

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

Autor: M.C. Vanzulli<sup>IIIMPI</sup>

Director de tesis: J.M. Pérez Zerpa<sup>IET</sup>

Director académico: G Usera<sup>IIIMPI</sup>

30 de junio de 2022

# 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](#))

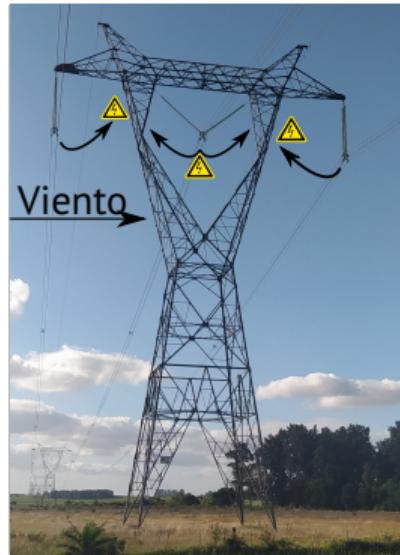
## Motivación internacional:

- 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:

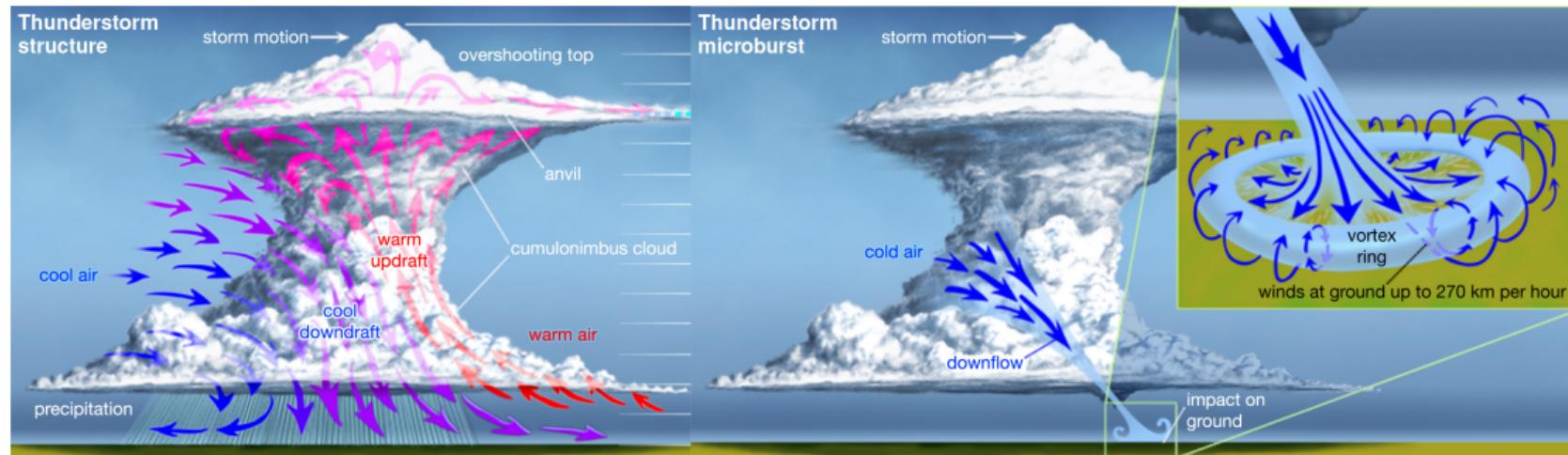
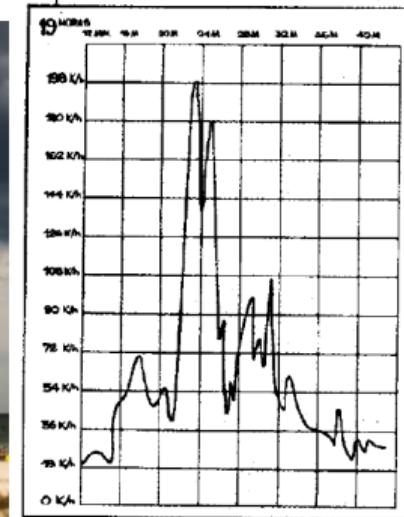


Figura: Esquema de tormentas convectivas extraído de [Encyclopedia britannica](#)

## Tormentas en Uruguay:



(a) Foto de tormenta convectiva en Cabo Polonio  
INUMET



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

### ¡Cambio climático!

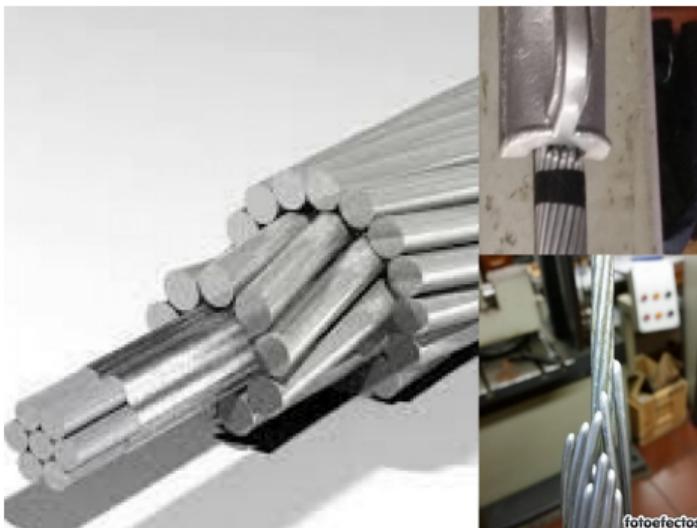
Según [\(Brook, 2013\)](#) este agudiza la intensidad y frecuencia de tormentas convectivas.

## 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:



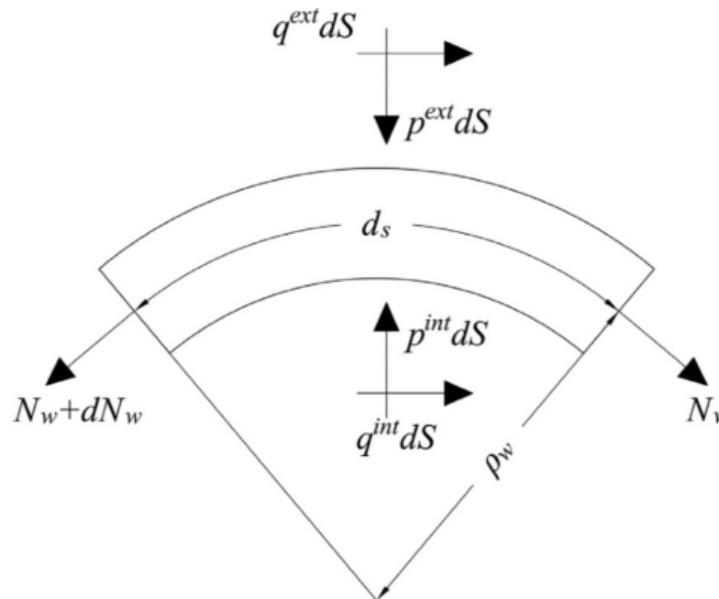
(c) Ilustración conductores norma IEC 60183  
y ensayo MT UTE.



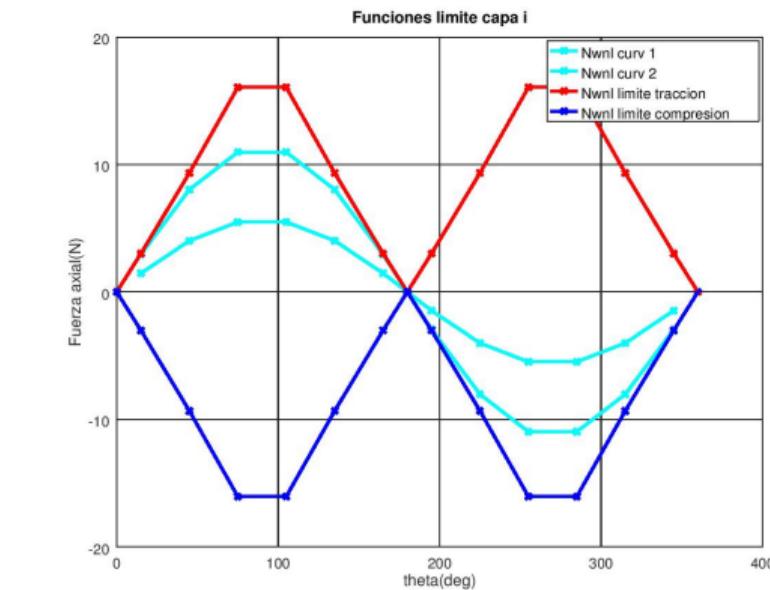
(d) Aisladores de alta tensión.

