

Simulador Dinámico de un Exoesqueleto de 6GdL

Reporte de medio término

García-Álvarez Gregorio E., Luna-Macías Antonio J.,
Tevera-Ruiz Alejandro

Maestría en Ciencias en Robótica y Manufactura Avanzada

20 de octubre de 2021



Cinvestav

1 Introducción

2 Antecedentes

3 Simulador

4 Resultados

5 Conclusiones

6 Referencias

1 Introducción

2 Antecedentes

3 Simulador

4 Resultados

5 Conclusiones

6 Referencias

Objetivo del proyecto

Desarrollar un simulador dinámico para un exoesqueleto actuado de 6 GdL para el análisis de sus variables de estado y su comportamiento energético.

1 Introducción

2 Antecedentes

3 Simulador

4 Resultados

5 Conclusiones

6 Referencias

Diseño mecánico y asignación de referenciales

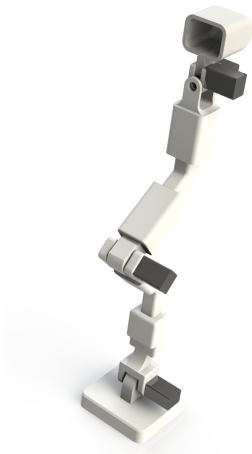


Figura 1: Modelo 3D

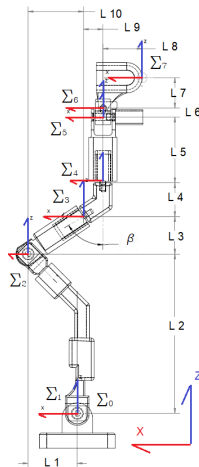


Figura 2: Referenciales

Parámetros GRyMA

De acuerdo al modelo realizado en SolidWorks y con base a los códigos de movimiento [OD21]:

q_i	Parámetros de localización					Θ_i	Σ_i	Σ_{pi}
	[mm]			[°]				
	d_{xi}	d_{yi}	d_{zi}	α	β			
q_1	0	0	0	-	-	5	Σ_1	Σ_0
q_2	32.35	0	105.13	-	-	5	Σ_2	Σ_1
q_3	-36.41	0	24.62	0	-59.26	8	Σ_3	Σ_2
q_4	-12.73	0	22.28	-	-	6	Σ_4	Σ_3
q_5	0	0	43.34	-	-	4	Σ_5	Σ_4
q_6	0	0	6	-	-	5	Σ_6	Σ_5

Cuadro 1: Parámetros cinemáticos

Cinemática de orden cero

Para cada referencial Σ_i con articulaciones tipo revoluta:

$$A_i(q_i) = \begin{bmatrix} e^{[\lambda_{R_i} \times] q_i} & \mathbf{d}_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Permitiendo la obtención de la cinemática directa para Σ_i :

$$A_0^i(q) = A_0^{p_i}(q_1, \dots, q_j) A_i(q_i) \quad (2)$$

Cinemática de primer orden

Para el Jacobiano Geométrico de Velocidad Angular:

$${}^0J_{\omega_i} = [\lambda_{R_1}^{(0)}, \lambda_{R_2}^{(0)}, \dots, \lambda_{R_i}^{(0)}, 0, \dots, 0] \in \mathbb{R}^{3 \times n} \quad (3)$$

donde

$$\lambda_{R_i}^{(0)}(\mathbf{q}) = R_0^i(\mathbf{q}) \lambda_{R_i} \quad (4)$$

Mientras que para el Jacobiano Geométrico de Velocidad Lineal:

$$[{}^0J_{v_i}]_k = \begin{cases} \lambda_{R_k}^{(0)} \times (\mathbf{d}_i - \mathbf{d}_k) & \text{si } k \leq i \\ 0 & \text{si } k > 0 \end{cases} \quad (5)$$

Formulación de D'Alambert-Lagrange

Considerando [OD19]:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial K}{\partial \dot{\mathbf{q}}} - \frac{\partial K}{\partial \mathbf{q}} = \mathbf{Q} \in \mathbb{R}^n \quad (6)$$

donde

$$K = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}^T H(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} \quad (7)$$

$$\mathbf{Q} \triangleq \begin{bmatrix} Q_1 \\ \vdots \\ Q_n \end{bmatrix} \quad (8)$$

Resolviendo (6) y considerando τ_U y τ_D , se obtiene:

$$H(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + D(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{g}(\mathbf{q}) = \boldsymbol{\tau} \quad (9)$$

