UNIVERSIDADE DA CORUÑA Escuela Politécnica Superior

Análisis de Vibraciones en Ascensores

Autor: Alberto Veiga Rama
Tutor: Javier Cuadrado Aranda

ÍNDICE

- Introducción.
- Método de las fuerzas.
- Método de las Coordenadas Nodales Absolutas, ANC.
- Resultados.
- Conclusiones.

Análisis de Vibraciones en Ascensores

Índice

- Introducción.
- Método de las fuerzas.
- Método de las Coordenadas Nodales Absolutas, ANC.
- Resultados.
- Conclusiones.

Análisis de Vibraciones en Ascensores

Introducción

- Motivación del proyecto.

Línea de investigación: mejora del confort en ascensores.

- Desarrollo de modelos de simulación mediante EF que permitan analizar las vibraciones de la instalación.

Laboratorio de Ingeniería Mecánica de la E.P.S.

- Aplicación de los métodos de dinámica multicuerpo.

- Objetivos.

  - Desarrollar modelos más eficientes de simulación que permitan analizar las vibraciones de la instalación.

    - Método de las fuerzas .
    - Método de las Coordenadas Nodales Absolutas, ANC.

Introducción

- Aplicabilidad de métodos de dinámica multicuerpo.
  - Sólidos rígidos: Coordenadas naturales.
  - Sólidos flexibles: Formulación en coordenadas nodales absolutas, ANCF.

  - Método de las fuerzas $\Rightarrow$ COORDENADAS NATURALES

  - Método ANCF $\Rightarrow$ COORDENADAS NATURALES + ANC

Introducción

- Descripción del modelo real.
  - Ascensor eléctrico de tipo mochila sin cuarto de máquinas:
    - B+4 plantas (5 paradas).
    - Máquina sobre las guías, sin cuarto de máquinas.
    - Chasis tipo mochila:
      - P = 564 kg Q = 1016 kg.
      - Separación de las guías = 1.1m, tiro descentrado.
    - Contrapeso:
      - P+Q/2 = 1072 kg.
      - Separación de las guías = 0.5 m, tiro centrado.
    - 5 cables de diámetro 10mm de composición 8x19+1 seale:
      - Modulo de Young = 1.5e11 N/m^2.
      - Coeficiente de Poisson = 0.3.
      - Densidad = 5095 kg/m^3.

Análisis de Vibraciones en Ascensores

Introducción

- Descripción del modelo real.
  - Ascensor eléctrico de tipo mochila sin cuarto de máquinas:
    - Guías (normalizadas):
      - Cabina T90.
      - Contrapeso T70.
    - Polea de diámetro 0.4m:
      - Garganta de entalla, $\gamma=30^{\circ}$ y $\beta=97^{\circ}$.
      - Coeficiente de fricción aproximado, $\mu = 0.12$.
    - Velocidad nominal : 1 m/s.
    - Arranque y frenado en 1.5 s.

Índice

- Introducción.
- Método de las fuerzas.
- Método de las Coordenadas Nodales Absolutas, ANC.
- Resultados.
- Conclusiones.

MÉTODO DE LAS FUERZAS

- Coordenadas naturales
  - Coordenadas dependientes:

nº restricciones = nº coordenadas – nº g.d.l.

Coordenadas naturales
- coordenadas cartesianas de puntos
- componentes cartesianas de vectores unitarios

se ubican fundamentalmente en los pares cinemáticos para definir simultáneamente elementos y pares

Ecuaciones de restricción
- condiciones de sólido rígido de los elementos
- compatibilidad entre variables en algunos pares cinemáticos

MÉTODO DE LAS FUERZAS

- Descripción del modelo de fuerzas.

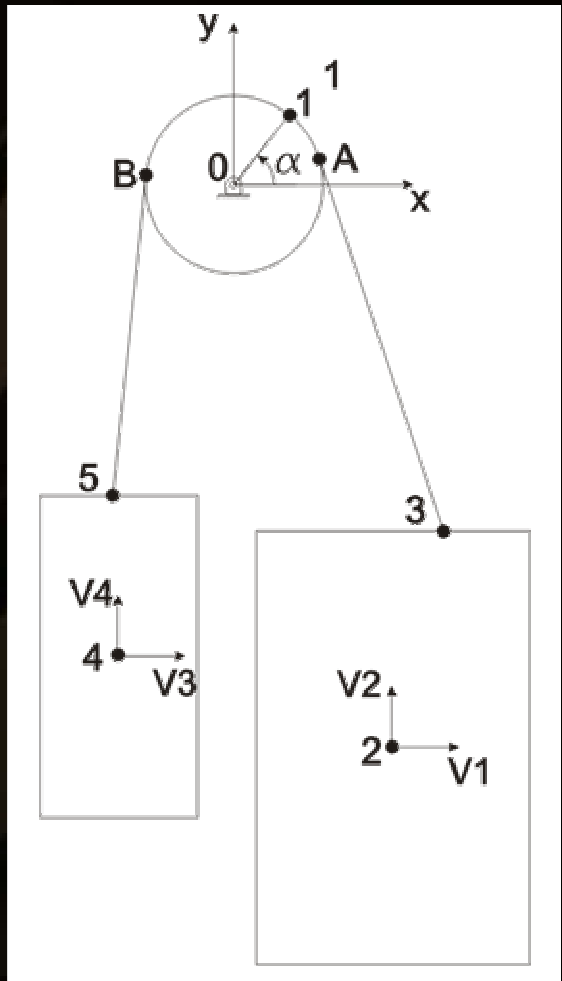
19 coordenadas:

$$\mathbf{q}^t = \{\mathbf{x}_1\ \mathbf{y}_1\ \mathbf{x}_2\ \mathbf{y}_2\ \mathbf{v}_{1x}\ \mathbf{v}_{1y}\ \mathbf{v}_{2x}\ \mathbf{v}_{2y}\ \mathbf{x}_3\ \mathbf{y}_3\ \mathbf{x}_4\ \mathbf{y}_4\ \mathbf{v}_{3x}\ \mathbf{v}_{3y}\ \mathbf{v}_{4x}\ \mathbf{v}_{4y}\ \mathbf{x}_5\ \mathbf{y}_5\ \alpha\}$$

18 ecuaciones de restricción, Φ:

$$(x_1-x_0)^2+(y_1-y_0)^2-r^2=0$$
$$x_3-x_2-x_{3L}v_{1x}-y_{3L}v_{2x}=0$$
$$y_3-y_2-x_{3L}v_{1y}-y_{3L}v_{2y}=0$$
$$x_5-x_4-x_{5L}v_{3x}-y_{5L}v_{4x}=0$$
$$y_5-y_4-x_{5L}v_{3y}-y_{5L}v_{4y}=0$$
$$x_1-x_0-r\cos\alpha=0$$
$$y_1-y_0-r\sin\alpha=0$$
$$x_2-x_{cdgA}=0$$
$$x_4-x_{cdgC}=0$$

$$v_{1x}^{\ 2}+v_{1y}^{\ 2}-1=0$$
$$v_{2x}^{\ 2}+v_{2y}^{\ 2}-1=0$$
$$v_{3x}^{\ 2}+v_{3y}^{\ 2}-1=0$$
$$v_{4x}^{\ 2}+v_{4y}^{\ 2}-1=0$$
$$v_{1x}v_{2x}+v_{1y}v_{2y}=0$$
$$v_{3x}v_{4x}+v_{3y}v_{4y}=0$$
$$v_{1y}=0$$
$$v_{3y}=0$$
$$\alpha-\alpha(t)=0$$

