.
- $tol_r = 1 \times 10^{-8}$

Resultados:

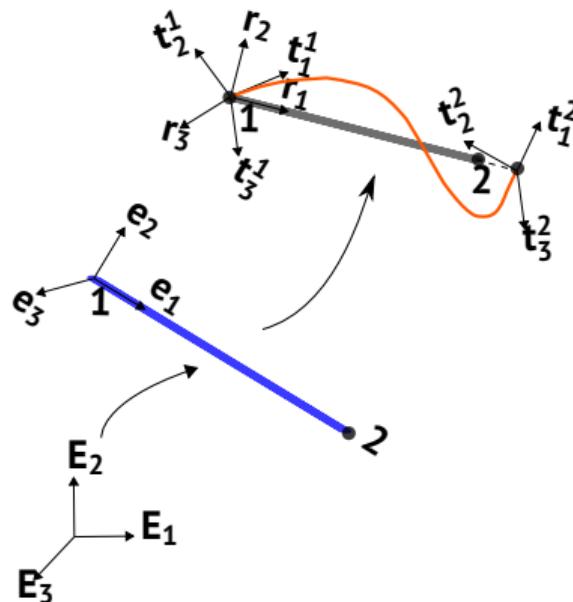


(a) Deformadas en Paraview.



(b) Valdació n para ángulo en el extremo.

Sistemas de coordenadas corrotacional:



Bases para cada configuración:

Paramétrica: ($\mathbf{E}_1, \mathbf{E}_2, \mathbf{E}_3$)

Configuración de referencia : ($\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3$)

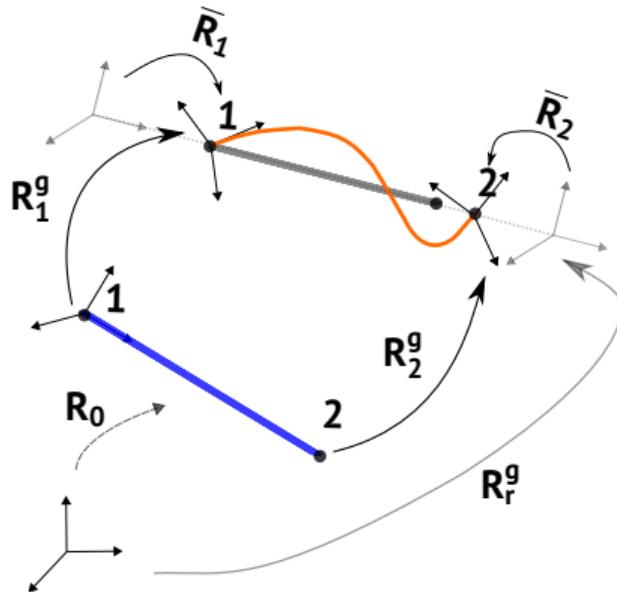
Configuración de deformación rígida : ($\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{r}_3$)

Configuración deformada : ($\mathbf{t}_1^i, \mathbf{t}_2^i, \mathbf{t}_3^i$)

¿Cómo se vinculan las bases? :

Se definen las siguientes matrices de rotación...

Matrices de rotación:



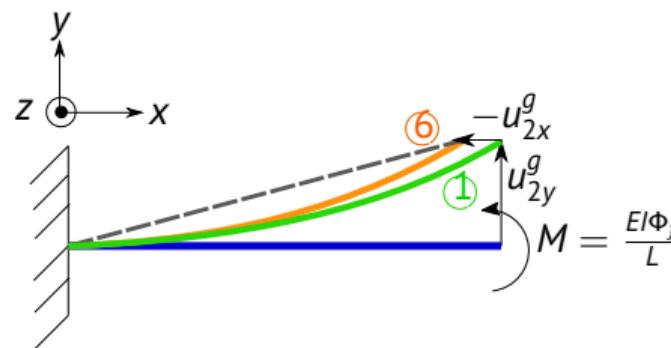
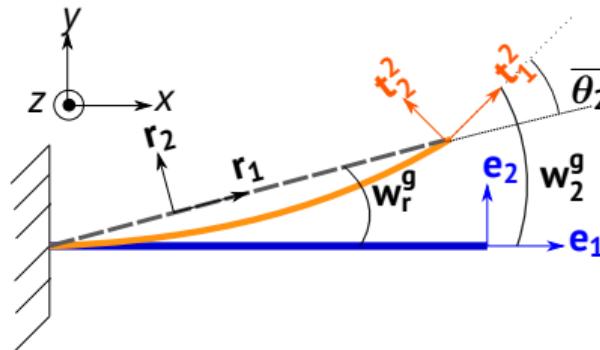
Matriz	Vínculo de sistemas de referencia
R_0	$(E_1, E_2, E_3) \rightarrow (e_1, e_2, e_3)$
R_i^g	$(e_1, e_2, e_3) \rightarrow (t_1^i, t_2^i, t_3^i)$
R_i	$(r_1, r_2, r_3) \rightarrow (t_1^i, t_2^i, t_3^i)$
R_r	$(t_1^i, t_2^i, t_3^i) \rightarrow (r_1, r_2, r_3)$

¿Cómo calcular \bar{R}_i ?

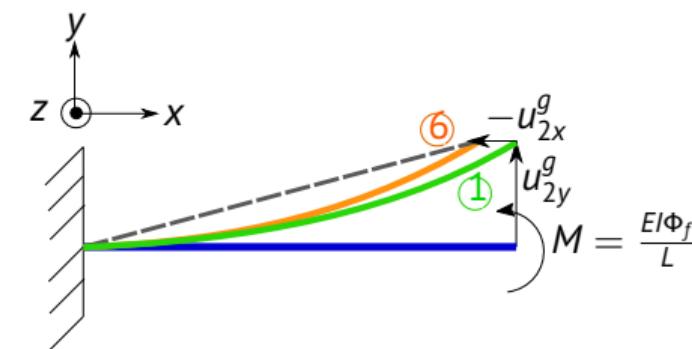
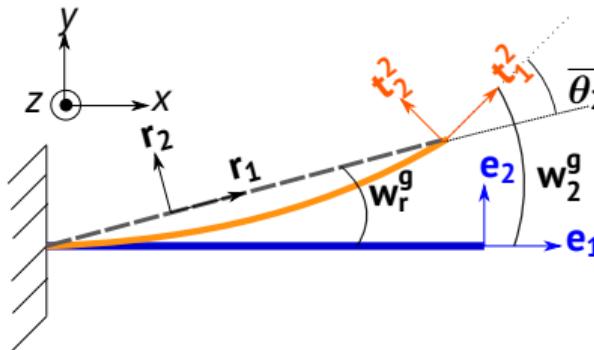
$$R_i^g R_o = R_r \bar{R}_i \quad (6)$$

$$\bar{R}_i = (R_r)^T R_i^g R_o \quad (7)$$

Iteración corrotacional en ONSAS:



Iteración corrotacional en ONSAS:



N_{iter}	M (kN.m)	$\ r_{t+\delta t}^{(k)}\ (N)$	$\bar{\theta}_2$ (°)	w_2^g (°)	$-u_{2x}^g$ (m)	$-u_{2y}^g$ (m)
1	1.03	6.44×10^9	26.6	60.4	0	0.523
2	1.03	1.28×10^6	27.7	56.5	-0.115	0.464
3	1.03	4.19×10^4	29.9	59.9	-0.133	0.504
4	1.03	4.28×10^2	26.6	60.2	0.134	0.500
5	1.03	4.70	26.6	60.0	0.134	0.500
6	1.03	4.72×10^{-8}	30.0	60.0	0.135	0.500

Figura: Iteraciones en desplazamientos 1 elemento y $\Phi_f = 60^\circ$

Fuerza interna y matriz tangente:

Se definen los siguientes desplazamientos:

Locales: $\mathbf{d}_L = [\bar{u}, \bar{\theta}_1^T, \bar{\theta}_2^T]^T$

Globales: $\mathbf{d}_g = [u_1^{gT}, u_2^{gT}, w_1^{gT}, w_2^{gT}]^T$

La matriz B vincula sus variaciones :

En desplazamientos: $\mathbf{d}_L = \mathbf{B} \mathbf{d}_g$

En Fuerzas: $\mathbf{f}_{int}^g = \mathbf{B}^T \mathbf{f}_{int}^L$

Vector de fuerzas internas en coordenadas globales:

$$\mathbf{f}_{int}^g = \mathbf{B}^T \mathbf{f}_{int}^L = \begin{bmatrix} \mathbf{r} \\ \mathbf{P} \mathbf{E}^T \end{bmatrix} \mathbf{f}_{int}^L \quad (8)$$