## Deslizamiento en conductores:

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

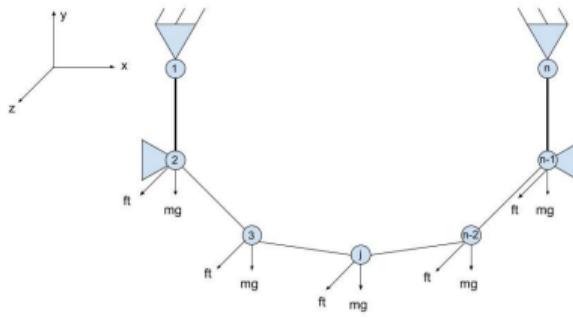


(e) Modelo de contacto diferencial

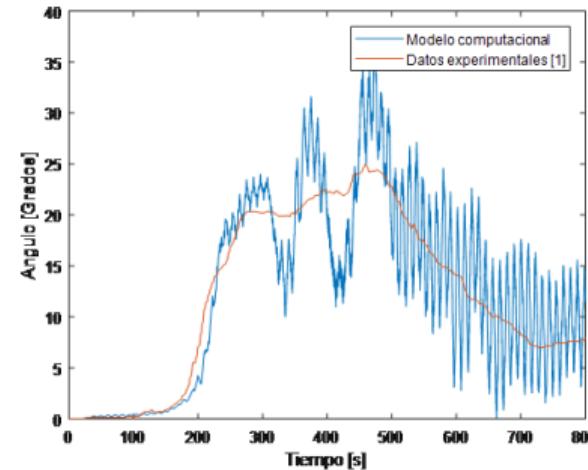


(f) Límite de tensión no lineal para diferentes curvaturas.

# 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  $\alpha_{HHT}$
- 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), Flng, Udelar.
- Instituto de Mecánica y Producción Industrial (IIMPI), Flng, Udelar.
- Department of Civil and Architectural Engineering, KTH, Sweden.

## Demostración ONSAS:

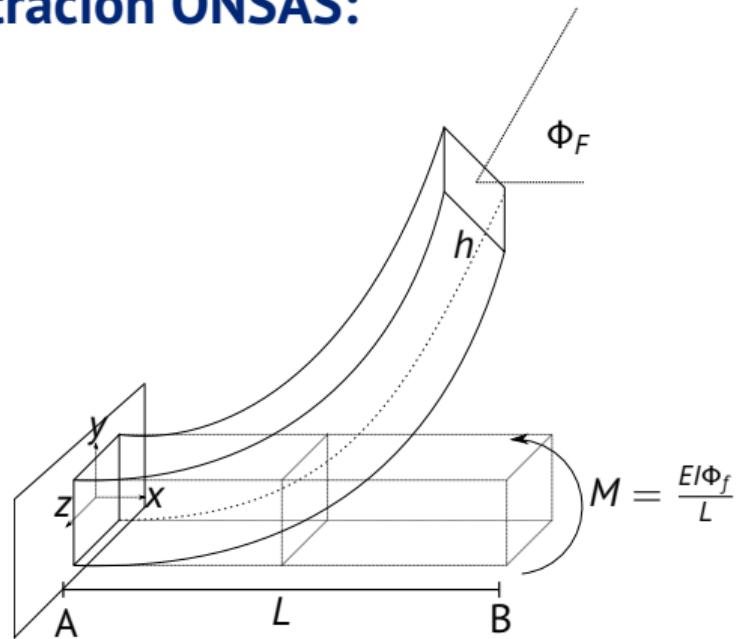
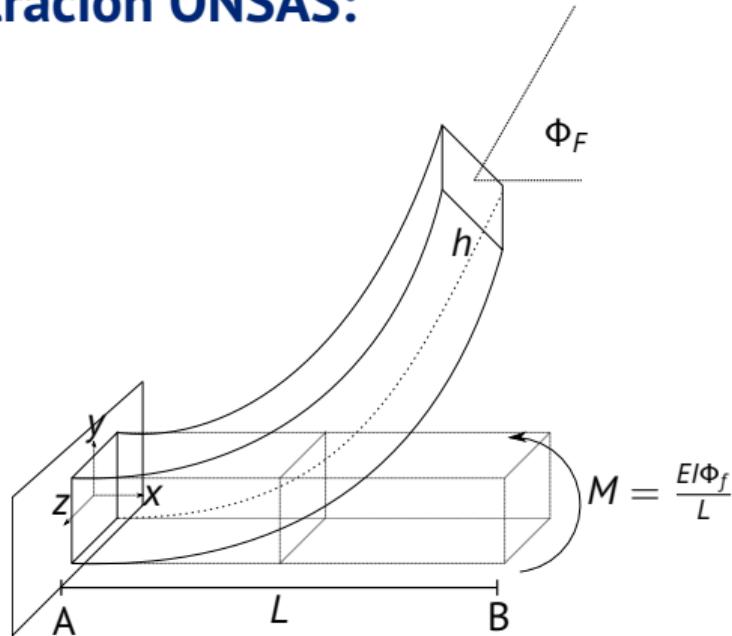


Figura: Ilustración del problema.

## 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:

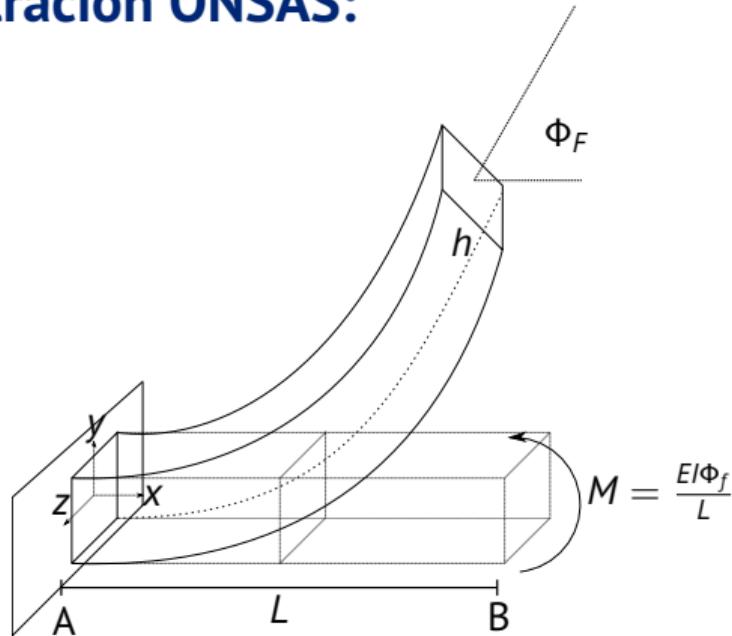


Figura: Ilustración del problema.

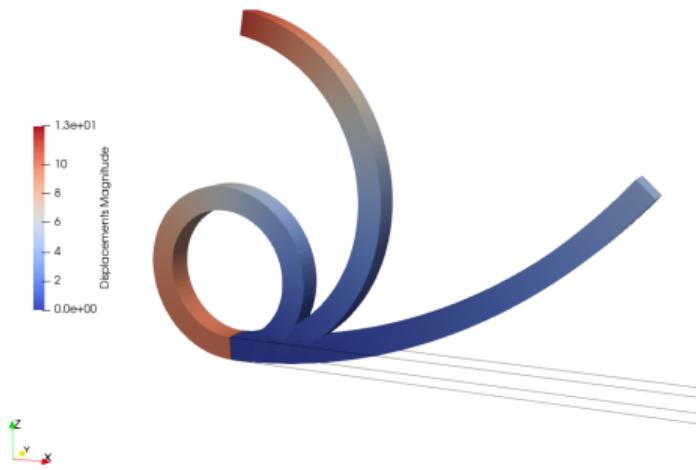
## Propiedades y dimensiones:

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

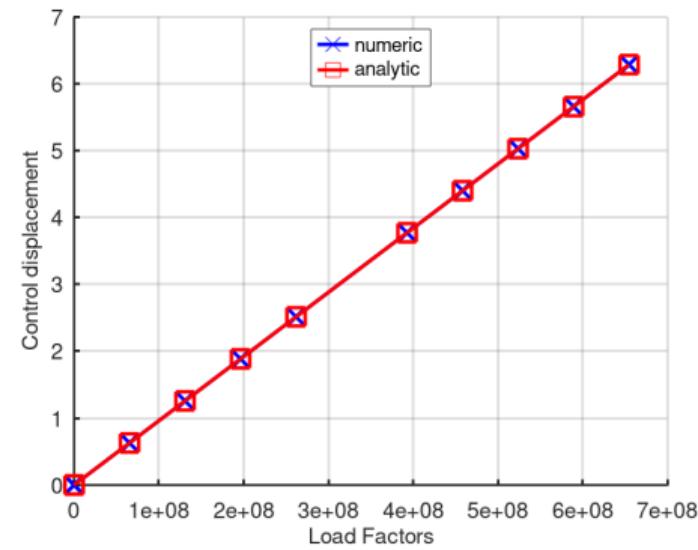
## Parámetros computacionales:

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

# Resultados:

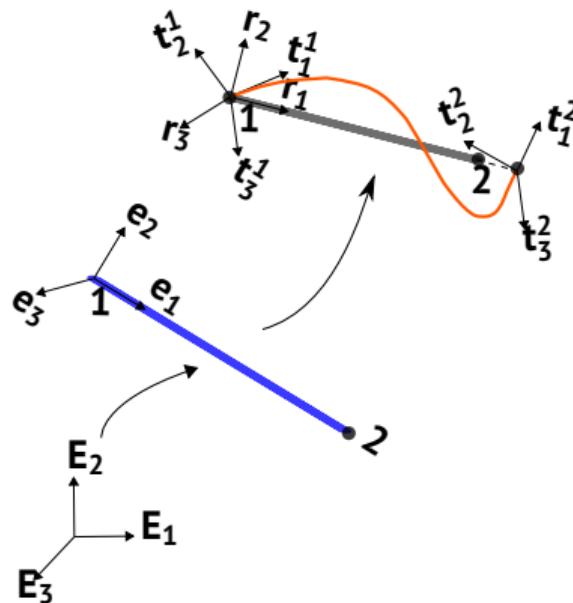


(a) Deformadas en Paraview.



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

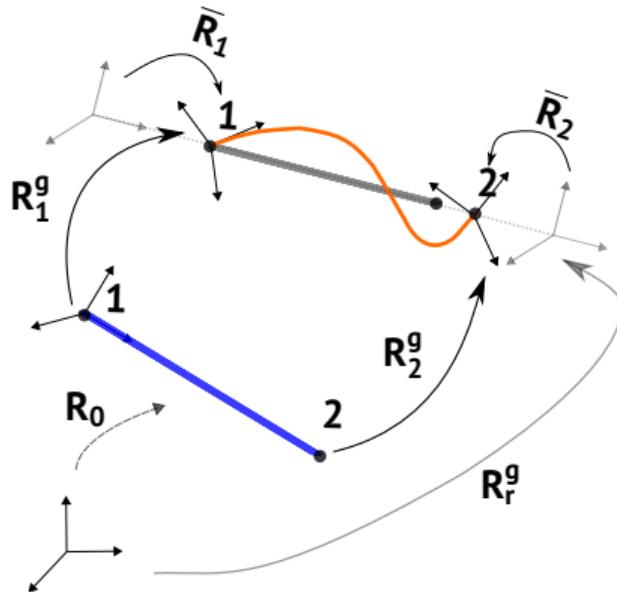
Configuración de deformación rígida : ( $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{r}_3$ )

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:



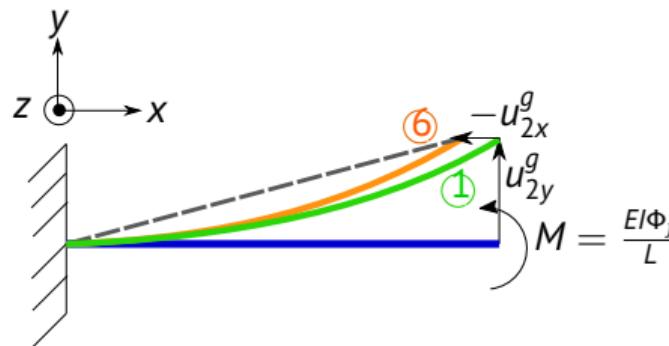
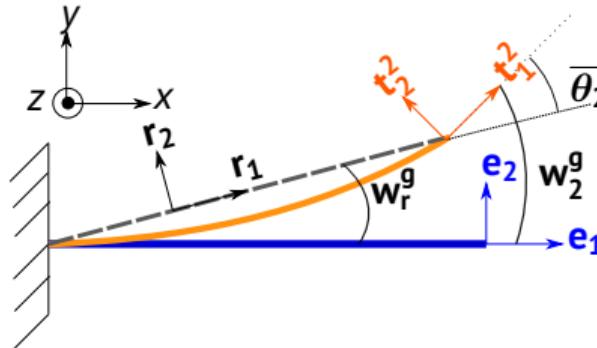
Matriz	Vínculo de sistemas de referencia
$R_0$	$(E_1, E_2, E_3) \rightarrow (e_1, e_2, e_3)$
$R_i^g$	$(e_1, e_2, e_3) \rightarrow (t_1^i, t_2^i, t_3^i)$
$R_i$	$(r_1, r_2, r_3) \rightarrow (t_1^i, t_2^i, t_3^i)$
$R_r$	$(t_1^i, t_2^i, t_3^i) \rightarrow (r_1, r_2, r_3)$

¿Cómo calcular  $\bar{R}_i$ ?

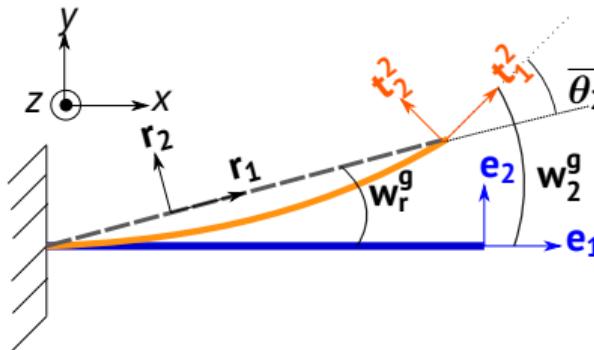
$$R_i^g R_o = R_r \bar{R}_i \quad (6)$$

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

## Iteración corrotacional en ONSAS:

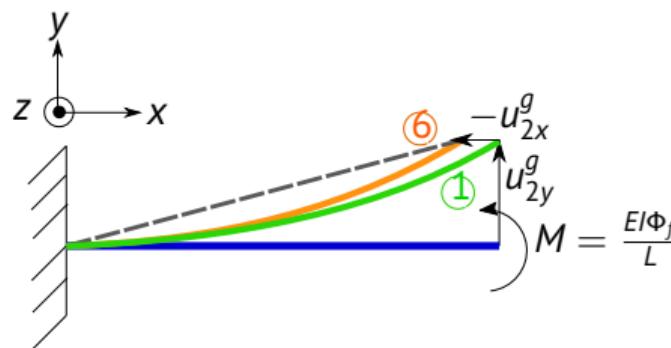


# Iteración corrotacional en ONSAS:



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

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

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

**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

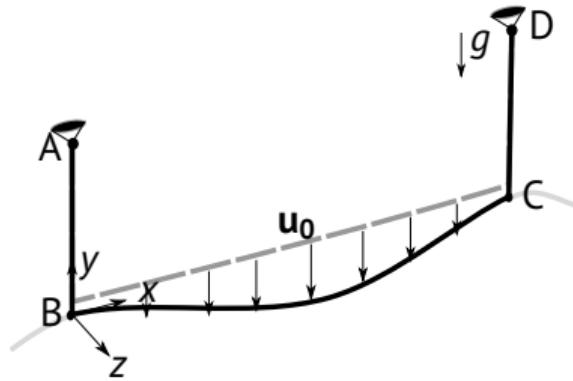
- Modelado estructural
- Modelo de viento

## Resultados Numéricos

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

## Conclusiones

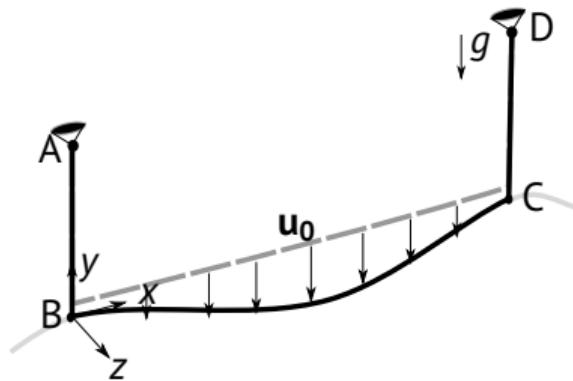
# Modelado estructural de las líneas:



## Hipótesis:

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

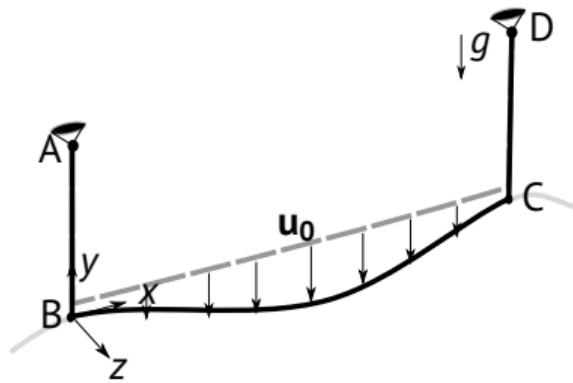
## Modelado estructural de las líneas:



### Hipótesis:

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

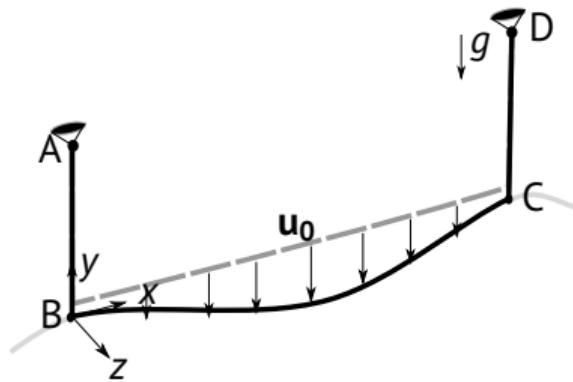
## Modelado estructural de las líneas:



### 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.

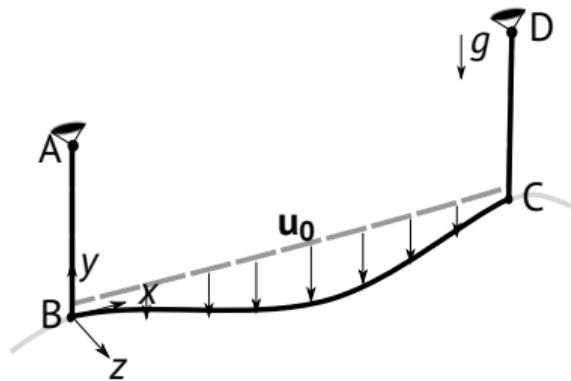
## Modelado estructural de las líneas:



### 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

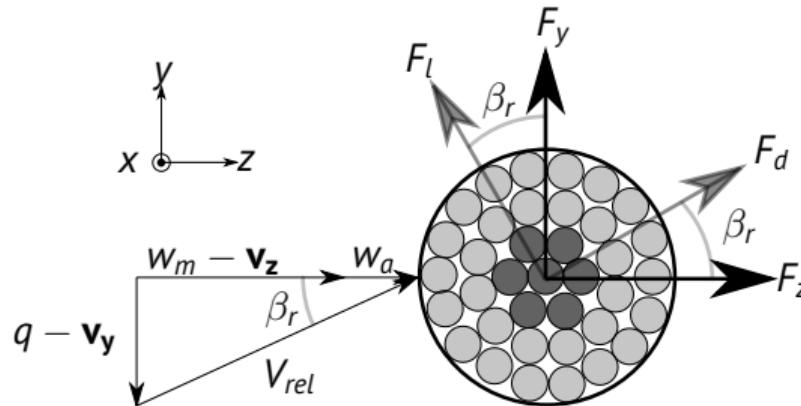


Figura: Esquema en sistema de referencias relativo.

## Hipótesis de viento

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

## Modelado de viento

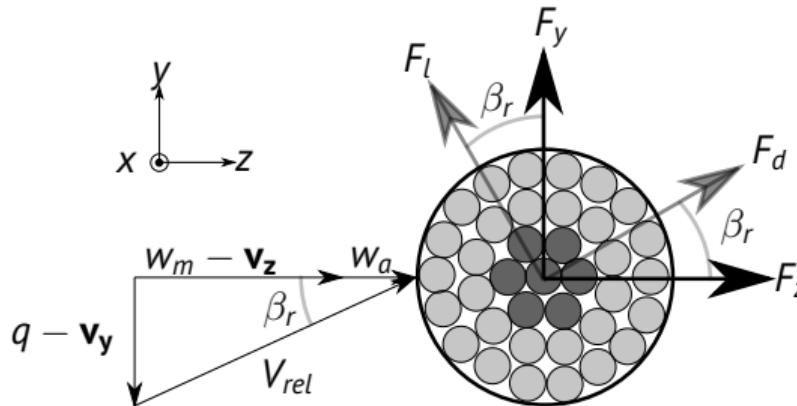


Figura: Esquema en sistema de referencias relativo.

## 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

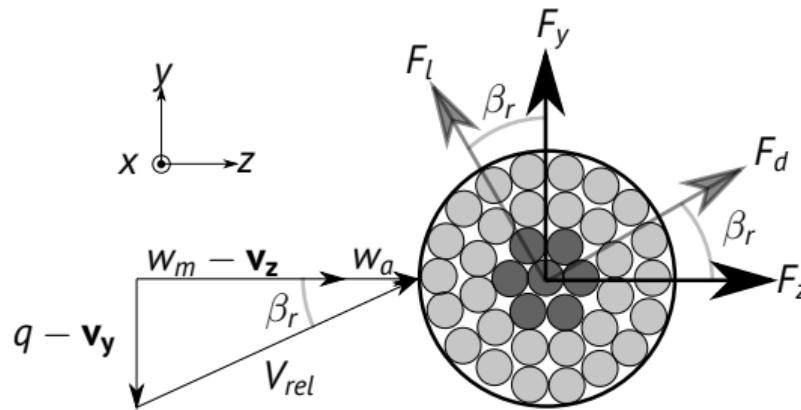


Figura: Esquema en sistema de referencias relativos.

## 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

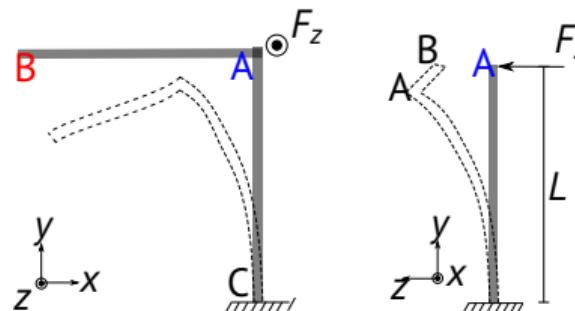
- Modelado estructural
- Modelo de viento

## Resultados Numéricos

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

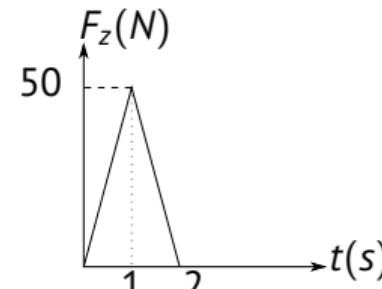
## Conclusiones

## Viga en voladizo con ángulo recto:

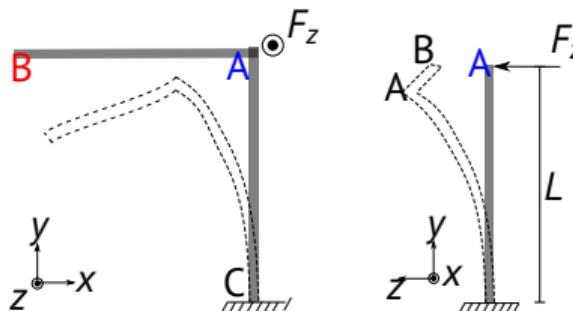


(a) Vista frontal

(b) Vista lateral



## Viga en voladizo con ángulo recto:

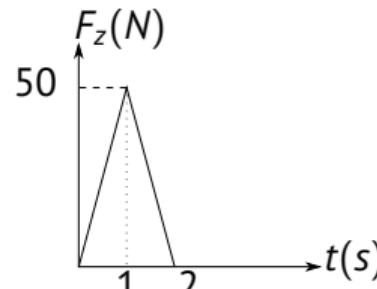


(c) Vista frontal

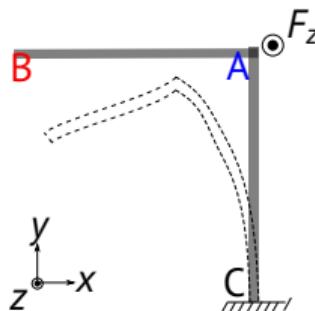
(d) Vista lateral

### Propiedades y dimensiones:

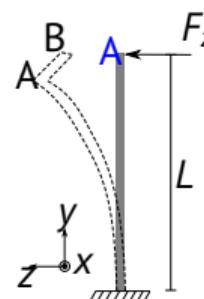
- $GA = EA = 10^6$  y  $GJ = EI = 10^3$ .
- $L = 10$ .