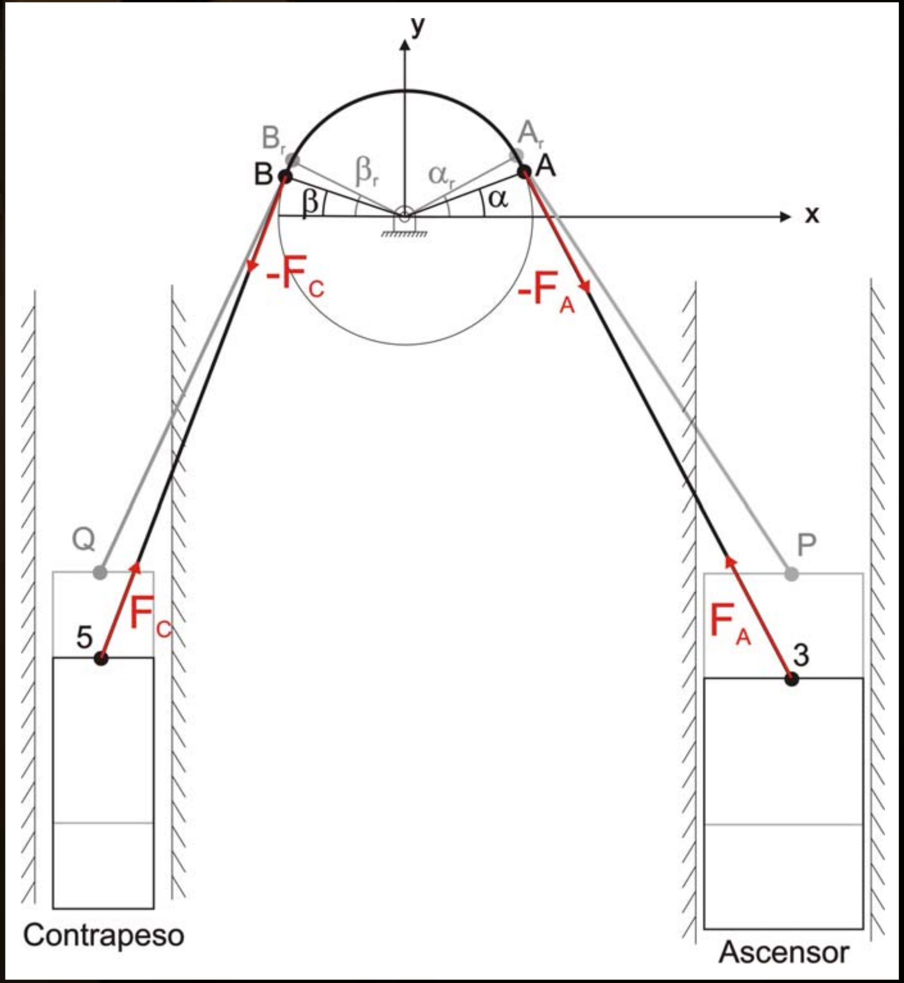


Análisis de Vibraciones en Ascensores

Método de las fuerzas

- Modelizado de los cables.

ASCENSOR	CONTRAPESO
$\mathbf{f}_a = k_a \delta_a \dfrac{\mathbf{r_A} - \mathbf{r_3}}{L}$	$\mathbf{f}_c = k_c \delta_c \dfrac{\mathbf{r_B} - \mathbf{r_5}}{L}$
$k_a = \dfrac{EA}{L}$	$k_c = \dfrac{EA}{L}$
$\delta_a = d_{A3} - d_{ArP}$	$\delta_c = d_{B5} - d_{BrQ}$



Análisis de Vibraciones en Ascensores

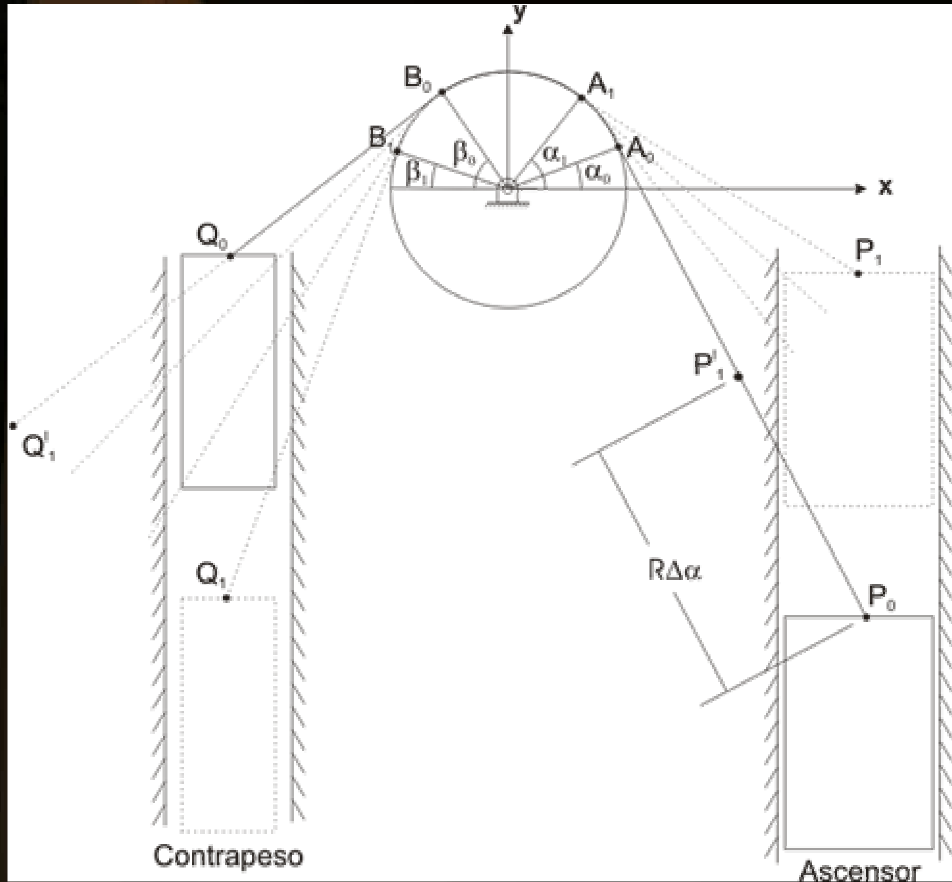
Método de las fuerzas

- Problema de posición.

$$\overline{P_1A_1} + \overline{A_1B_1} + \overline{B_1Q_1} = L$$

$$\overline{P_1A_1} = \overline{P_0A_0} - R\Delta\alpha + \overline{A_0A_1}$$

$$\overline{Q_1B_1} = \overline{Q_0B_0} + R\Delta\alpha - \overline{B_0B_1}$$



- Método iterativo de Newton-Raphson.

$$\Phi = 0 \quad \rightarrow \quad \Phi_q \Delta q = -\Phi$$

Solución mínimos cuadrados $\quad \Phi_q^T \Phi_q \Delta q = -\Phi_q^T \Phi$

$$\Phi = \begin{Bmatrix} \sqrt{(x_{P_1} - x_{A_1})^2 + (y_{P_1} - y_{A_1})^2} + R(180^o - \alpha_1 - \beta_1) + \sqrt{(x_{Q_1} - x_{B_1})^2 + (y_{Q_1} - y_{B_1})^2} - L \\ \sqrt{(x_{P_1} - x_{A_1})^2 + (y_{P_1} - y_{A_1})^2} - \sqrt{(x_{P_0} - x_{A_0})^2 + (y_{P_0} - y_{A_0})^2} + R\alpha - R(\alpha_1 - \alpha_0) \\ \sqrt{(x_{Q_1} - x_{B_1})^2 + (y_{Q_1} - y_{B_1})^2} - \sqrt{(x_{Q_0} - x_{B_0})^2 + (y_{Q_0} - y_{B_0})^2} - R\alpha + R(\beta_1 - \beta_0) \end{Bmatrix}$$

Análisis de Vibraciones en Ascensores

Método de las fuerzas

- Problema dinámico.

Ecuaciones de Lagrange en coordenadas dependientes:

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\mathbf{q}}}\right) - \frac{\partial T}{\partial \mathbf{q}} + \boldsymbol{\Phi}_{\mathbf{q}}^{t}\boldsymbol{\lambda} = \mathbf{Q}$$

$\boldsymbol{\Phi}_{\mathbf{q}}^{t}\boldsymbol{\lambda}$ esfuerzos requeridos para mantener las restricciones entre **q**

$$T = \frac{1}{2}\dot{\mathbf{q}}^{t}\mathbf{M}\dot{\mathbf{q}}$$

$$\left.\begin{aligned} &\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \boldsymbol{\Phi}_{\mathbf{q}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\lambda} = \mathbf{Q} \\ &\boldsymbol{\Phi} = \mathbf{0} \end{aligned}\right\}$$

sistema de ecuaciones diferenciales-algebraicas (DAE’s)

Método de las fuerzas

- Problema dinámico.
  - Ecuaciones dinámicas:

    Lagrange aumentado

    $$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{\Phi}_{\mathbf{q}}^{\mathrm{T}} \alpha \mathbf{\Phi} + \mathbf{\Phi}_{\mathbf{q}}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\lambda}^{*} = \mathbf{Q}$$

    index-3 con proyecciones

    $$\boldsymbol{\lambda}_{i+1}^{*} = \boldsymbol{\lambda}_{i}^{*} + \alpha \mathbf{\Phi}_{i+1}, i = 0,1,2,\ldots$$

  - Integrador numérico:

    Integrador disipativo de Newmark

    $$\dot{\mathbf{q}}_{n+1} = \frac{1}{\gamma \Delta t}\mathbf{q}_{n+1} + \hat{\dot{\mathbf{q}}}_{n} \quad \text{con} \quad \hat{\dot{\mathbf{q}}}_{n} = -\left(\frac{1}{\gamma \Delta t}\mathbf{q}_{n} + \dot{\mathbf{q}}_{n}\right)$$

    $$\ddot{\mathbf{q}}_{n+1} = \frac{1}{\beta \Delta t^{2}}\mathbf{q}_{n+1} + \hat{\ddot{\mathbf{q}}}_{n} \quad \text{con} \quad \hat{\ddot{\mathbf{q}}}_{n} = -\left(\frac{1}{\beta \Delta t^{2}}\mathbf{q}_{n} + \frac{1}{\beta \Delta t}\dot{\mathbf{q}}_{n} + \ddot{\mathbf{q}}_{n}\right)$$

    $$\beta = \frac{(1-\xi)^{2}}{4} \qquad \gamma = \frac{1-2\xi}{2} \qquad -\infty \le \xi \le 0$$