Matriz tangente en coordenadas globales:

$$\mathbf{K}_g = \mathbf{B}^T \mathbf{K}_L \mathbf{B} + \mathbf{D} f_{a1} - \mathbf{E} Q \mathbf{G}^T \mathbf{E}^T + \mathbf{E} G a_r. \quad (9)$$

Fuerza inercial y matrices de masa tangentes:

Energía cinética y su variación para el elemento:

$$K = \frac{1}{2} \int_{l_0} \mathbf{v}^T A_\rho \mathbf{v} + \boldsymbol{\omega}^T \mathbf{I}_\rho \boldsymbol{\omega}^T dl_0 \quad (10)$$

$$\delta K = \mathbf{f}_{ine}^T \delta \mathbf{d}_g \quad (11)$$

Vector de fuerzas iniciales en coordenadas globales:

$$\mathbf{f}_{ine} = \int_{l_0} \left\{ \mathbf{H}_1^T \mathbf{R}_r^T A_\rho \mathbf{a} + \mathbf{H}_2^T \mathbf{R}_r [\mathbf{I}_\rho \boldsymbol{\alpha} + \tilde{\boldsymbol{\omega}} \mathbf{I}_\rho \boldsymbol{\omega}] \right\} dl \quad (12)$$

Matrices dinámicas tangentes:

$$\delta \mathbf{f}_{ine} = \mathbf{M} \delta \mathbf{a}_g + \mathbf{C}_k \delta \mathbf{v}_g + \mathbf{K}_k \delta \mathbf{d}_g \quad (13)$$

Metodología

Introducción y preliminares

- Agradecimientos
- Introducción
- Preliminares

Metodología

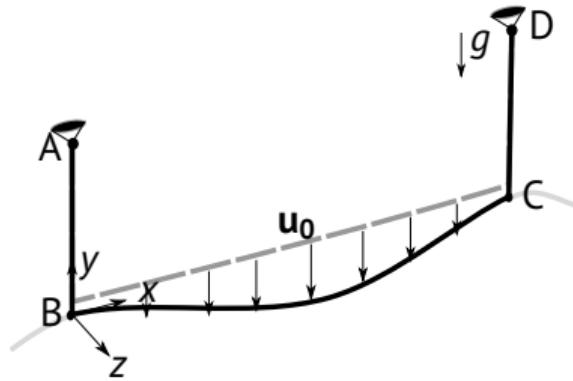
- Modelado estructural
- Modelo de viento

Resultados Numéricos

- Viga en voladizo con ángulo recto
- Modelo simplificado de una línea
- Viga en voladizo con péndulo
- Sistema de transmisión

Conclusiones

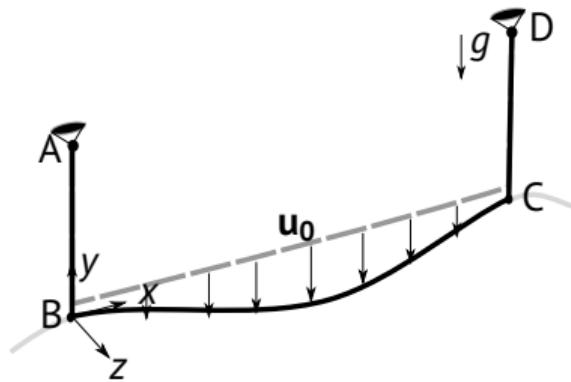
Modelado estructural de las líneas:



Hipótesis:

- Los puntos A y D se encuentran a la misma altura.

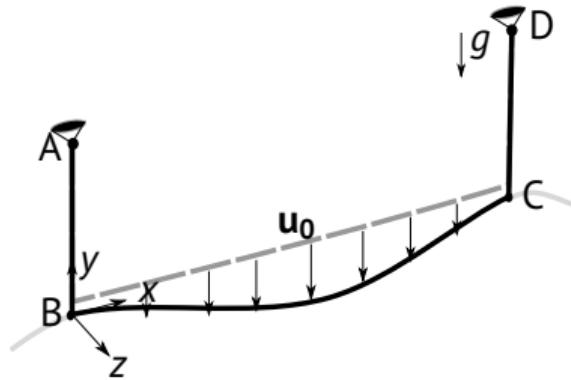
Modelado estructural de las líneas:



Hipótesis:

- Los puntos A y D se encuentran a la misma altura.
- No existe deslizamiento relativo entre las trenzas que conforman el conductor.

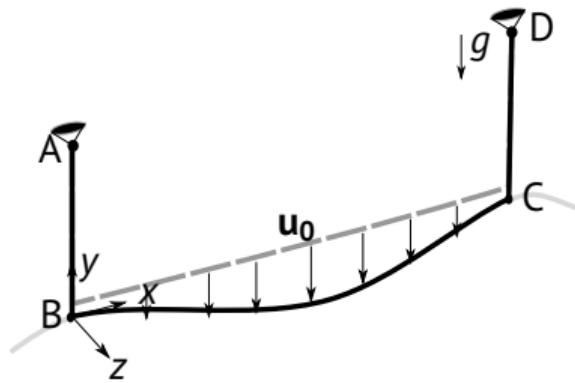
Modelado estructural de las líneas:



Hipótesis:

- Los puntos A y D se encuentran a la misma altura.
- No existe deslizamiento relativo entre las trenzas que conforman el conductor.
- La condición inicial u_0 es la solución estática al problema de peso propio.

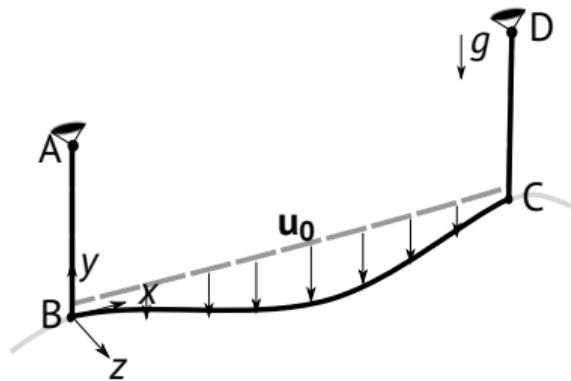
Modelado estructural de las líneas:



Hipótesis:

- Los puntos A y D se encuentran a la misma altura.
- No existe deslizamiento relativo entre las trenzas que conforman el conductor.
- La condición inicial u_0 es la solución estática al problema de peso propio.
- Los aisladores se modelaron con elementos de barras de Green según [\(Crisfield,1997\)](#) .

Modelado estructural de las líneas:



Hipótesis:

- Los puntos A y D se encuentran a la misma altura.
- No existe deslizamiento relativo entre las trenzas que conforman el conductor.
- La condición inicial u_0 es la solución estática al problema de peso propio.
- Los aisladores se modelaron con elementos de barras de Green según ([Crisfield, 1997](#)).
- No se incluyen las fuerzas de pretensado.

Modelado de viento

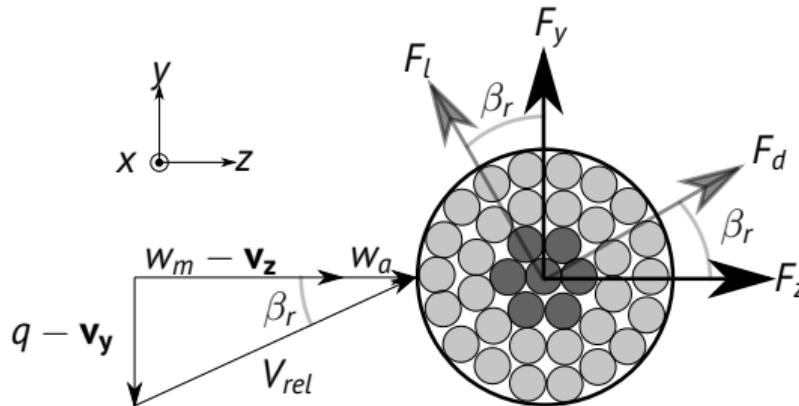


Figura: Esquema en sistema de referencias relativo.

Hipótesis de viento

- Velocidad media predominante:
 $q, \mathbf{v}_y, \mathbf{v}_z \ll \mathbf{w}_m$
- La velocidad incide perpendicular a la línea.
- La fuerza *lift* se desprecia frente al *drag*.