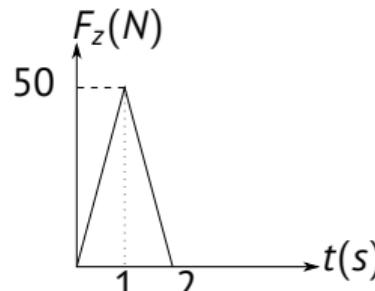
## Viga en voladizo con ángulo recto:



(e) Vista frontal



(f) Vista lateral



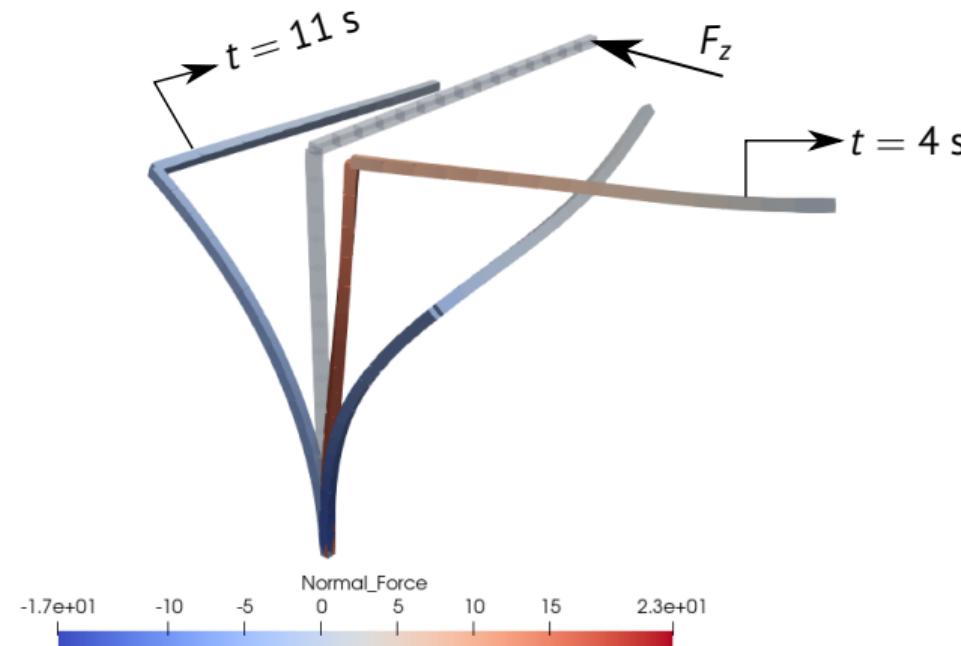
### Propiedades y dimensiones:

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

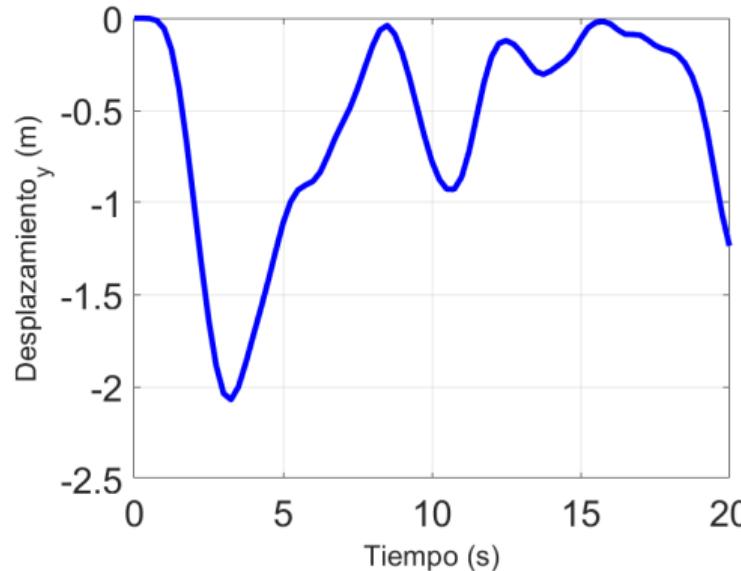
### Parámetros computacionales:

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

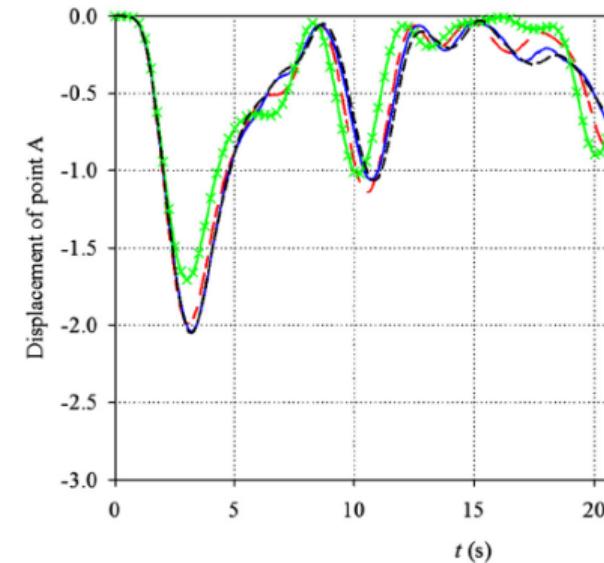
## Viga en voladizo con ángulo recto:



## Validación nodo A:



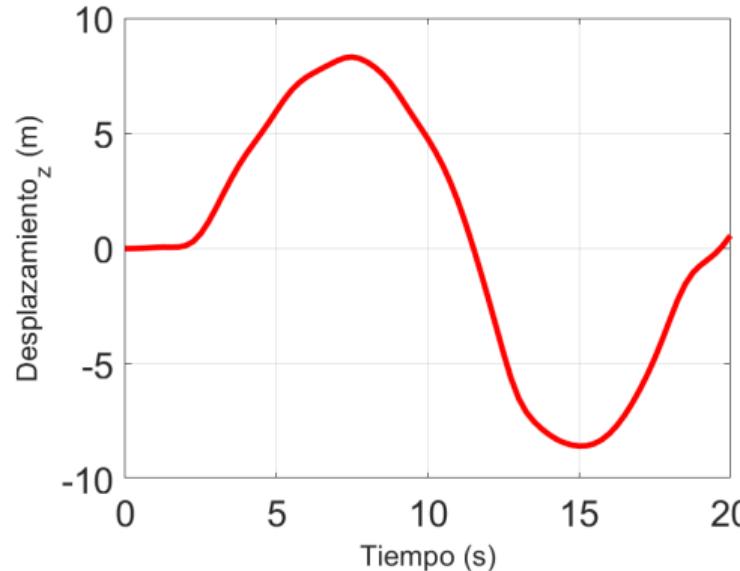
(g) Desplazamiento vertical de A según y



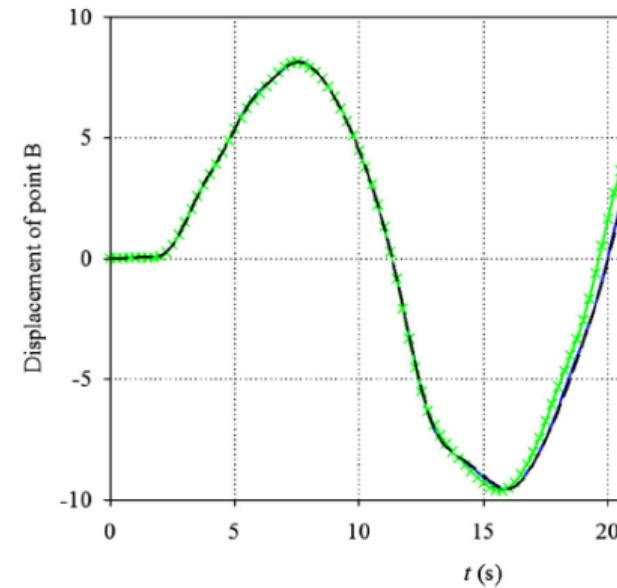
(h) Desplazamiento vertical de A según y por [\(Le,2014\)](#)

**Figura:** Comparación desplazamientos del nodo A.

## Validación del nodo B:



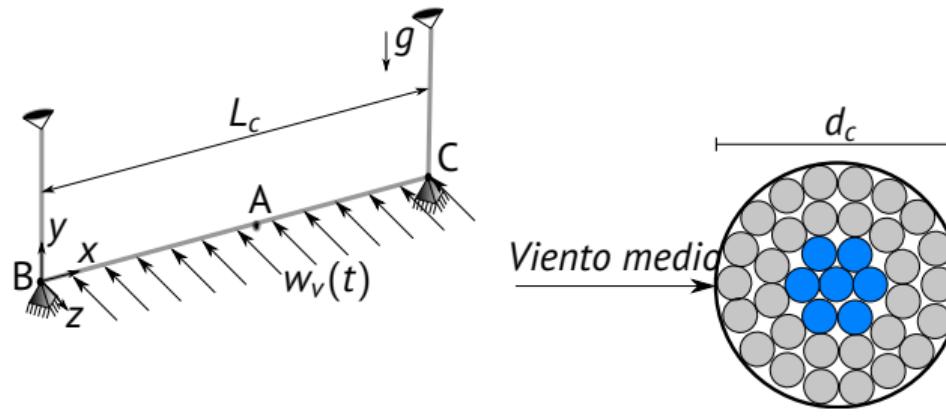
(a) Desplazamiento vertical de B según z



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

Figura: Comparación desplazamientos del nodo B.