Análisis de Vibraciones en Ascensores

Método de las fuerzas

- Problema dinámico.
  - Ecuaciones dinámicas + integrador numérico:

$$\mathbf{M}\mathbf{q}_{n+1} + \beta\Delta t^2 \boldsymbol{\Phi}_{\mathbf{q}_{n+1}}^{\mathrm{T}} \left(\alpha\boldsymbol{\Phi}_{n+1} + \boldsymbol{\lambda}_{n+1}\right) - \beta\Delta t^2 \mathbf{Q}_{n+1} + \beta\Delta t^2 \mathbf{M}\hat{\ddot{\mathbf{q}}}_n = 0 \Longrightarrow \mathbf{f}\left(\mathbf{q}_{\mathbf{n+1}}\right) = 0$$

NO LINEAL

Método Iterativo de Newton-Raphson

$$\left[\frac{\partial \mathbf{f}(\mathbf{q})}{\partial \mathbf{q}}\right]_i \Delta\mathbf{q}_{i+1} = -\left[\mathbf{f}(\mathbf{q})\right]_i$$

$$\left[\mathbf{f}(\mathbf{q})\right] = \beta\Delta t^2 \left(\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \boldsymbol{\Phi}_{\mathbf{q}}^{\mathrm{T}} \alpha\boldsymbol{\Phi} + \boldsymbol{\Phi}_{\mathbf{q}}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\lambda}^* - \mathbf{Q}\right)$$

$$\left[\frac{\partial \mathbf{f}(\mathbf{q})}{\partial \mathbf{q}}\right] = \mathbf{M} + \gamma\Delta t\mathbf{C} + \beta\Delta t^2 \left(\boldsymbol{\Phi}_{\mathbf{q}}^{\mathrm{T}} \alpha\boldsymbol{\Phi}_{\mathbf{q}} + \mathbf{K}\right)$$

MÉTODO DE LAS FUERZAS

- Problema dinámico.

La solución obtenida para $\mathbf{f}\left(\mathbf{q}_{n+1}\right)=0$

- cumple
  - • ecuaciones de equilibrio dinámico
  - • ecuaciones de restricción $\boldsymbol{\Phi}=0$
- no cumple necesariamente
  - $\dot{\boldsymbol{\Phi}}=0$
  - $\ddot{\boldsymbol{\Phi}}=0$

- Proyección de velocidades

$$\min V=\frac{1}{2}\left(\dot{\mathbf{q}}-\dot{\mathbf{q}}^*\right)^{\mathrm{T}}\mathbf{M}\left(\dot{\mathbf{q}}-\dot{\mathbf{q}}^*\right)$$

$$s.t.\ \ \dot{\boldsymbol{\Phi}}=0$$

$$\left[\mathbf{M}+\gamma\Delta t\mathbf{C}+\beta\Delta t^2\left(\boldsymbol{\Phi}_{\mathbf{q}}^{\mathrm{T}}\alpha\boldsymbol{\Phi}_{\mathbf{q}}+\mathbf{K}\right)\right]\dot{\mathbf{q}}=\mathbf{W}\dot{\mathbf{q}}^*-\beta\Delta t^2\boldsymbol{\Phi}_{\mathbf{q}}^{\mathrm{T}}\alpha\boldsymbol{\Phi}_t$$

- Proyección de aceleraciones

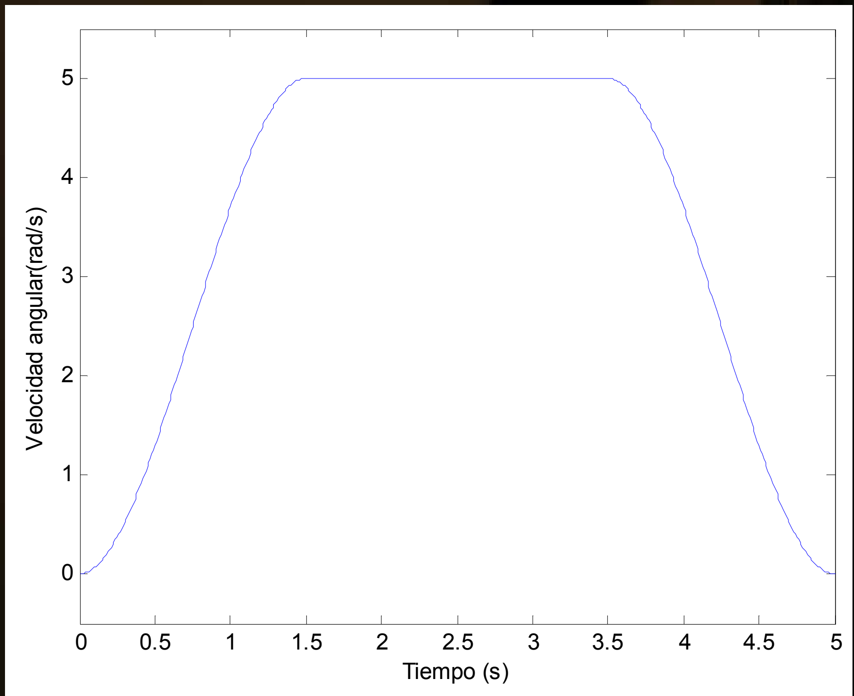
$$\min V=\frac{1}{2}\left(\dot{\mathbf{q}}-\dot{\mathbf{q}}^*\right)^{\mathrm{T}}\mathbf{M}\left(\dot{\mathbf{q}}-\dot{\mathbf{q}}^*\right)$$

$$s.t.\ \ \ddot{\boldsymbol{\Phi}}=0$$

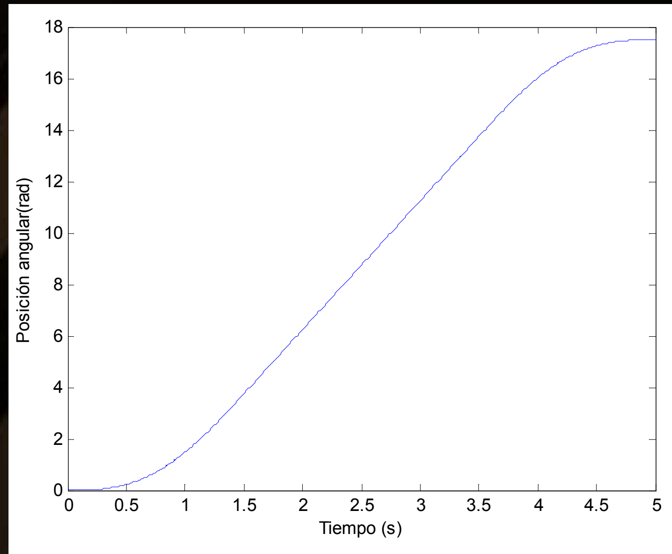
$$\left[\mathbf{M}+\gamma\Delta t\mathbf{C}+\beta\Delta t^2\left(\boldsymbol{\Phi}_{\mathbf{q}}^{\mathrm{T}}\alpha\boldsymbol{\Phi}_{\mathbf{q}}+\mathbf{K}\right)\right]\ddot{\mathbf{q}}=\mathbf{W}\ddot{\mathbf{q}}^*-\beta\Delta t^2\boldsymbol{\Phi}_{\mathbf{q}}^{\mathrm{T}}\alpha\left(\dot{\boldsymbol{\Phi}}_{\mathbf{q}}\dot{\mathbf{q}}+\dot{\boldsymbol{\Phi}}_t\right)$$

MÉTODO DE LAS FUERZAS

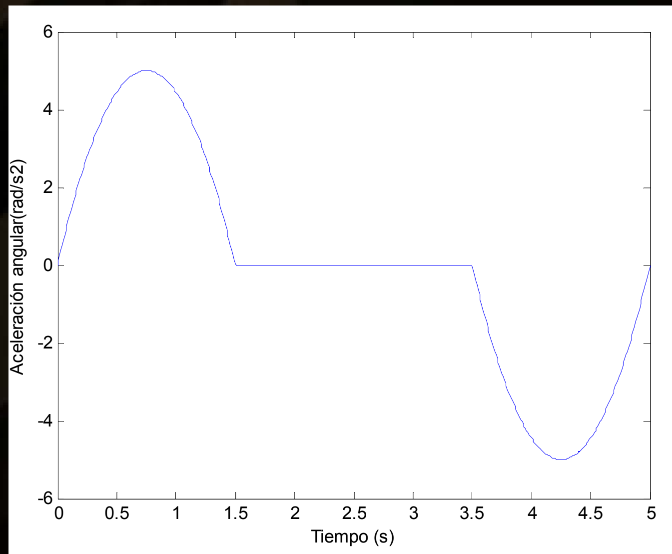
- Funciones de guiado.



integración



derivación



$$\dot{\alpha}(t)=\begin{cases} -\dfrac{16}{27r}t^3+\dfrac{4}{3r}t^2 & 0\le t\le 1.5 \\ \dfrac{1}{r} & 1.5<t\le t_1 \\ \dfrac{16}{27r}(t-t_1)^3-\dfrac{4}{3r}(t-t_1)^2+\dfrac{1}{r} & t_1<t\le t_1+1.5 \end{cases}$$

ÍNDICE

- Introducción.
- Método de las fuerzas.
- Método de las Coordenadas Nodales Absolutas, ANC.
- Resultados.
- Conclusiones.