Matriz de Inercia

Por otro lado

$$K = K_v + K_\omega \quad (10)$$

entonces

$$H(\mathbf{q}) = \sum_{i=1}^n \{ m_i {}^0 J_{vcm_i}^T(\mathbf{q}) {}^0 J_{vcm_i}(\mathbf{q}) + {}^0 J_{\omega_{cm_i}}^T(\mathbf{q}) R_0^i(\mathbf{q}) \mathbf{I}_c^{(i)} R_0^{iT}(\mathbf{q}) {}^0 J_{\omega_{cm_i}}(\mathbf{q}) \} \quad (11)$$

definiendo que $H(\mathbf{q}) = H(\mathbf{q})^T > 0$.

Vector de Coriolis y Vector de Disipación

El vector de Coriolis puede ser expresado como:

$$C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} = \begin{bmatrix} \vdots \\ \sum_{i,j}^n c_{ijk}(\mathbf{q}) \dot{q}_i \dot{q}_j \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (12)$$

donde

$$c_{ijk}(q) \triangleq \frac{1}{2} \left(\frac{\partial h_{kj}(\mathbf{q})}{\partial q_i} + \frac{\partial h_{ik}(\mathbf{q})}{\partial q_j} - \frac{\partial h_{ij}(\mathbf{q})}{\partial q_k} \right) \in \mathbb{R}^n \quad (13)$$

son los *Símbolos de Christoffel*.

El vector de disipación se expresa como:

$$D(b, \dot{\mathbf{q}}) = b \mathbf{I} \dot{\mathbf{q}} \in \mathbb{R}^n \quad (14)$$

Energía Potencial y Vector de Gravedad

Considerando U para sistemas multipartículas con referencia a un *datum* o valor de referencial h_0 :

$$U_{h_0} = \sum_{i=1}^n U_{i_{h_0}} = \sum_{i=1}^n m_i \mathbf{d}_{cm_i}^T \mathbf{g}_0 \quad (15)$$

Realizando un *offset*:

$$U = U_{h_0} + U_0 : \dot{U} = \dot{U}_{h_0} \quad (16)$$

Mientras que el vector de gravedad:

$$\mathbf{g}(\mathbf{q}) = \frac{\partial U}{\partial \mathbf{q}} = - \sum_{i=1}^n [m_i {}^0 J_{vcm_i}^T(\mathbf{q})] \mathbf{g}_0 \in \mathbb{R}^n \quad (17)$$

siendo

$$\mathbf{g}_0 = [0 \quad 0 \quad -9,81]^T \quad (18)$$

Energía Mecánica

La energía mecánica está representada como:

$$E = K + U \quad (19)$$

Para sistemas aislados o conservativos:

$$\dot{E} = 0 \quad (20)$$

1 Introducción

2 Antecedentes

3 Simulador

4 Resultados

5 Conclusiones

6 Referencias

Diagrama de bloques del simulador (1/2)

$$\ddot{\mathbf{q}} = \mathbf{H}(\mathbf{q})^{-1} \{ \boldsymbol{\tau} - \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}} - \mathbf{D}(\mathbf{b}, \dot{\mathbf{q}}) - \mathbf{g}(\mathbf{q}) \} \quad (21)$$

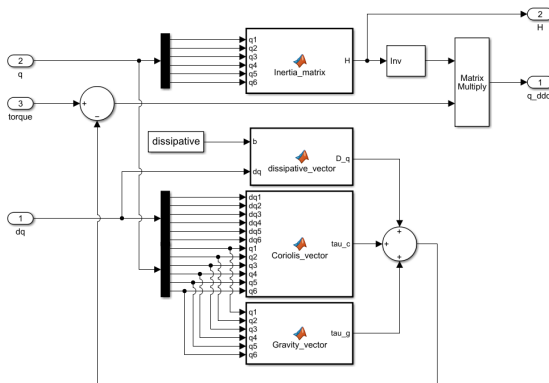


Figura 3: Modelo dinámico del exoesqueleto

Diagrama de bloques del simulador (2/2)

Considerando al solucionador *ode15s* de *paso variable* para ecuaciones diferenciales rígidas