## Modelo simplificado de una línea:

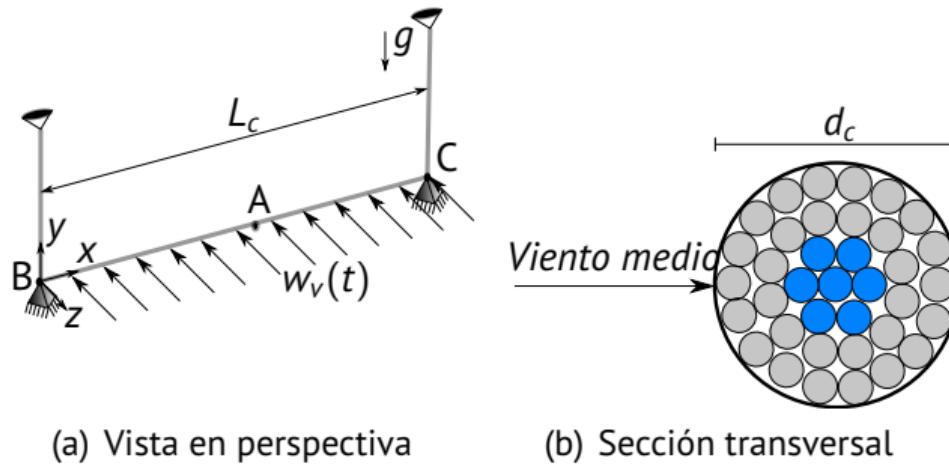


(a) Vista en perspectiva

(b) Sección transversal

Figura: Disposición geométrica de la línea.

## Modelo simplificado de una línea:



(a) Vista en perspectiva

(b) Sección transversal

### Propiedades y dimensiones:

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

**Figura:** Disposición geométrica de la línea.

## Modelo simplificado de una línea:

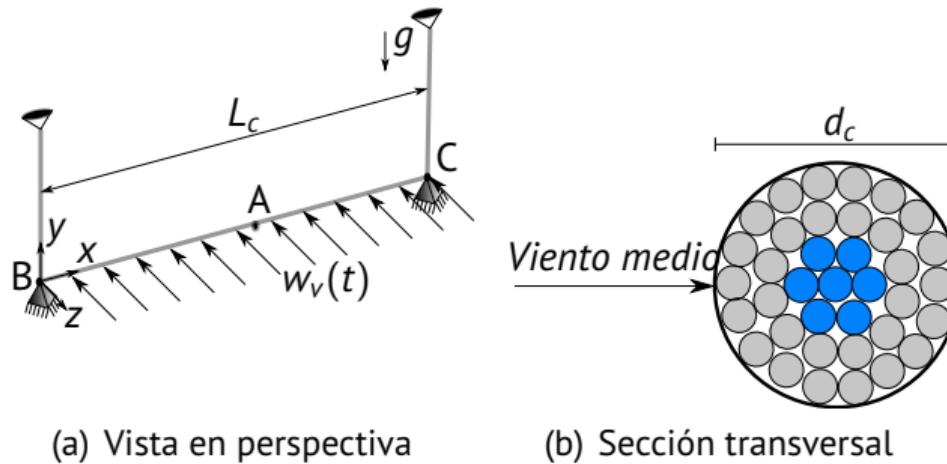


Figura: Disposición geométrica de la línea.

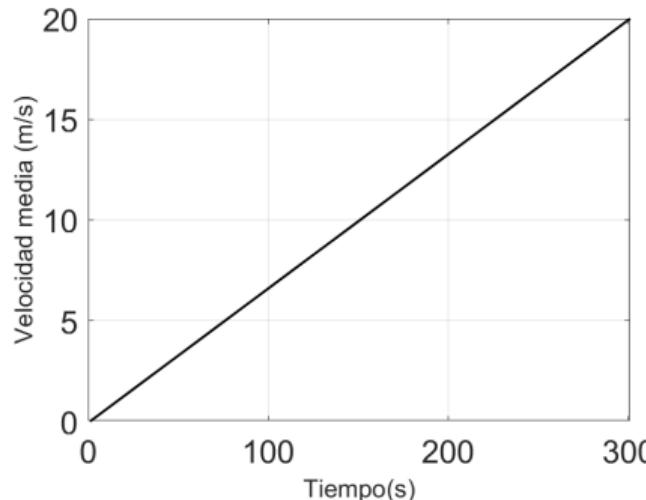
### Propiedades y dimensiones:

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

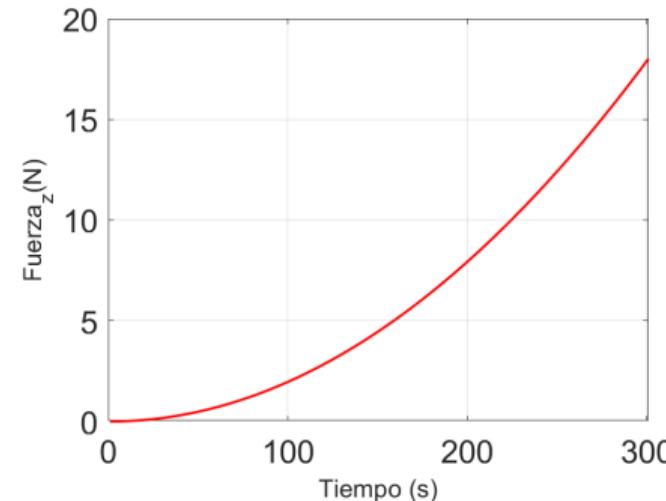
### Parámetros computacionales:

- $\alpha_{HHT} = -0,1$
- 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:



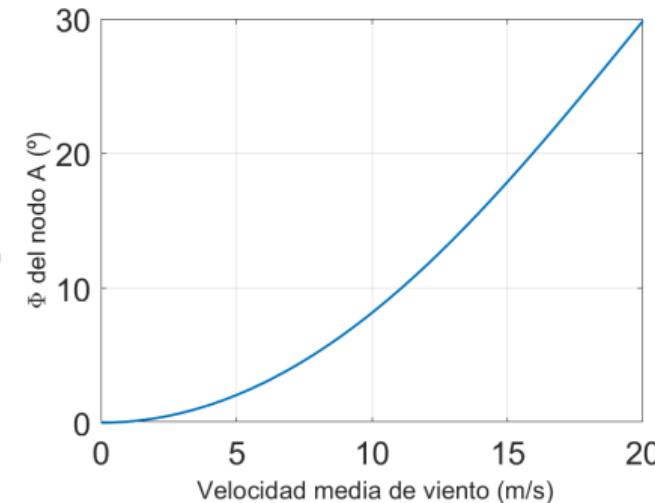
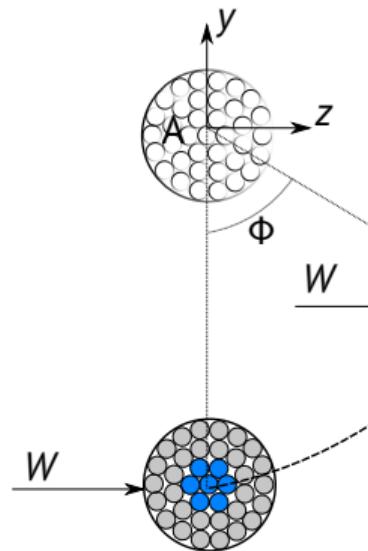
(a) Perfil de velocidad en z



(b) Perfil de fuerza en z

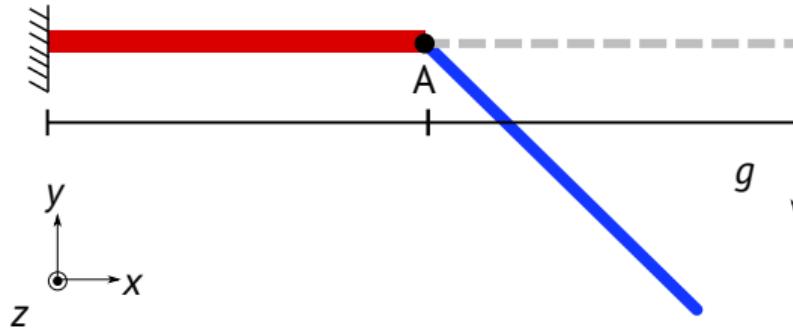
**Figura:** Perfil de viento aplicado en z.