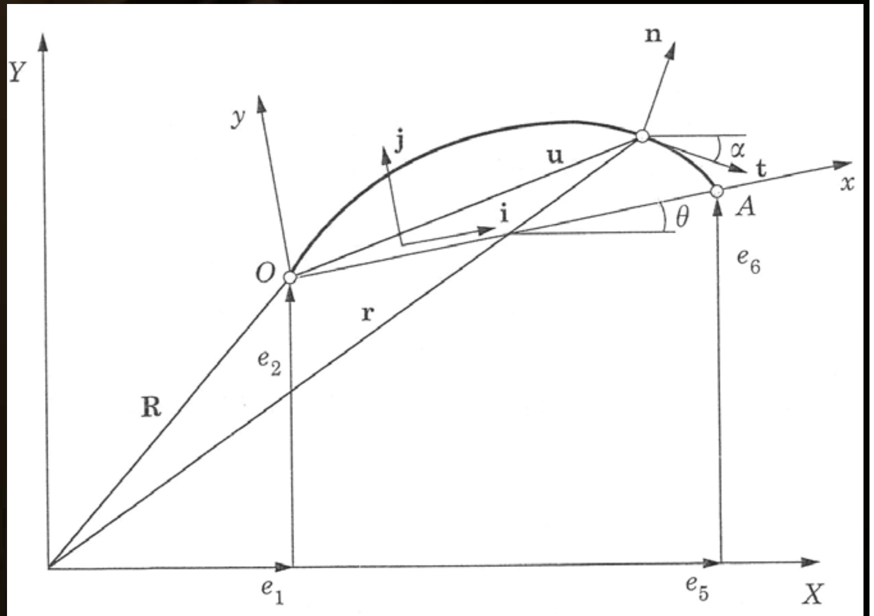
Análisis de Vibraciones en Ascensores

Método ANCF

- Coordenadas nodales absolutas.

$$\mathbf{r} = \begin{bmatrix} r_x \\ r_y \end{bmatrix} = \mathbf{Se}$$

- Elemento viga tipo Euler-Bernoulli.



Vector de coordenadas nodales.

$$\mathbf{e} = \begin{bmatrix} e_1 & e_2 & e_3 & e_4 & e_5 & e_6 & e_7 & e_8 \end{bmatrix}^T$$

$$e_1 = r_x(x=0), \quad e_2 = r_y(x=0), \quad e_3 = \frac{\partial r_x(x=0)}{\partial x}, \quad e_3 = \frac{\partial r_y(x=0)}{\partial x},$$

$$e_5 = r_x(x=l), \quad e_6 = r_y(x=l), \quad e_7 = \frac{\partial r_x(x=l)}{\partial x}, \quad e_8 = \frac{\partial r_y(x=l)}{\partial x}$$

Función de forma.

$$\mathbf{S}^{ij} = \begin{bmatrix} 1-3\xi^2+2\xi^4 & 0 & l\left(\xi-2\xi^2+\xi^3\right) & 0 & 3\xi^2-2\xi^3 & 0 & l\left(\xi^2-2\xi^3\right) & 0 \\ 0 & 1-3\xi^2+2\xi^4 & 0 & l\left(\xi-2\xi^2+\xi^3\right) & 0 & 3\xi^2-2\xi^3 & 0 & l\left(\xi^2-2\xi^3\right) \end{bmatrix}$$

Análisis de Vibraciones en Ascensores

Método ANCF

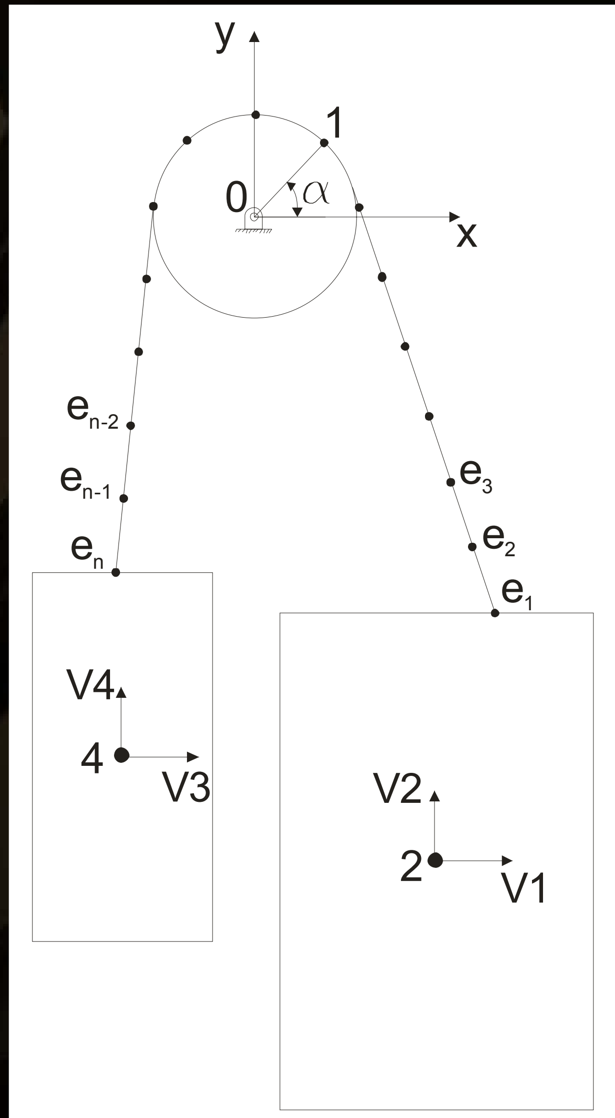
- Descripción del modelo ANCF.

4xNº$_{nodos}$+15 coordenadas:

$$\mathbf{q}^t = \left\{ \mathbf{e}_1^1\ \mathbf{e}_2^1\ \mathbf{e}_3^1\ \mathbf{e}_4^1\ \ldots\ldots \mathbf{e}_1^n\ \mathbf{e}_2^n\ \mathbf{e}_3^n\ \mathbf{e}_4^n \;\middle|\; \mathbf{x}_1\ \mathbf{y}_1\ \mathbf{x}_2\ \mathbf{y}_2\ \mathbf{v}_{1x}\ \mathbf{v}_{1y}\ \mathbf{v}_{2x}\ \mathbf{v}_{2y}\ \mathbf{x}_4\ \mathbf{y}_4\ \mathbf{v}_{3x}\ \mathbf{v}_{3y}\ \mathbf{v}_{4x}\ \mathbf{v}_{4y}\ \alpha \right\}$$

18 ecuaciones de restricción, Φ:

$$\begin{array}{cc}
(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 - r^2 = 0 & {v_{1x}}^2 + {v_{1y}}^2 - 1 = 0 \\
e_{1x} - x_2 - x_{3L} v_{1x} - y_{3L} v_{2x} = 0 & {v_{2x}}^2 + {v_{2y}}^2 - 1 = 0 \\
e_{1y} - y_2 - x_{3L} v_{1y} - y_{3L} v_{2y} = 0 & {v_{3x}}^2 + {v_{3y}}^2 - 1 = 0 \\
e_{nx} - x_4 - x_{5L} v_{3x} - y_{5L} v_{4x} = 0 & {v_{4x}}^2 + {v_{4y}}^2 - 1 = 0 \\
e_{ny} - y_4 - x_{5L} v_{3y} - y_{5L} v_{4y} = 0 & v_{1x} v_{2x} + v_{1y} v_{2y} = 0 \\
x_1 - x_0 - r\cos\alpha = 0 & v_{3x} v_{4x} + v_{3y} v_{4y} = 0 \\
y_1 - y_0 - r\sin\alpha = 0 & v_{1y} = 0 \\
x_2 - x_{cdgA} = 0 & v_{3y} = 0 \\
x_4 - x_{cdgC} = 0 & \alpha - \alpha(t) = 0
\end{array}$$