Modelado de viento

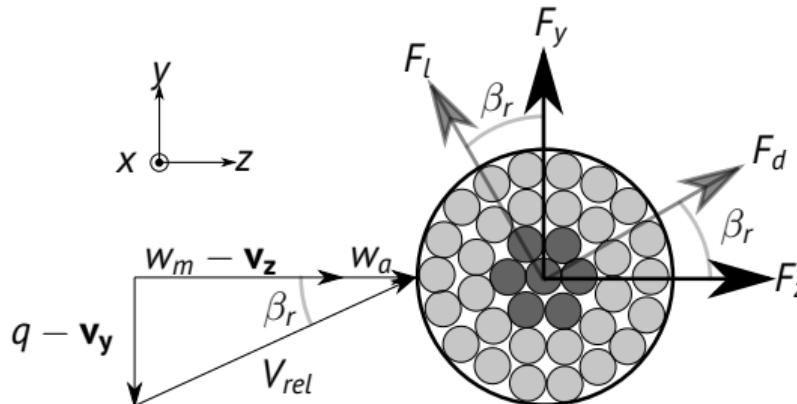


Figura: Esquema en sistema de referencias relativo.

Hipótesis de viento

- Velocidad media predominante:
 $q, \mathbf{v}_y, \mathbf{v}_z \ll \mathbf{w}_m$
- La velocidad incide perpendicular a la línea.
- La fuerza *lift* se desprecia frente al *drag*.

Fuerza de drag y velocidad relativa:

$$F_d = \frac{\rho d_c C_d}{2} V_{rel}^2 \quad (14)$$

$$\frac{V_{rel}^2}{w_m} = w_m + 2(w_a - \mathbf{v}_z). \quad (15)$$

$$F_d = \frac{\rho d_c C_d}{2} (w_m + 2(w_a - \mathbf{v}_z)) w_m \quad (16)$$

Modelado de viento

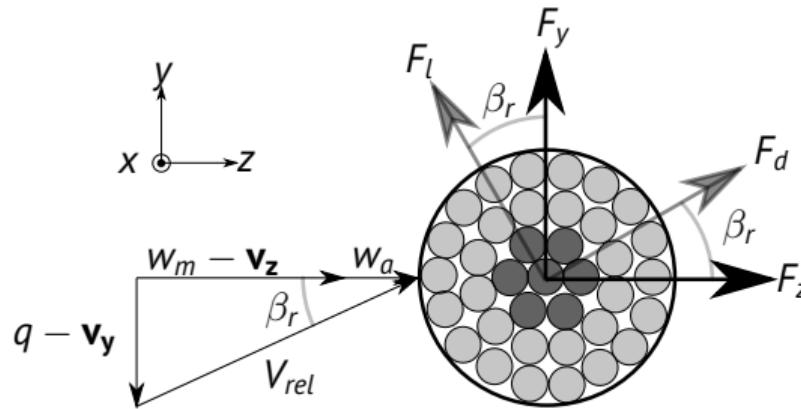


Figura: Esquema en sistema de referencias relativos.

Ángulo relativo:

$$\tan(\beta_r) = \frac{q - \mathbf{v}_y}{w_m - \mathbf{v}_z + w_a} \approx 0 \quad (17)$$

$$F_z = F_d \cos(\beta_r) = \bar{F}_z + F_{za} - F_{vis} \quad (18)$$

Desglose de fuerzas

$$\bar{F}_z = \frac{\rho d_c C_d}{2} (w_m^2) \quad (19)$$

$$F_{za} = \frac{\rho d_c C_d}{2} (w_a^2) \approx 0 \quad (20)$$

$$F_{vis} = \frac{\rho d_c C_d}{2} (2\mathbf{v}_z w_m) \quad (21)$$

Resultados

Introducción y preliminares

- Agradecimientos
- Introducción
- Preliminares

Metodología

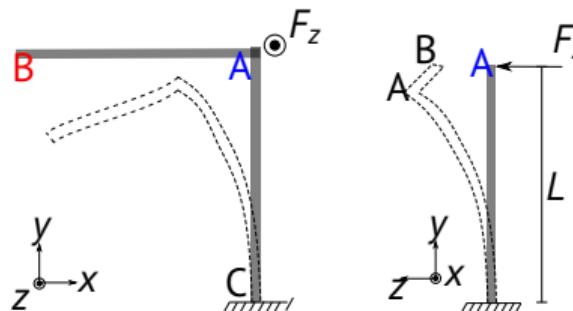
- Modelado estructural
- Modelo de viento

Resultados Numéricos

- Viga en voladizo con ángulo recto
- Modelo simplificado de una línea
- Viga en voladizo con péndulo
- Sistema de transmisión

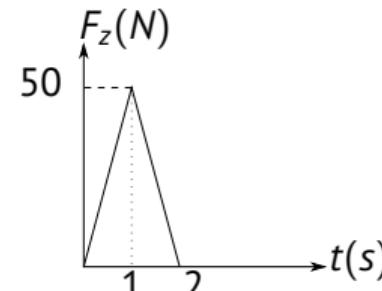
Conclusiones

Viga en voladizo con ángulo recto:

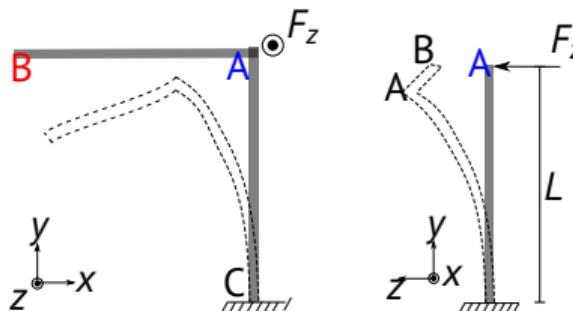


(a) Vista frontal

(b) Vista lateral



Viga en voladizo con ángulo recto:

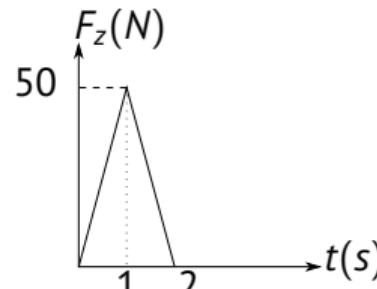


(c) Vista frontal

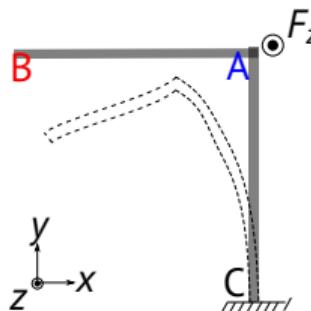
(d) Vista lateral

Propiedades y dimensiones:

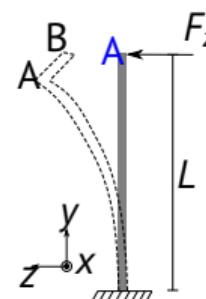
- $GA = EA = 10^6$ y $GJ = EI = 10^3$.
- $L = 10$.



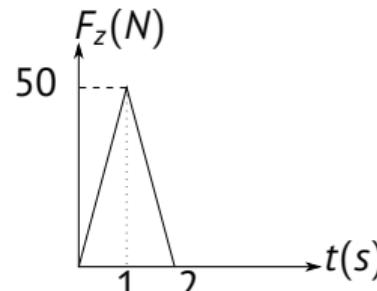
Viga en voladizo con ángulo recto:



(e) Vista frontal



(f) Vista lateral



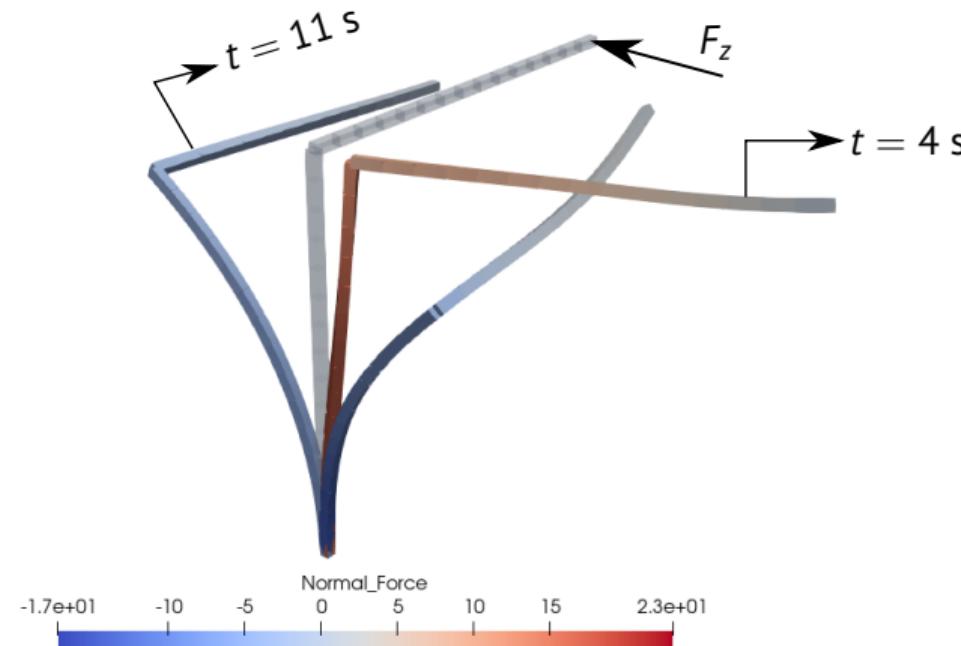
Propiedades y dimensiones:

- $GA = EA = 10^6$ y $GJ = EI = 10^3$.
- $L = 10$.