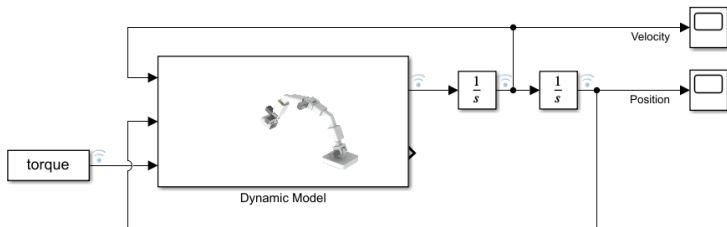


Figura 4: Planta

MATLAB App

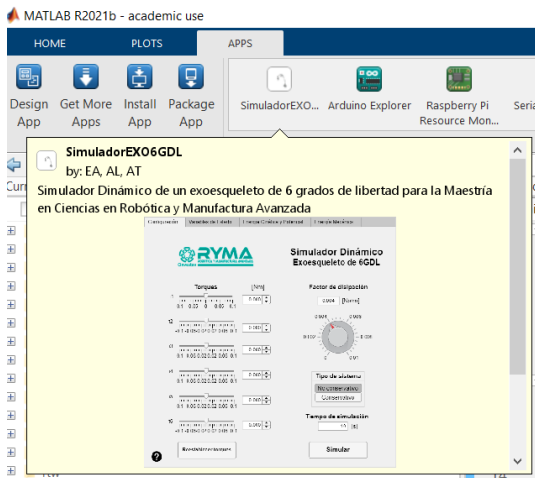


Figura 5: Aplicación desarrollada

GUI

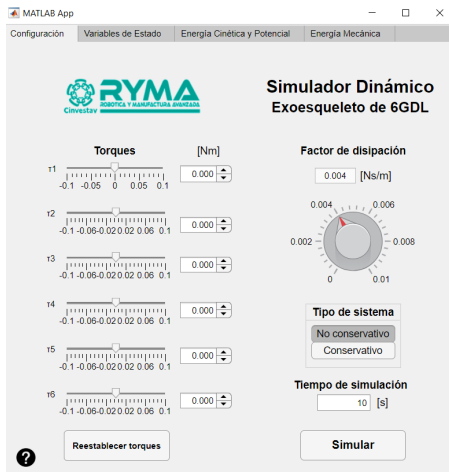


Figura 6: Interfaz Gráfica del Usuario

Gráficas de variables de estado

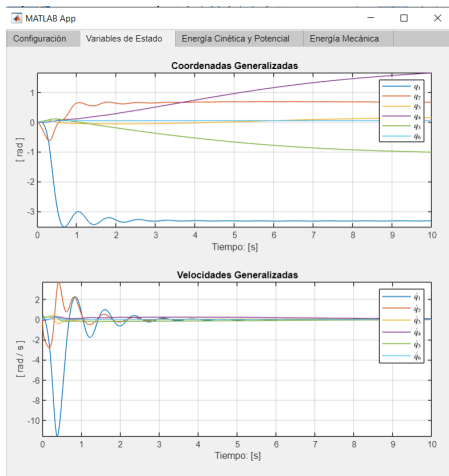


Figura 7: GUI: Variables de estado

Gráficas Energía Cinética K y Potencial U

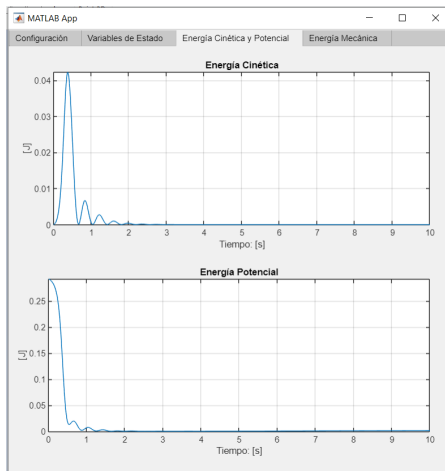


Figura 8: GUI: Energía Cinética y Potencial

Gráfica Energía Mecánica E

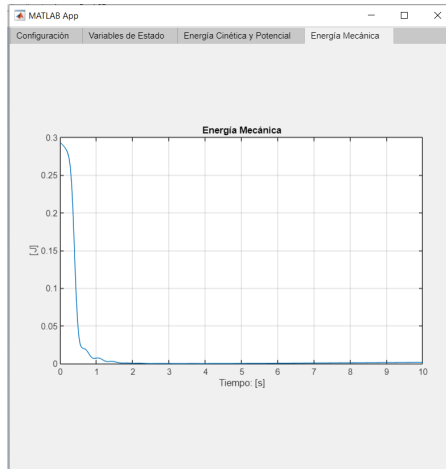


Figura 9: GUI: Energía Mecánica

Visualizador

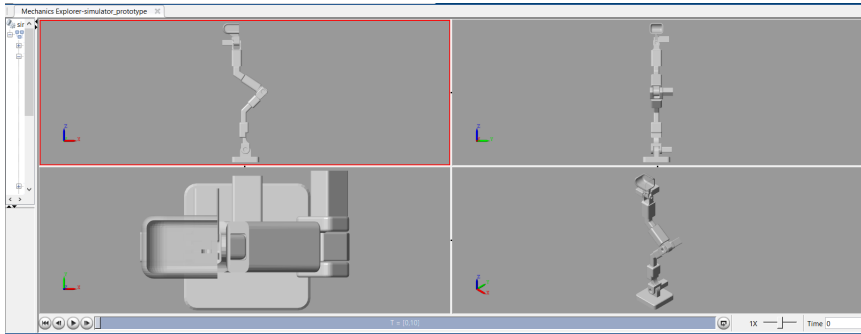
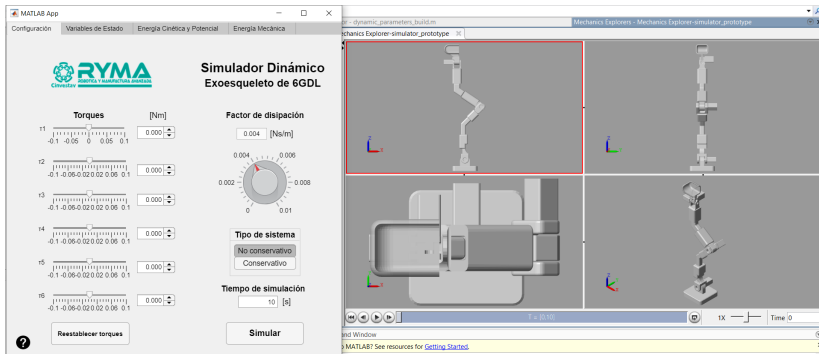


Figura 10: Visualización del exoesqueleto

Demostración

Simulación en vivo



1 Introducción

2 Antecedentes

3 Simulador

4 Resultados