Método ANCF

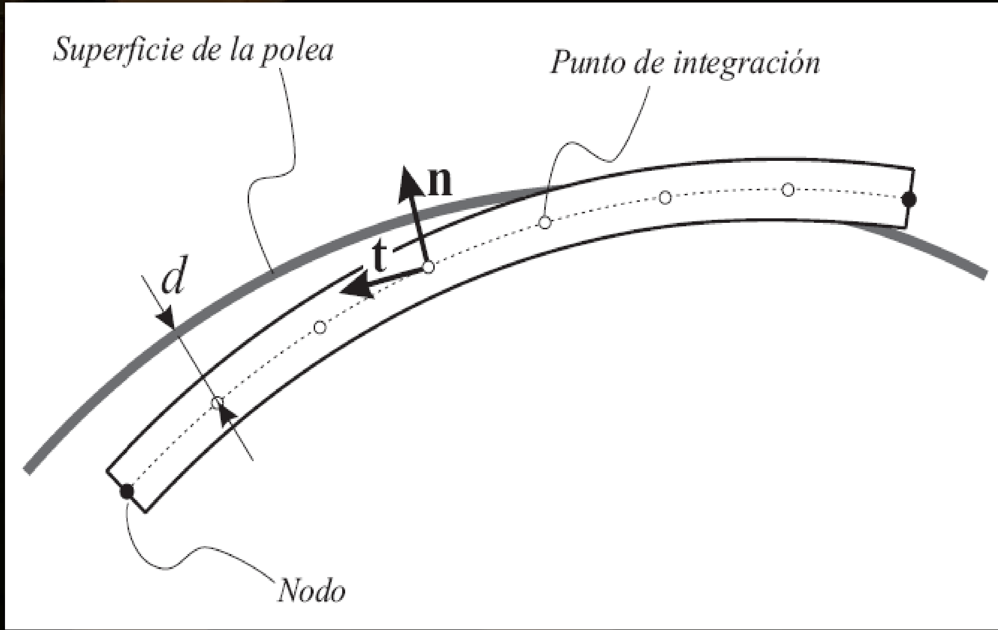
- Contacto cable-polea.

  - Fuerza normal.

$$d = R - \sqrt{(\mathbf{r}-\mathbf{r}_0)^T(\mathbf{r}-\mathbf{r}_0)}$$

$$\mathbf{f}_n = \begin{cases} (k_p d + c_p \dot{d})\mathbf{n}, & d \geq 0 \\ \mathbf{0}, & d < 0 \end{cases}$$

$$\mathbf{n} = \frac{\mathbf{r}-\mathbf{r}_0}{\sqrt{(\mathbf{r}-\mathbf{r}_0)^T(\mathbf{r}-\mathbf{r}_0)}}$$

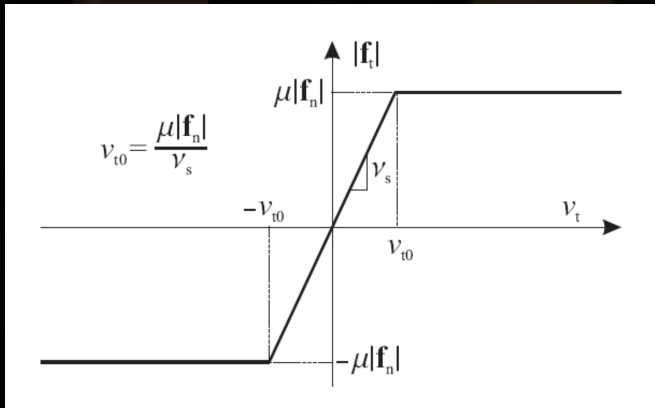


  - Fuerza tangencial.

$$\mathbf{f}_t = -\mu(v_t)|\mathbf{f}_n|\mathbf{t}$$

$$v_t = \mathbf{t}^T(\dot{\mathbf{r}} - \omega R \mathbf{t})$$

$$\mathbf{t} = \tilde{\mathbf{I}}\mathbf{n}$$

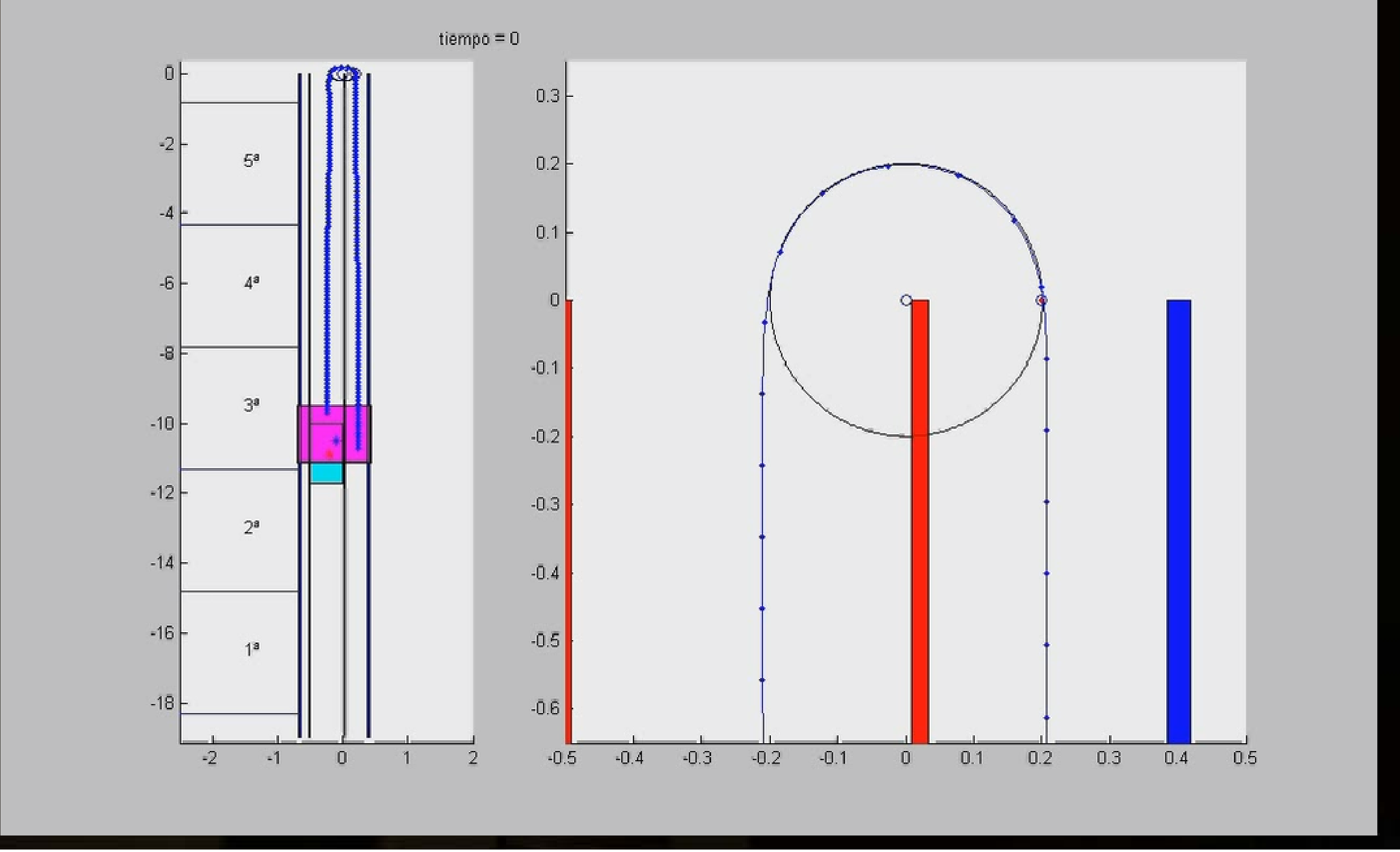


Ley de fricción trilineal (Leamy y Wasfy)

Integración a lo largo del elemento: Cuadratura de Gauss-Legendre.