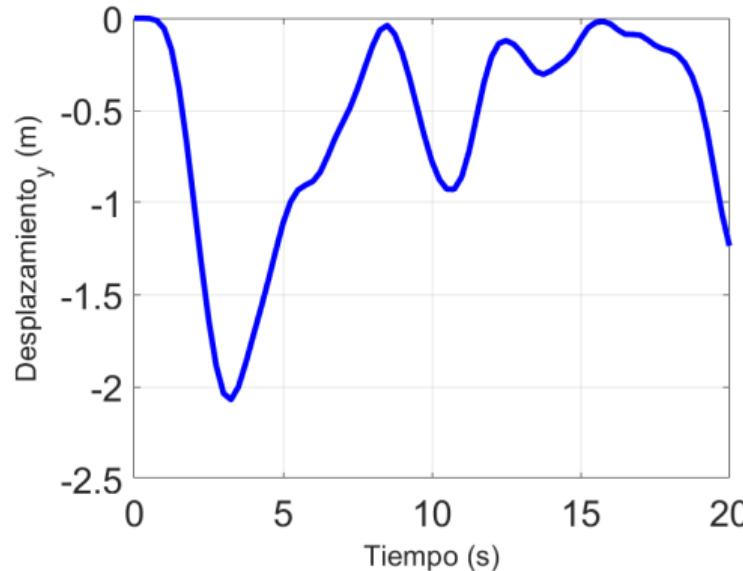
Parámetros computacionales:

- 10 elementos por barra.
- Parámetro de HHT: $\alpha_{HHT} = -0,05$
- $t_f = 20$ s y $\delta_t = -0,25$ s .
- $tol_u = 1 \times 10^{-5}$ $tol_r = 1 \times 10^{-7}$

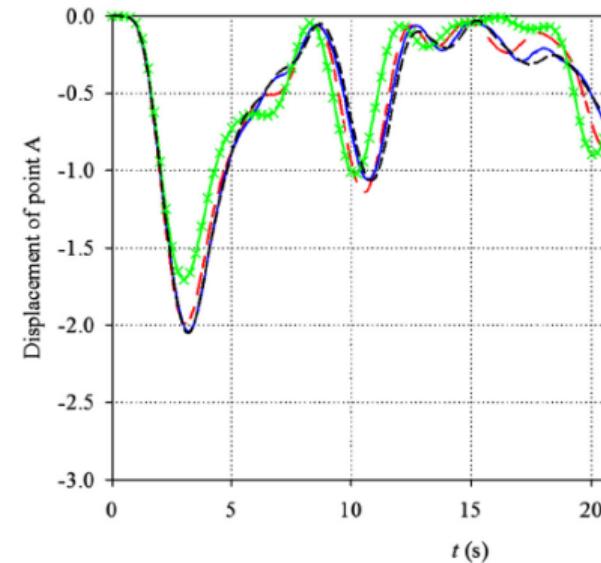
Viga en voladizo con ángulo recto:



Validación nodo A:



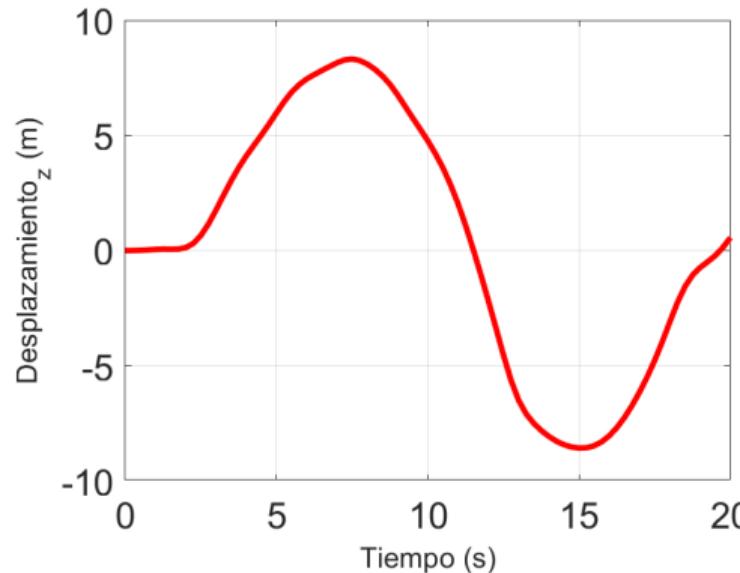
(g) Desplazamiento vertical de A según y



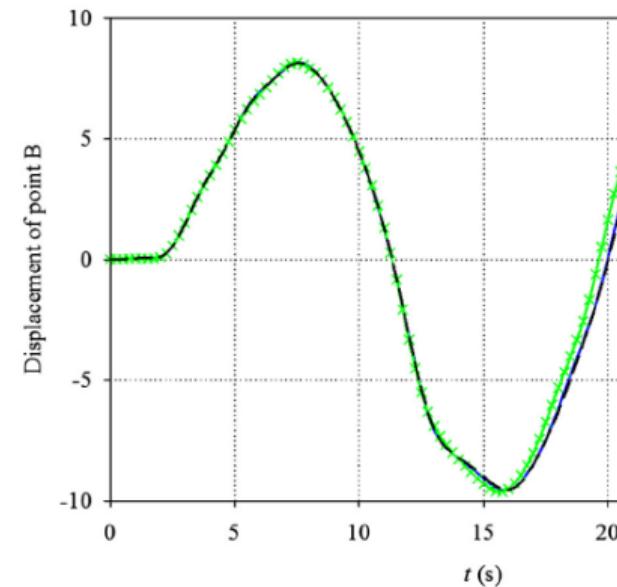
(h) Desplazamiento vertical de A según y por [\(Le,2014\)](#)

Figura: Comparación desplazamientos del nodo A.

Validación del nodo B:



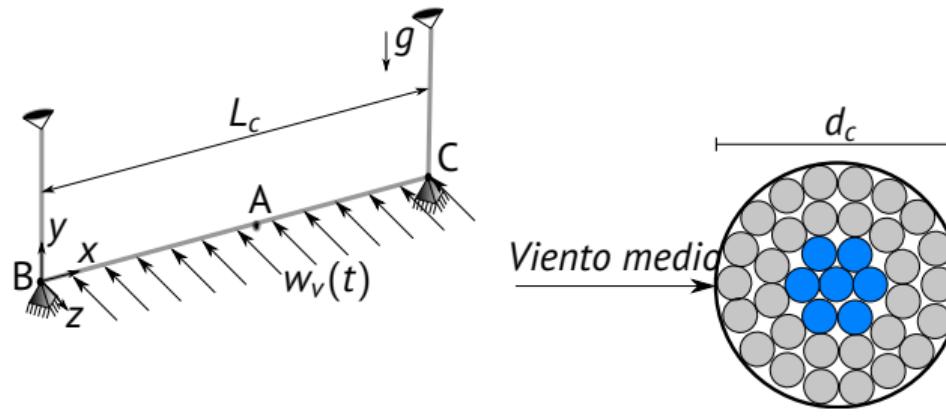
(a) Desplazamiento vertical de B según z



(b) Desplazamiento transversal según z
por [\(Le,2014\)](#)

Figura: Comparación desplazamientos del nodo B.