## Ángulo de balanceo:

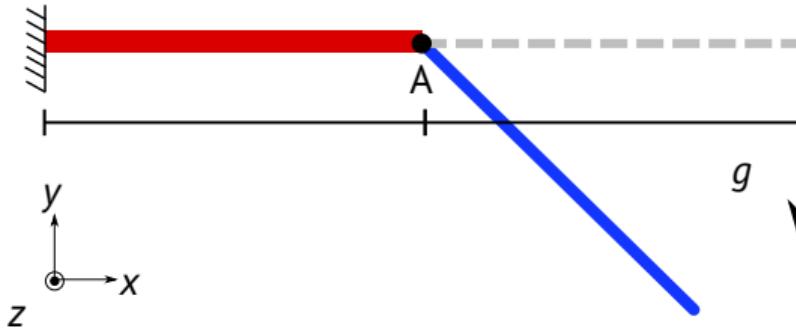


(a) Esquema del ángulo de control  $\Phi$ . (b) Ángulo de balanceo  $\Phi$  en función de la velocidad media  $W(t)$ .

## Viga en voladizo con péndulo:



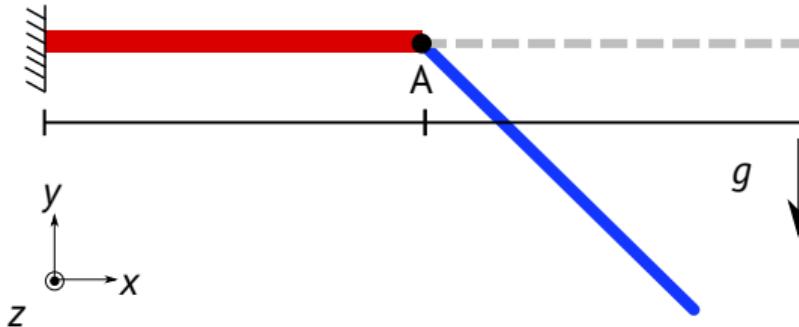
## Viga en voladizo con péndulo:



### Propiedades y dimensiones:

- **Truss (T):**  $L = 3,04 \text{ m}$   $EA_t = 100$  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:



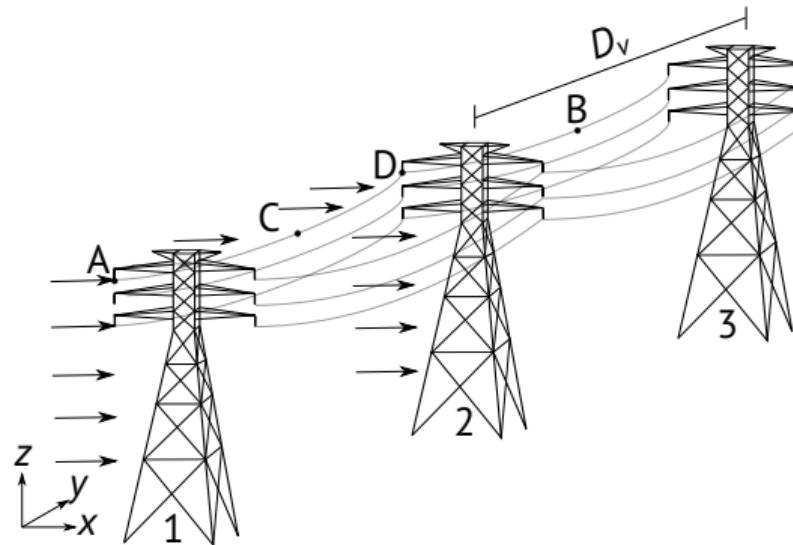
### Propiedades y dimensiones:

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

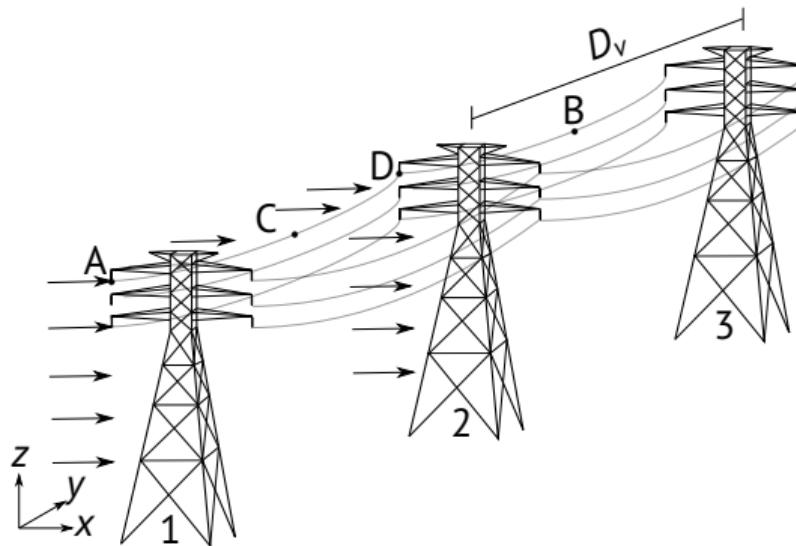
### Parámetros computacionales:

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

# Sistema de transmisión:



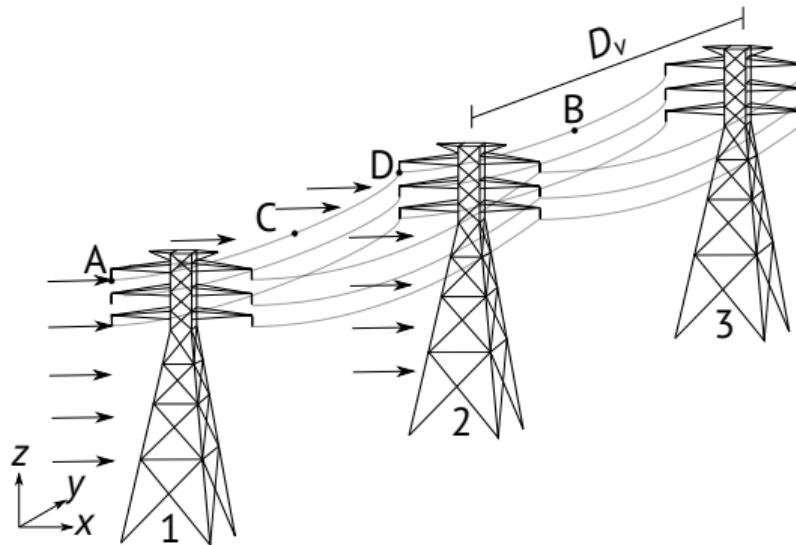
# Sistema de transmisión:



## 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:



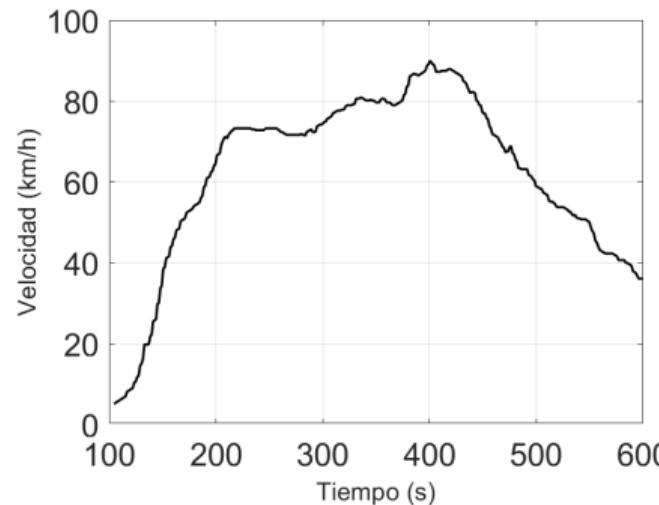
## Propiedades y dimensiones:

- 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  $L_3 = 39 \text{ m}$

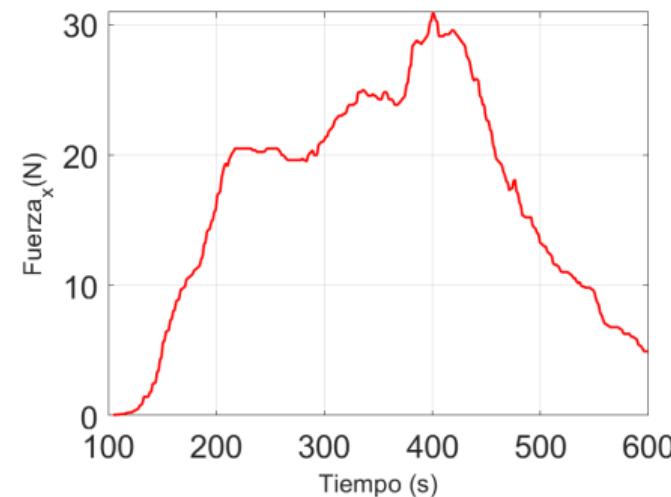
## Parámetros computacionales:

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

## Acción del viento:



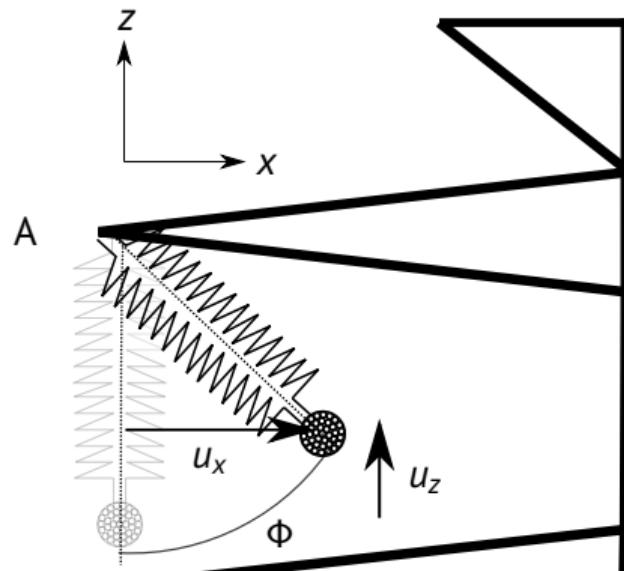
(c) Perfil de velocidad de viento en z



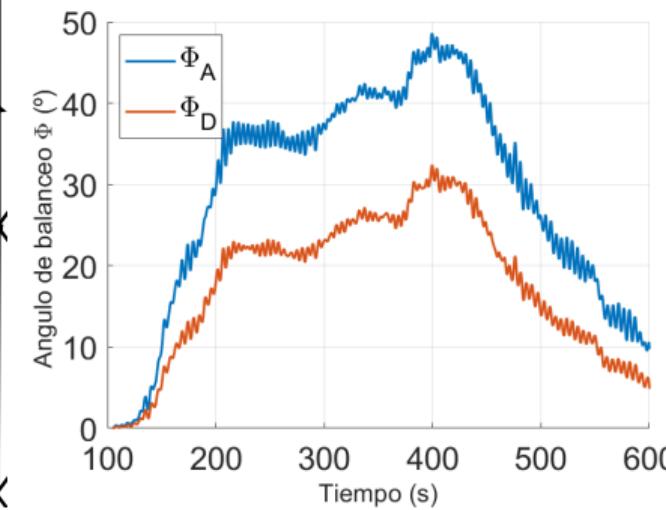
(d) Carga aplicada sobre los nodos

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

## Resultados ángulo de balanceo:



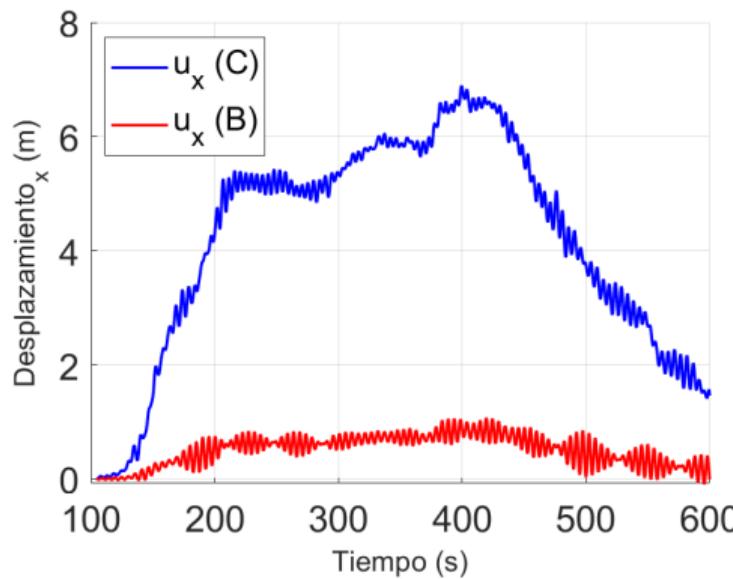
(a) Ilustración del ángulo de balanceo  
 $\Phi$



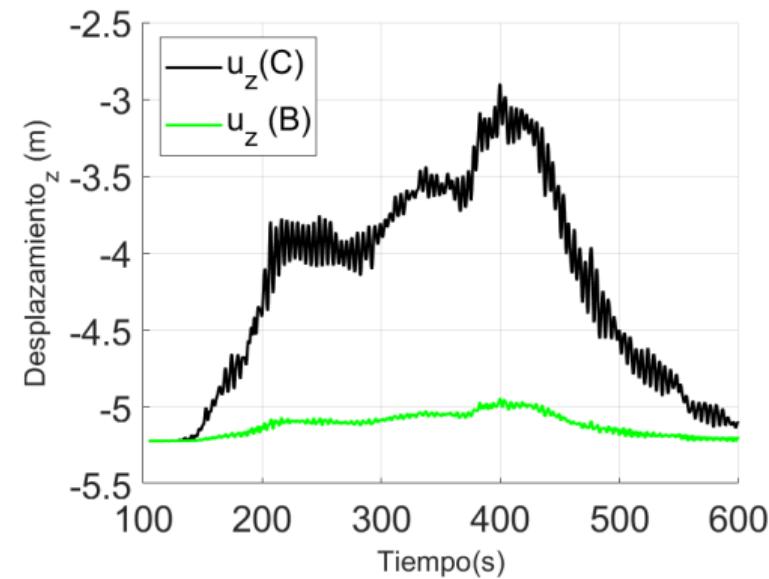
(b) Perfil de velocidades en  $z$  según (Sten-  
gel,2017)

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 .

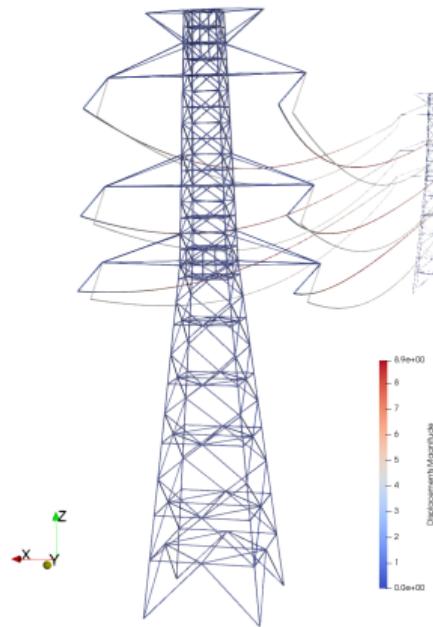
## Trabajos a futuro

- 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.

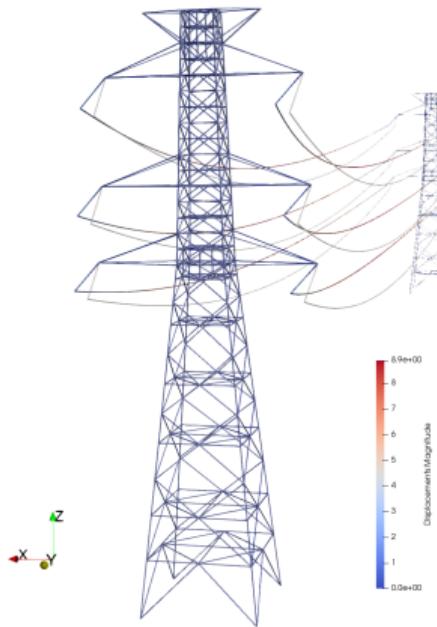
## Trabajos a futuro

- 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.