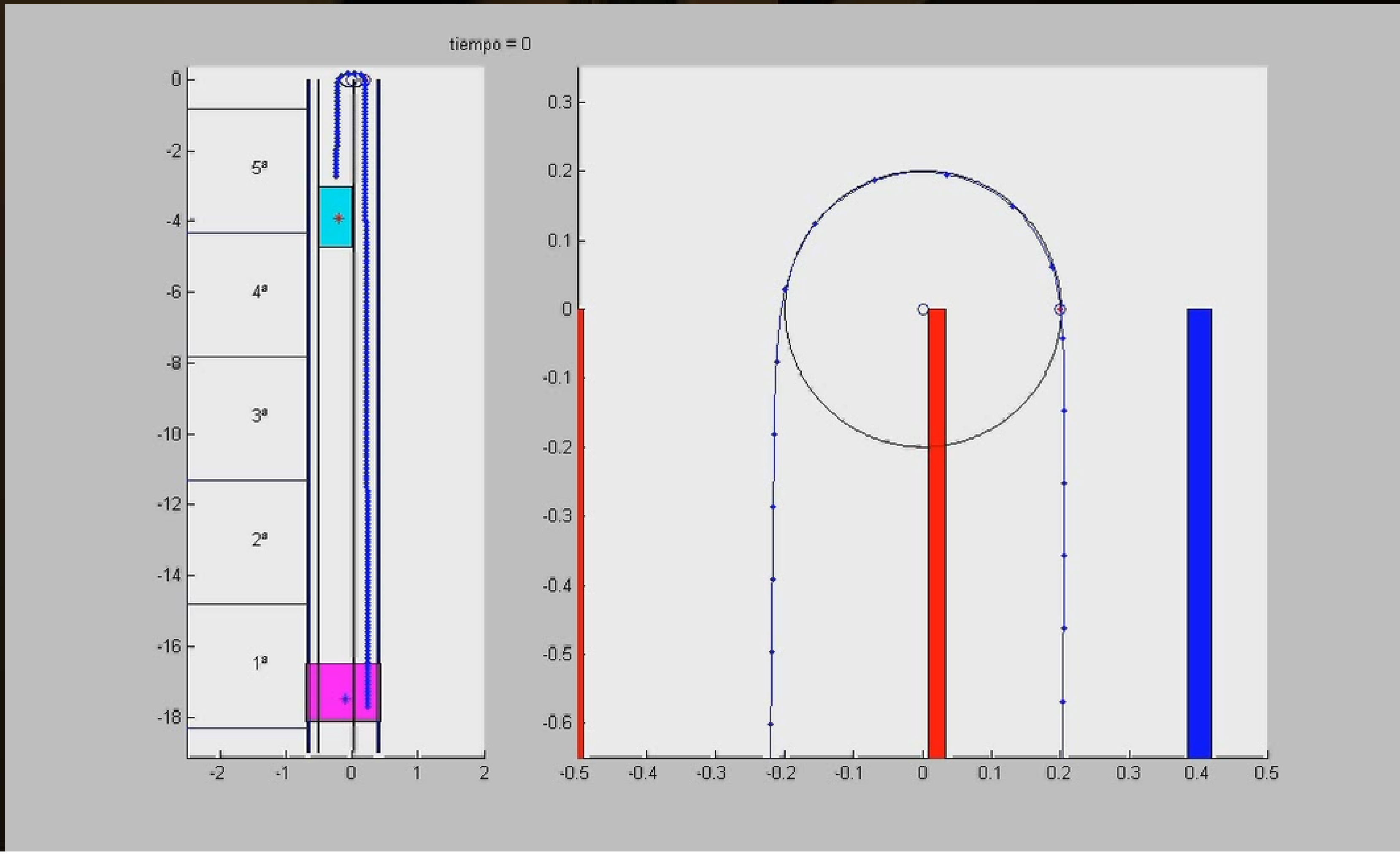
Análisis de Vibraciones en Ascensores
Método ANCF

- Simulación: 3º - 4º



Análisis de Vibraciones en Ascensores
Método ANCF

- Simulación: 1º - 5º



ÍNDICE

- Introducción.
- Método de las fuerzas.
- Método de las Coordenadas Nodales Absolutas, ANC.
- Resultados.
- Conclusiones.

Análisis de Vibraciones en Ascensores

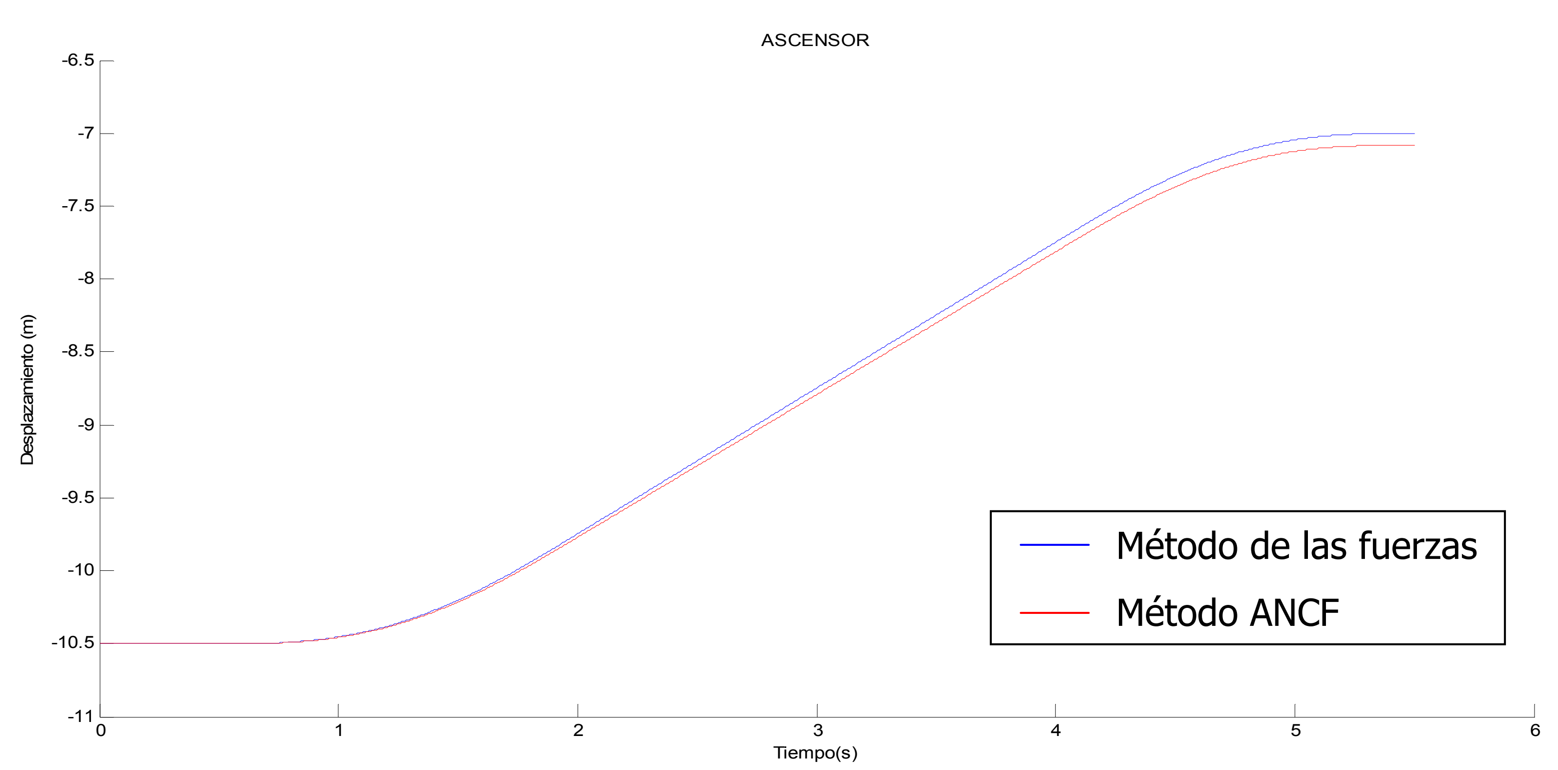
Validación de los métodos

- Parámetros empleados.
  - Trayecto: 3º ➡ 4º
  - $Q = 1016Kg$
  - $\Delta t = 0.001s$
  - $\xi = -0.1$
  - ANCF: 200 elementos