Modelo simplificado de una línea:

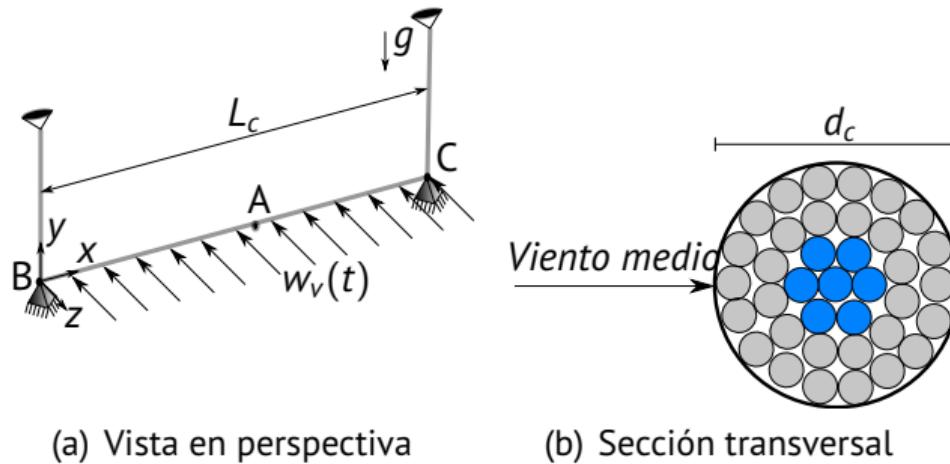


(a) Vista en perspectiva

(b) Sección transversal

Figura: Disposición geométrica de la línea.

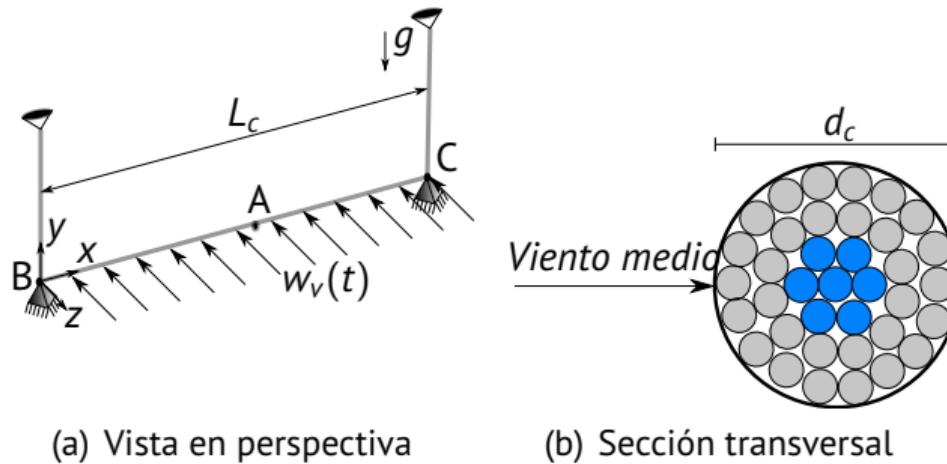
Modelo simplificado de una línea:



Propiedades y dimensiones:

- Conductor ASCR 7/26
- $L_c = 267 \text{ m}$ y $d_c = 2,81 \text{ cm}$
- $m = 1,8 \text{ kg/m}$
- $EA = 29700 \text{ kN}$
- $EI = 2100 (\text{N.m}^2)$ $GJ = 159 (\text{N.m}^2)$

Modelo simplificado de una línea:



(a) Vista en perspectiva

(b) Sección transversal

Figura: Disposición geométrica de la línea.

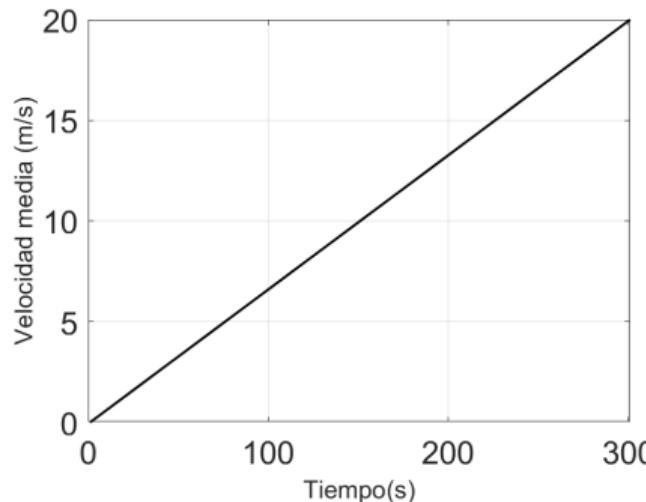
Propiedades y dimensiones:

- Conductor ASCR 7/26
- $L_c = 267 \text{ m}$ y $d_c = 2,81 \text{ cm}$
- $m = 1,8 \text{ kg/m}$
- $EA = 29700 \text{ kN}$
- $EI = 2100 (\text{N.m}^2)$ $GJ = 159 (\text{N.m}^2)$

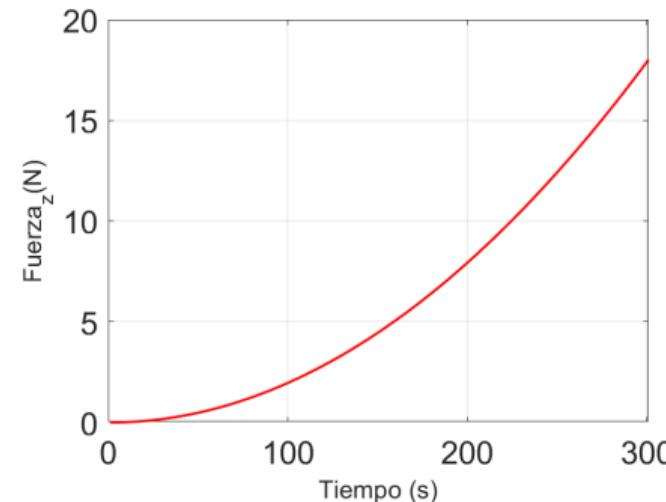
Parámetros computacionales:

- $\alpha_{HHT} = -0,1$
- 150 elementos de cable.
- $tf = 350$ y $\delta_t = 1 \text{ s}$
- $tol_u = 1 \times 10^{-5}$ $tol_r = 1 \times 10^{-7}$

Acción del viento:



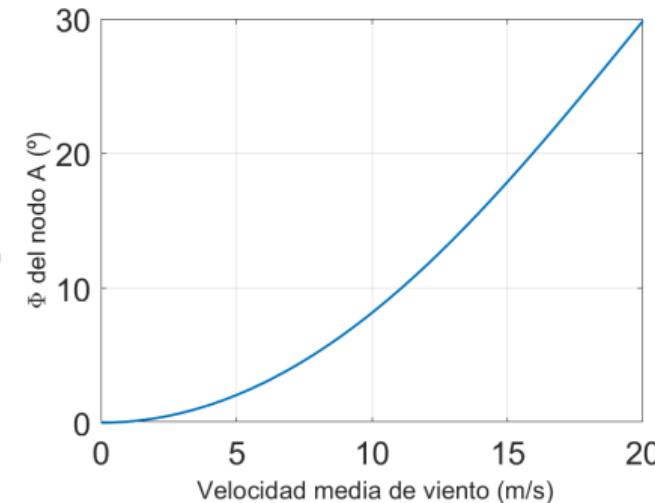
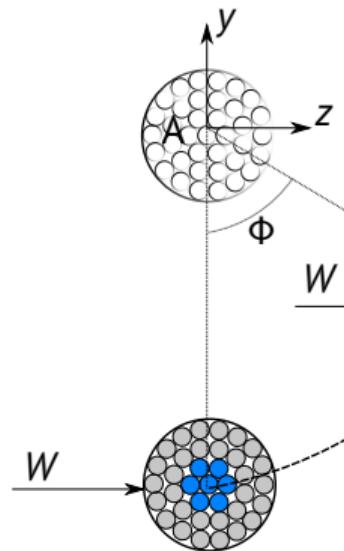
(a) Perfil de velocidad en z



(b) Perfil de fuerza en z

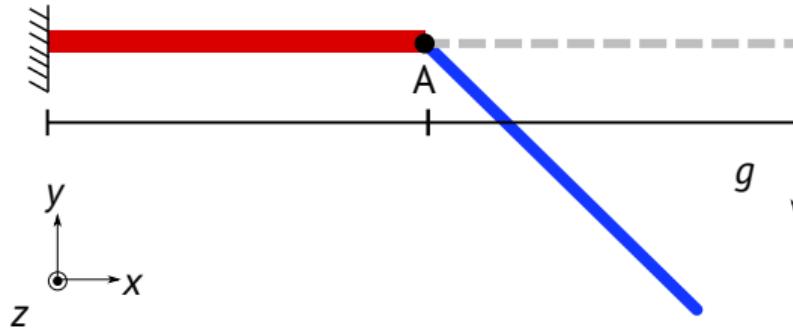
Figura: Perfil de viento aplicado en z.