Análisis de Vibraciones en Ascensores

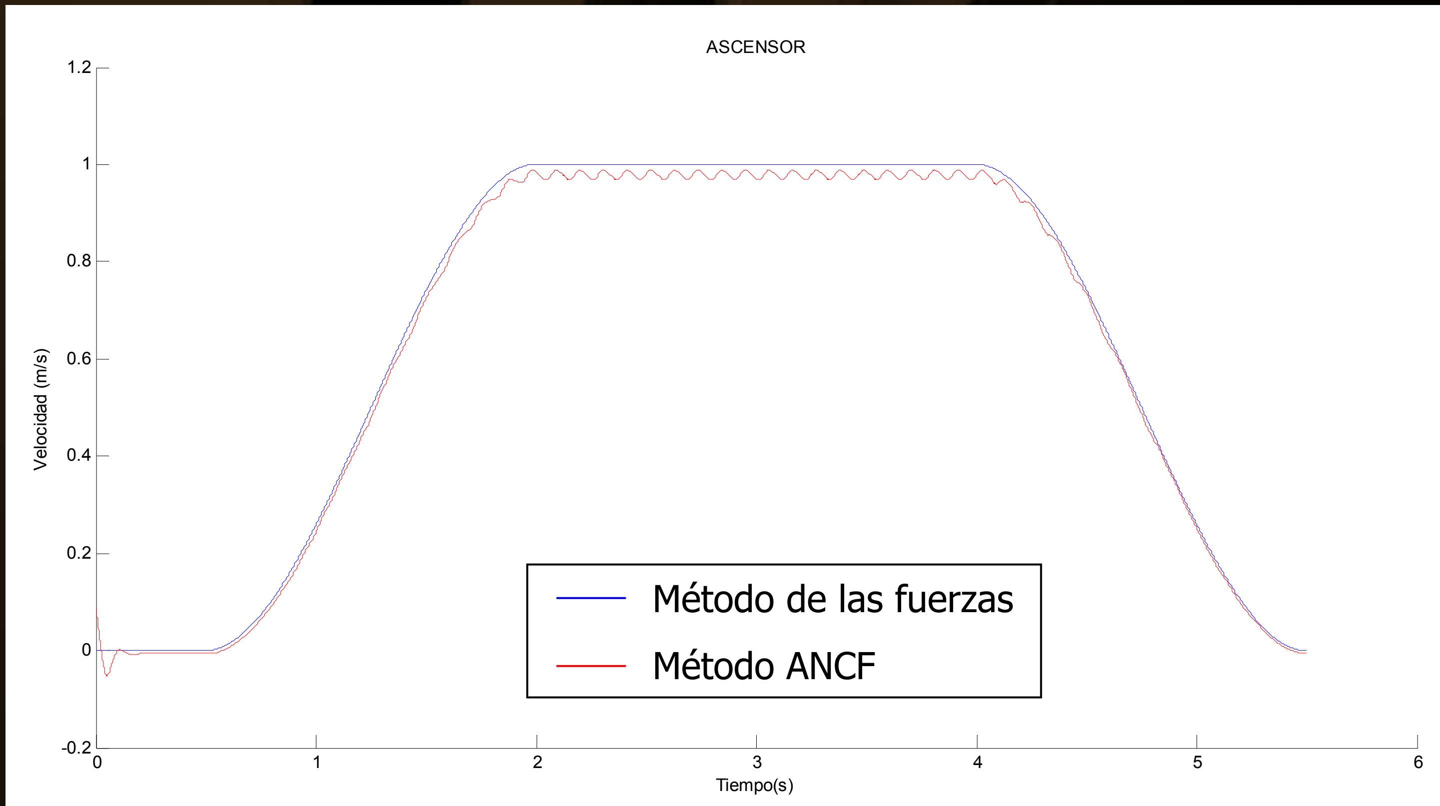
Validación de los métodos

- Posiciones.



Análisis de Vibraciones en Ascensores
Validación de los métodos

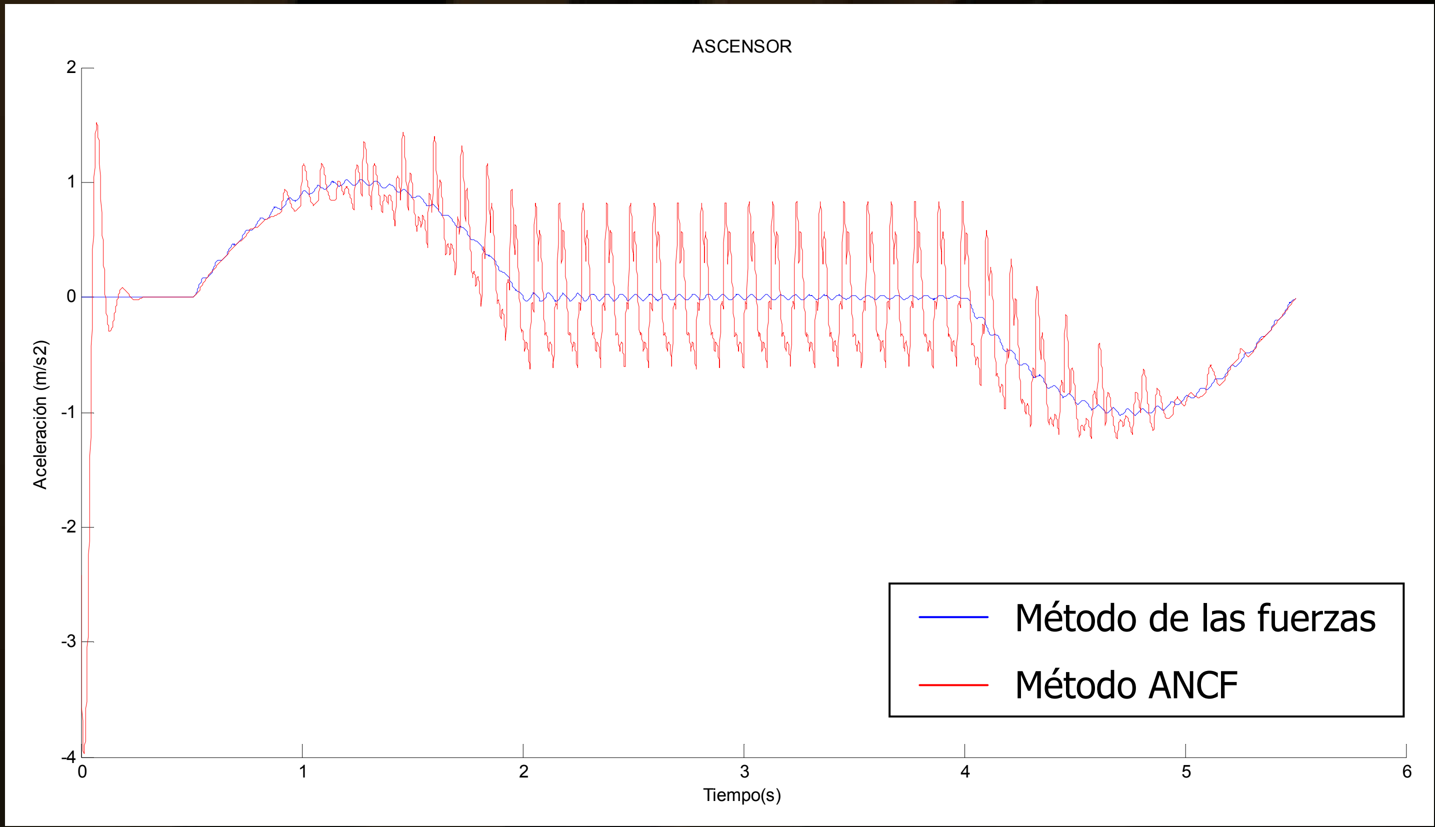
- Velocidades.



Análisis de Vibraciones en Ascensores

Validación de los métodos

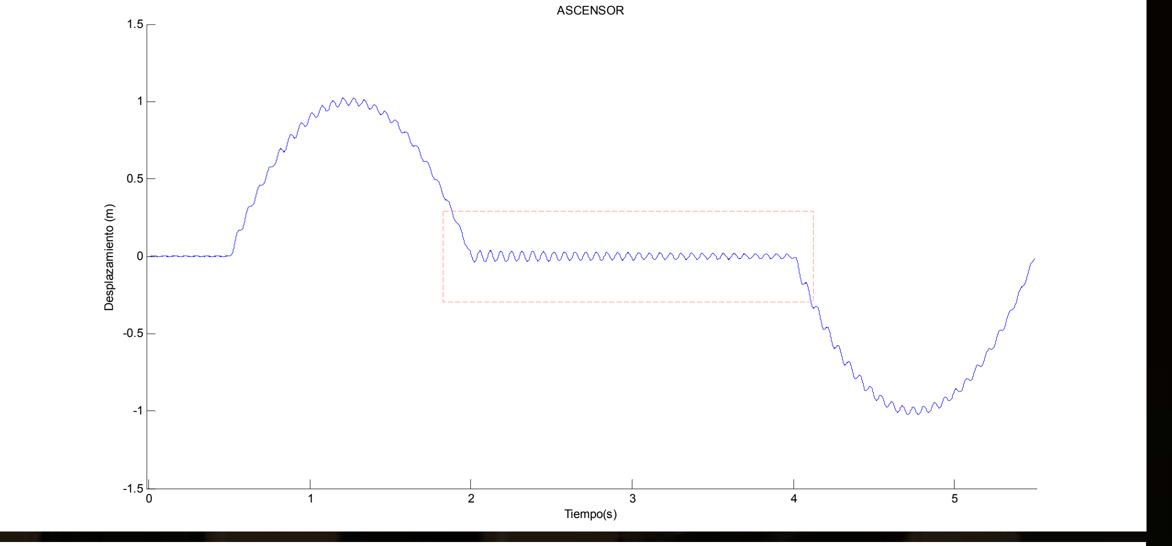
- Aceleraciones.