Ángulo de balanceo:

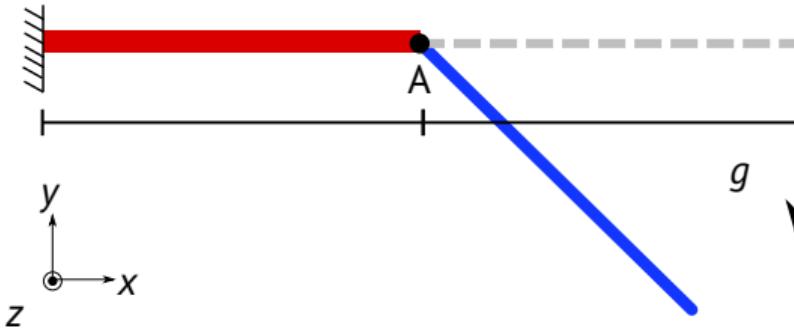


(a) Esquema del ángulo de control Φ . (b) Ángulo de balanceo Φ en función de la velocidad media $W(t)$.

Viga en voladizo con péndulo:



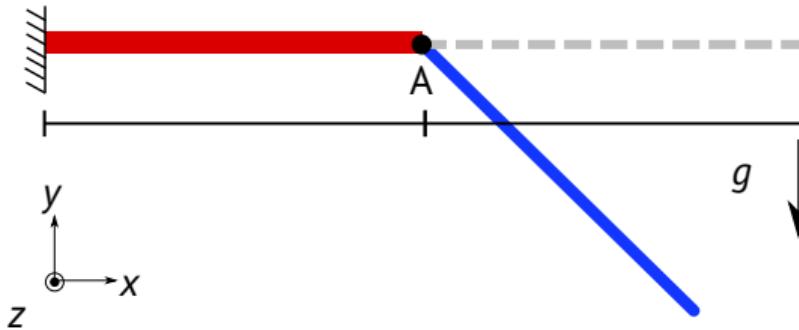
Viga en voladizo con péndulo:



Propiedades y dimensiones:

- **Truss (T):** $L = 3,04 \text{ m}$ $EA_t = 100 \text{ GN}$ $\nu_T = ,3$ $\rho_T = 65,7 \text{ kg/m}^3$.
- **Beam (B):** $EA_b = 2,33 \text{ MN}$ $EI = 18,5 \text{ kN.m}^2$ $\rho_B = 65,7 \text{ kg/m}^3$

Viga en voladizo con péndulo:



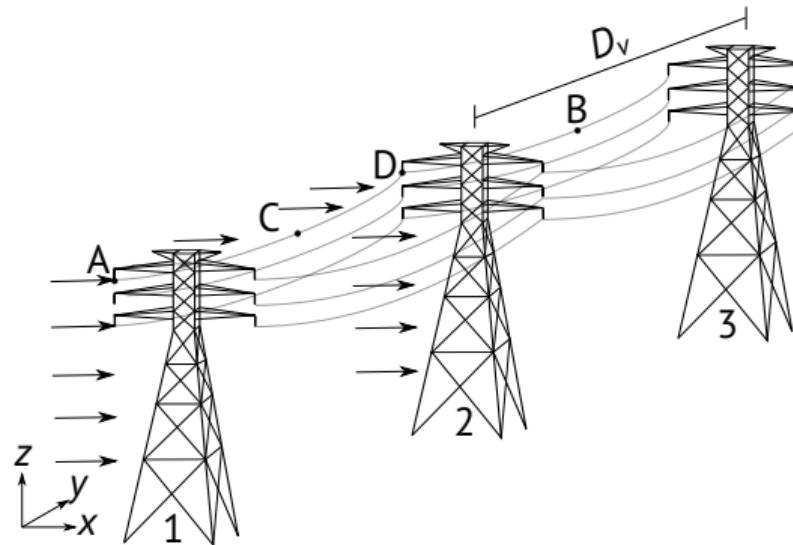
Propiedades y dimensiones:

- **Truss (T):** $L = 3,04 \text{ m}$ $EA_t = 100$
 $\text{GN } \nu_T = ,3$ $\rho_T = 65,7 \text{ kg/m}^3$.
- **Beam (B):** $EA_b = 2,33 \text{ MN}$
 $EI = 18,5 \text{ kN.m}^2$ $\rho_B = 65,7 \text{ kg/m}^3$

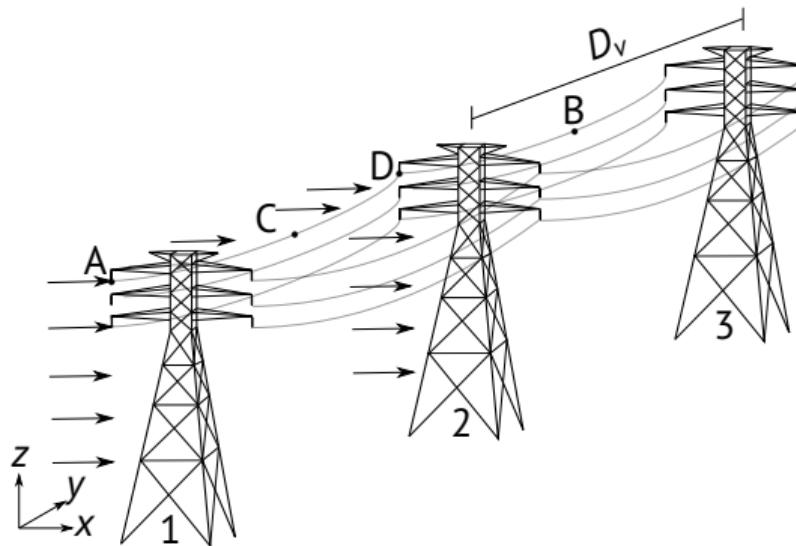
Parámetros computacionales:

- $\alpha_{HHT} = -0,01$
- 1 elementos de barra y 10 de viga.
- $tol_u = 1 \times 10^{-5}$ $tol_r = 1 \times 10^{-7}$

Sistema de transmisión:



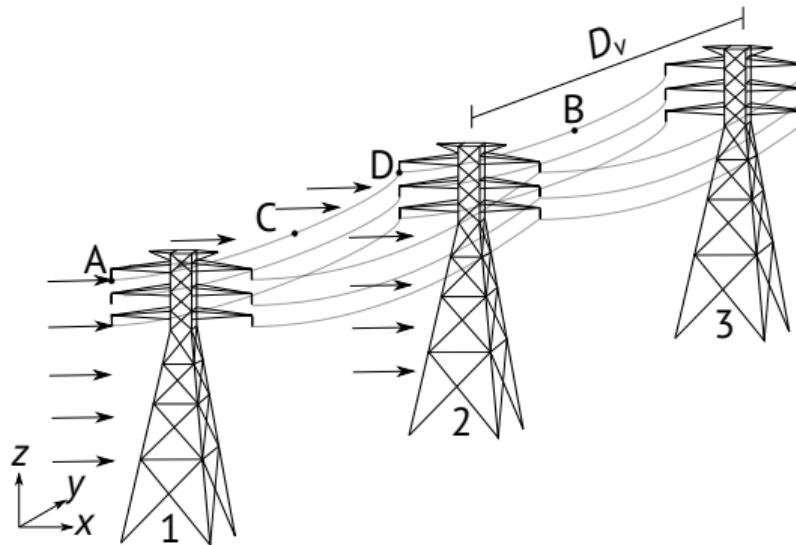
Sistema de transmisión:



Propiedades y dimensiones:

- Conductor ASCR 7/26 : $E A_b = 2,33$ MN $E I = 18,5 \text{ kN.m}^2$ $\rho_B = 65,7 \text{ kg/m}^3$.
- **ASTM A572 laminado en caliente:** $E = 300 \text{ GPa}$ $D_c = 14 \text{ m}$ $L_1 = 26 \text{ m}$ $L_2 = 31 \text{ m}$ y $L_3 = 39 \text{ m}$

Sistema de transmisión:



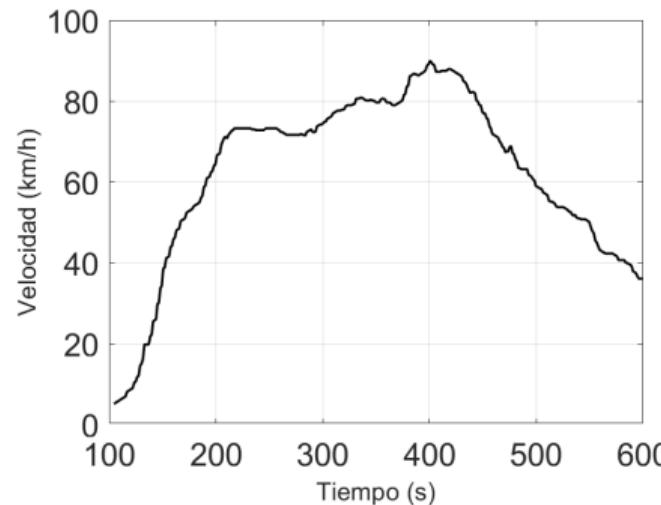
Propiedades y dimensiones:

- Conductor ASCR 7/26 : $E A_b = 2,33$ MN $E I = 18,5 \text{ kN.m}^2$ $\rho_B = 65,7 \text{ kg/m}^3$.
- **ASTM A572 laminado en caliente:** $E = 300 \text{ GPa}$ $D_c = 14 \text{ m}$ $L_1 = 26 \text{ m}$ $L_2 = 31 \text{ m}$ y $L_3 = 39 \text{ m}$

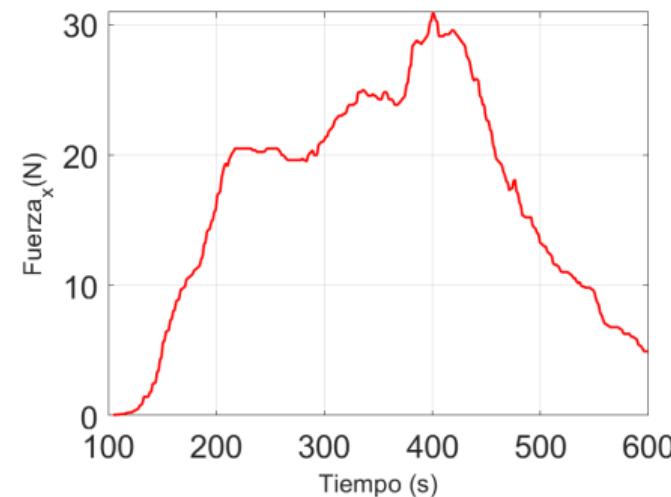
Parámetros computacionales:

- $\alpha_{HHT} = -0,01$
- 663 elementos de barra y 150 elementos por cable.
- $tol_u = 1 \times 10^{-5}$ $tol_r = 1 \times 10^{-5}$

Acción del viento:



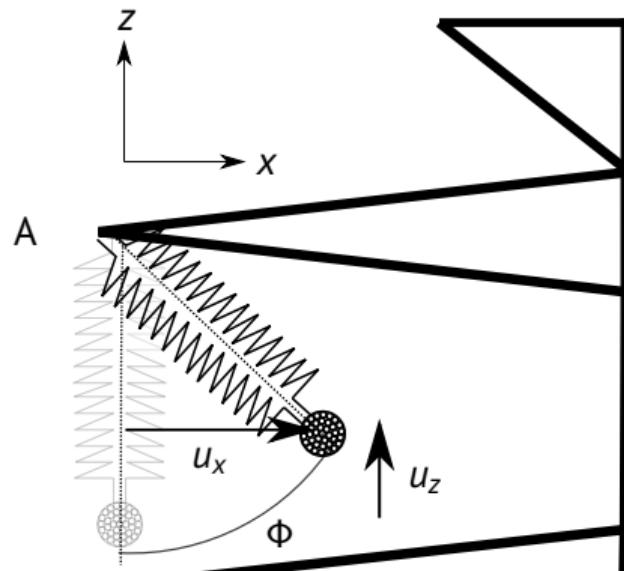
(c) Perfil de velocidad de viento en z



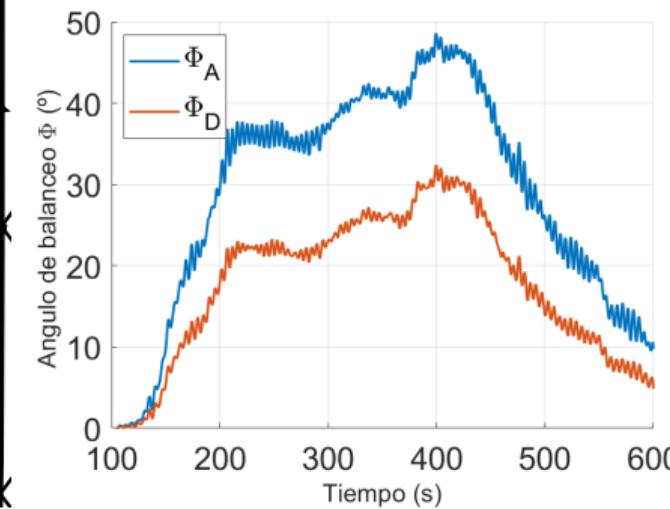
(d) Carga aplicada sobre los nodos

Figura: Perfil de viento aplicado en z según ([Stengel, 2017](#)).

Resultados ángulo de balanceo:



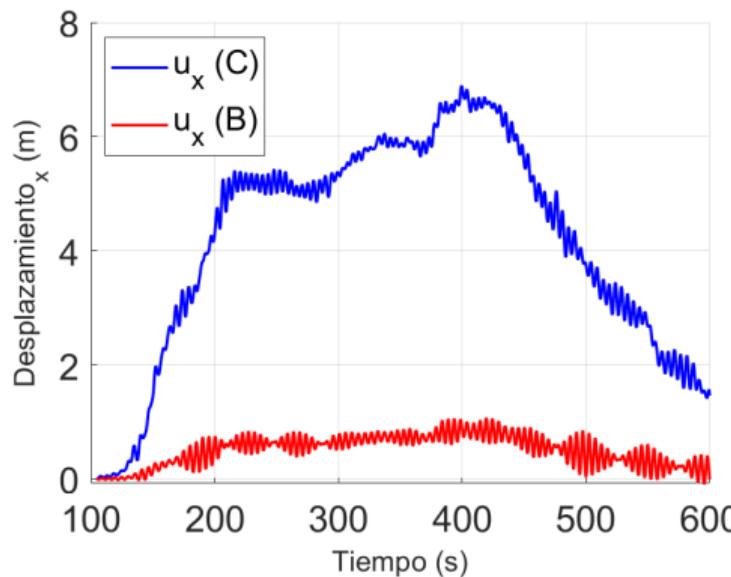
(a) Ilustración del ángulo de balanceo
Φ



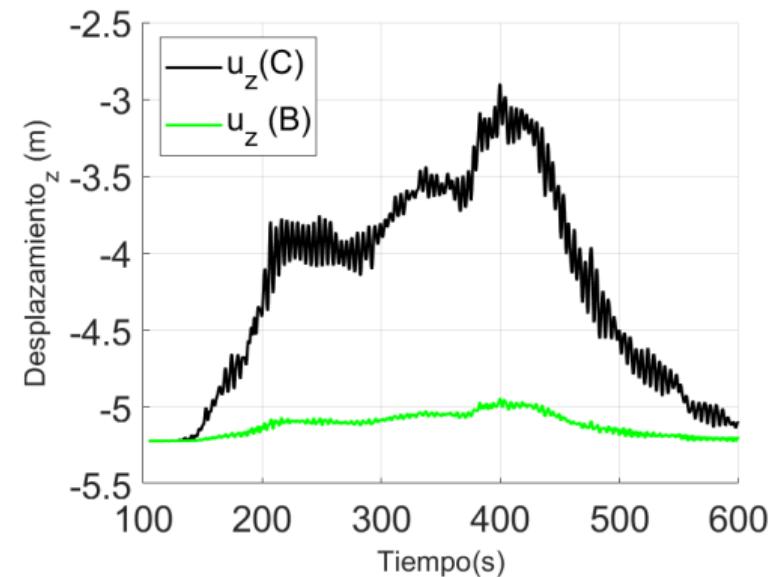
(b) Perfil de velocidades en z según (Sten-
gel,2017)

Figura: Ángulos de balanceo en cadenas aisladoras.

Resultados desplazamientos nodales:



(a) Desplazamientos en x nodos B y C.



(b) Desplazamientos en z nodo B y C.

Figura: Desplazamientos de los nodos medios B y C.