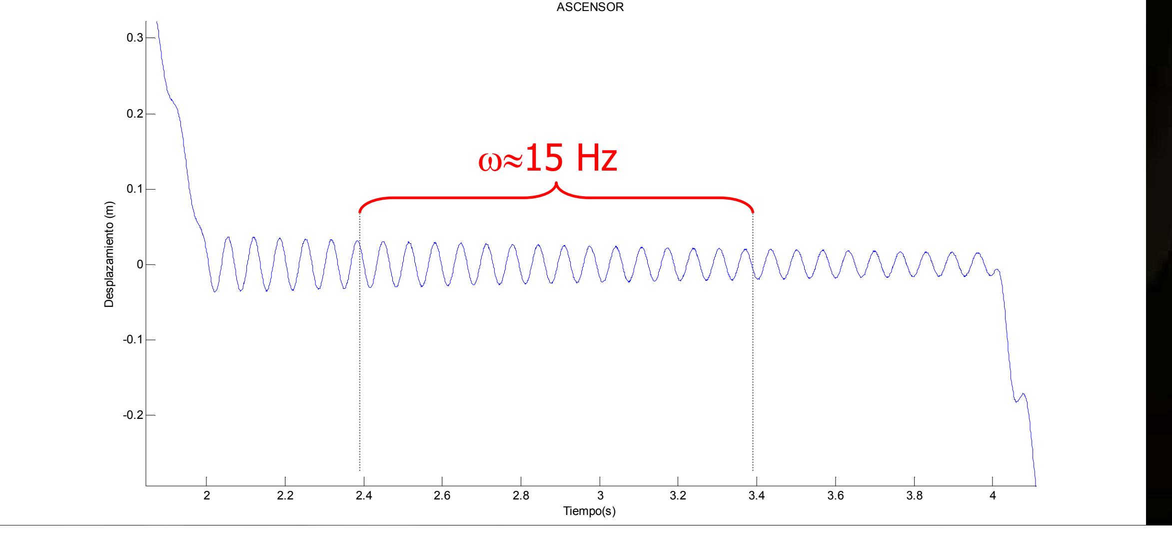


Análisis de Vibraciones en Ascensores

Validación de los métodos

- Análisis de vibraciones: método de las fuerzas.

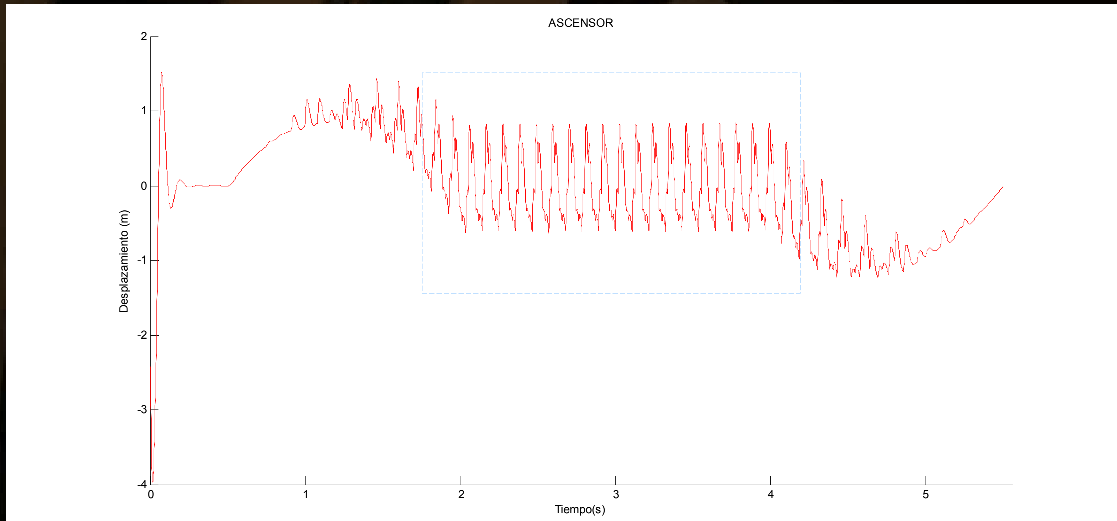


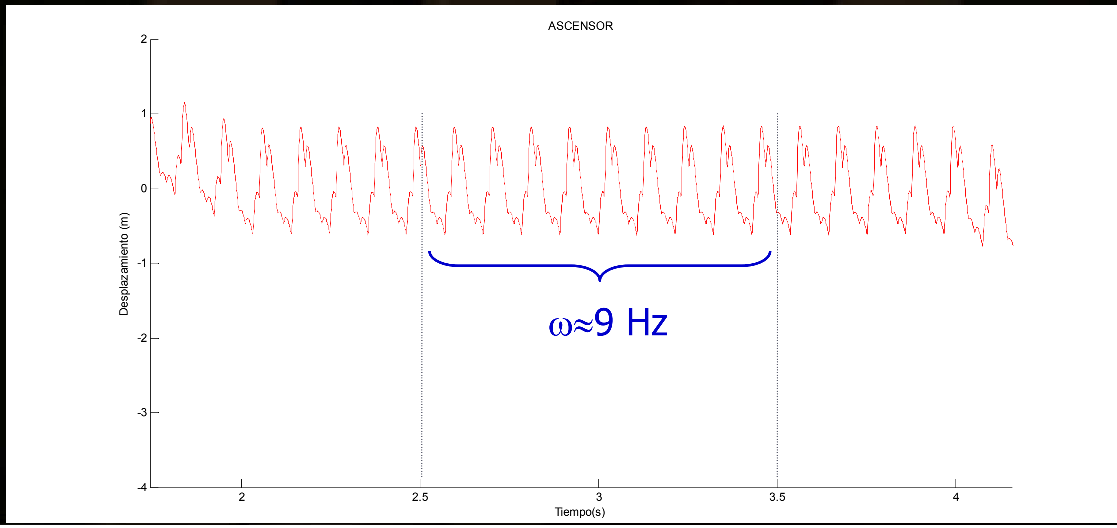


Análisis de Vibraciones en Ascensores

Validación de los métodos

- Análisis de vibraciones: método ANCF.





Validación de los métodos

- Eficiencia de los métodos.
  - Lagrange aumentado index-3 con proyecciones + integrador disipativo de Newmark (ξ = -0.1).
  - procesador empleado:AMD Turion 64 X2 Mobile Technology TL-64 2.20 GHz.

Trayecto	3º $\rightarrow$ 4º	5º $\rightarrow$ 1º
Tiempo real del trayecto (s)	5 + 0.5	15.5 + 0.5
Paso de tiempo, Δt (s)	0.001	0.001
Tiempo de integración (s)		
Método de las fuerzas	38.5	177.7
Método con ANCF	5817.2	17970.4

ÍNDICE

- Introducción.
- Método de las fuerzas.
- Método de las Coordenadas Nodales Absolutas, ANC.
- Resultados.
- Conclusiones.

Conclusiones

- Se han desarrollado y programado en MATLAB dos modelos distintos del ascensor eléctrico, que permiten una simulación dinámica.

  - El Método de las fuerzas:

    - Compuesto exclusivamente de sólidos rígidos: conjunto chasis-cabina, polea y contrapeso.
    - Empleo de coordenadas naturales.
    - Modelizado del cable mediante un conjunto de fuerzas equivalentes.
    - Contacto guías-cabina/contrapeso según ley de fricción trilineal.
    - Guiado de la polea mediante una función temporal $\alpha(t)$.

  Máxima eficiencia: formulación de Lagrange aumentado index-3 con proyecciones, combinado con un integrador disipativo de Newmark.

Conclusiones

- El Método de las coordenadas nodales absolutas, ANC:
    - Se compone de sólidos rígidos (conjunto chasis-cabina, polea y contrapeso) y de sólidos flexibles (elementos que forman el cable).
    - Empleo de coordenadas naturales y de coordenadas nodales absolutas.
    - Modelizado del cable mediante elementos viga tipo Euler-Bernoulli, con la rigidez a flexión reducida.
    - Contacto polea-cables mediante fuerzas normales y tangenciales.
    - Contacto guías-cabina/contrapeso mediante una ley de fricción trilineal.
    - Guiado de la polea mediante una función temporal $\alpha(t)$.

Máxima eficiencia: formulación de Lagrange aumentado index-3 con proyecciones, combinado con un integrador disipativo de Newmark.

En problemas con rigideces elevadas, es crítico disponer de una posición inicial suficientemente buena para iniciar la integración de las ecuaciones dinámicas del movimiento.

Conclusiones

- De la comparación de los resultados gráficos se deduce que en el método ANCF, está fallando el modelo de contacto cable-polea, alterando la respuesta del modelo:
  - Es necesario tolerar un cierto deslizamiento entre cable y polea a fin de que la integración numérica no sea excesivamente lenta.
  - Las fuerzas tangenciales de contacto están introduciendo unas vibraciones que alteran la respuesta en frecuencia del sistema.
- El modelo ANCF, programado en FORTRAN y con un buen modelo de contacto, sería mucho más rápido que el método de los EF.
- Si los resultados son similares a los obtenidos con el método de las fuerzas, se podría utilizar dicho método para el análisis de vibraciones con tiempos de cálculo infinitamente inferiores a los necesarios con EF.

Conclusiones

- Líneas futuras de desarrollo:
  - Mejora del modelo de contacto cable-polea, para evitar la vibración que introducen en el modelo.
  - Inclusión del comportamiento flexible del conjunto chasis-cabina, dado que sus propias vibraciones estructurales pueden ser relevantes.
  - Consideración de la flexibilidad de las guías y de sus apoyos.
  - Substitución del guiado de la polea por una simulación detallada del comportamiento del motor eléctrico y su control, incluyendo la modelización de los apoyos de la bancada del motor (silent blocks).
  - Simulación de situaciones de emergencia.
  - Programación en FORTRAN del modelo con ANCF, con el fin de disminuir los tiempos de computación.