Resultados

Introducción y preliminares

Agradecimientos
Introducción
Preliminares

Metodología

Modelado estructural
Modelo de viento

Resultados Numéricos

Viga en voladizo con ángulo recto
Modelo simplificado de una línea
Viga en voladizo con péndulo
Sistema de transmisión

Conclusiones

Conclusiones

- Se implementó y validó dentro del código abierto ONSAS una formulación corrotacional de vigas 3D para la simulación de problemas dinámicos no lineales de estructuras tridimensionales formadas por vigas.

Conclusiones

- Se implementó y validó dentro del código abierto ONSAS una formulación corrotacional de vigas 3D para la simulación de problemas dinámicos no lineales de estructuras tridimensionales formadas por vigas.
- Se extendió analíticamente la formulación corrotacional para elementos de cables incorporando términos de amortiguamiento aerodinámicos.

Conclusiones

- Se implementó y validó dentro del código abierto ONSAS una formulación corrotacional de vigas 3D para la simulación de problemas dinámicos no lineales de estructuras tridimensionales formadas por vigas.
- Se extendió analíticamente la formulación corrotacional para elementos de cables incorporando términos de amortiguamiento aerodinámicos.
- Se generó un modelo que representa el acoplamiento entre torres y conductores sometido a la acción de un perfil tipo CC.

Conclusiones

- Se implementó y validó dentro del código abierto ONSAS una formulación corrotacional de vigas 3D para la simulación de problemas dinámicos no lineales de estructuras tridimensionales formadas por vigas.
- Se extendió analíticamente la formulación corrotacional para elementos de cables incorporando términos de amortiguamiento aerodinámicos.
- Se generó un modelo que representa el acoplamiento entre torres y conductores sometido a la acción de un perfil tipo CC.
- Según los resultados del modelo, las tormentas convectivas afectan a las líneas generando desplazamientos de casi 7 metros y ángulos de hasta 40° en la cadena aisladora.

Trabajos a futuro

- Verificar la hipótesis de no deslizamiento en las lingas que conforman el conductor según ([Foti, 2017](#)).

Trabajos a futuro

- Verificar la hipótesis de no deslizamiento en las lingas que conforman el conductor según ([Foti, 2017](#)).
- Obtener resultados experimentales específicos sobre líneas de alta tensión que permitan validar el modelo.

Trabajos a futuro

- Verificar la hipótesis de no deslizamiento en las lingas que conforman el conductor según ([Foti, 2017](#)).
- Obtener resultados experimentales específicos sobre líneas de alta tensión que permitan validar el modelo.
- Modelar las principales líneas de transmisión afectados por tormentas severas colaborativamente con la empresa UTE.

Trabajos a futuro

- Verificar la hipótesis de no deslizamiento en las lingas que conforman el conductor según ([Foti, 2017](#)).
- Obtener resultados experimentales específicos sobre líneas de alta tensión que permitan validar el modelo.
- Modelar las principales líneas de trasmisión afectados por tormentas severas colaborativamente con la empresa UTE.
- Incluir perfiles de velocidades capturados por estaciones meteorológicas en Uruguay e integrar esta investigación con los avances en Ingeniería del Viento del grupo de Eolo Dinámica del IMFIA .

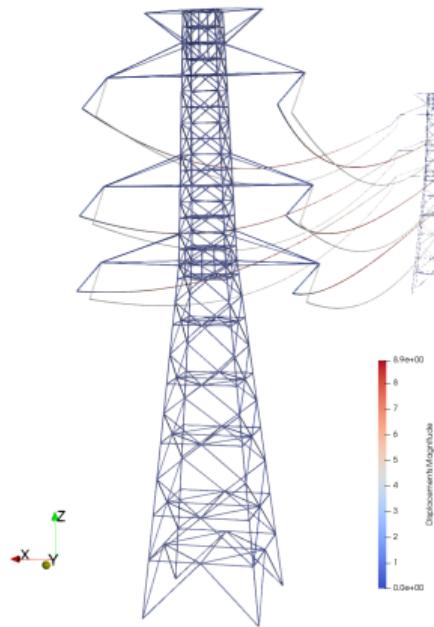
Trabajos a futuro

- Verificar la hipótesis de no deslizamiento en las lingas que conforman el conductor según ([Foti, 2017](#)).
- Obtener resultados experimentales específicos sobre líneas de alta tensión que permitan validar el modelo.
- Modelar las principales líneas de trasmisión afectados por tormentas severas colaborativamente con la empresa UTE.
- Incluir perfiles de velocidades capturados por estaciones meteorológicas en Uruguay e integrar esta investigación con los avances en Ingeniería del Viento del grupo de Eolo Dinámica del IMFIA .
- Escudriñar las oscilaciones de alta frecuencia observadas en los resultados numéricos del ejemplo de trasmisión eléctrica.

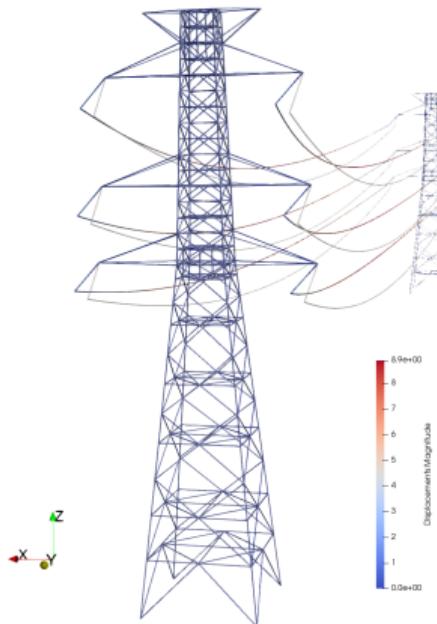
Trabajos a futuro

- Verificar la hipótesis de no deslizamiento en las lingas que conforman el conductor según ([Foti, 2017](#)).
- Obtener resultados experimentales específicos sobre líneas de alta tensión que permitan validar el modelo.
- Modelar las principales líneas de trasmisión afectados por tormentas severas colaborativamente con la empresa UTE.
- Incluir perfiles de velocidades capturados por estaciones meteorológicas en Uruguay e integrar esta investigación con los avances en Ingeniería del Viento del grupo de Eolo Dinámica del IMFIA .
- Escudriñar las oscilaciones de alta frecuencia observadas en los resultados numéricos del ejemplo de trasmisión eléctrica.
- Incluir en el análisis teórico de la formulación corrotacional condiciones de Dirichlet no homogéneas en desplazamientos para el modelado del pretensado.

Animación:



Animación:



Animación...

Ejemplo de dos torres con la fuerza aplicada en todos los puntos.

Gracias:

Gracias...

¡!

Gracias:

Gracias...

¡!

¿Preguntas?

?

Referencias principales:

- [\(Le,2014\)](#): Le, T. N., Battini, J. M. y Hjiaj, M. (2014). A consistent 3D corotational beam element for nonlinear dynamic analysis of exible structures. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 269, 538-565.
- [\(Viera,1969\)](#) : Vieira, S.E., 1969. Tiempo y Clima, ed. nuestra tierra, vol. 8, 68pp.
- [\(Li,2000\)](#): Li, C.Q., 2000. A stochastic model of severe thunderstorms for transmission line design. Probabilist. Eng. Mech. 15 (4), 359–364.
- [\(Crisfield,1997\)](#) Crisfield, M. A. (1997). Non-linear finite element analysis of solids and structures, Vol. 2. John Wiley and Sons.
- [\(Simo y Vu-Quoc ,1988\)](#) Simo, J. C. y Vu-Quoc, L. (1988). On the dynamics in space of rods undergoing large motions and geometrically exact approach. Computer methods in applied mechanics and engineering, 66 (2), 125-161.

Referencias principales:

- [\(Durañona,2019\)](#): Durañona, V., Marchesoni, E. y Salles, R. (2019). A first characterization of high winds that affect the energy distribution system of Uruguay and their related facts. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 128-138.
- [\(Stengel,2017\)](#) Stengel, D. y Thiele, K. (2017). Measurements of downburst wind loading acting on an overhead transmission line in Northern Germany. Procedia engineering, 199, 3152-3157.
- [\(Foti,2016\)](#) Foti, F. y Martinelli, L. (2016). An analytical approach to model the hysteretic bending behavior of spiral strands. Applied Mathematical Modelling, 40 (13-14), 6451-6467. [https://doi.org/10.1016/j.apm.2016.01.06318 001](https://doi.org/10.1016/j.apm.2016.01.06318)
- [\(Foti,2018\)](#) Foti, F. y Martinelli, L. (2018). Finite element modeling of cable galloping vibrations. Part II: Application to an iced cable in 1: 2 multiple internal resonance. Journal of Vibration and Control, 24 (7), 1322-1340.