Parámetros

Caso 1

Caso 2

Caso 3

5 Conclusiones

6 Referencias

Parámetros de casos

Cuadro 2: Parámetros originales del simulador

Parámetros	τ_1	τ_2	τ_3	τ_4	τ_5	τ_6	Unidades
Torques	0	0	0	0	0	0	[Nm]
Factor de Disipación	0.004						[Ns/m]
Tiempo de Simulación	10						[s]

Cuadro 3: Parámetros caso 2

Parámetros	τ_1	τ_2	τ_3	τ_4	τ_5	τ_6	Unidades
Torques	-0.050	0.050	-0.040	-0.060	0.020	0.010	[Nm]
Factor de Disipación	0.006001						[Ns/m]
Tiempo de Simulación	20						[s]

Cuadro 4: Parámetros caso 3

Parámetros	τ_1	τ_2	τ_3	τ_4	τ_5	τ_6	Unidades
Torques	0	0	0	0	0	0	[Nm]
Factor de Disipación	0						[Ns/m]
Tiempo de Simulación	200						[s]

1 Introducción

2 Antecedentes

3 Simulador

4 Resultados

Caso 1

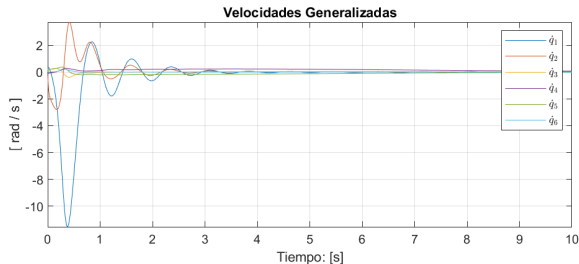
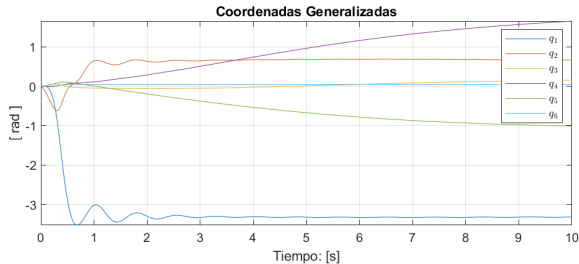
Caso 2

Caso 3

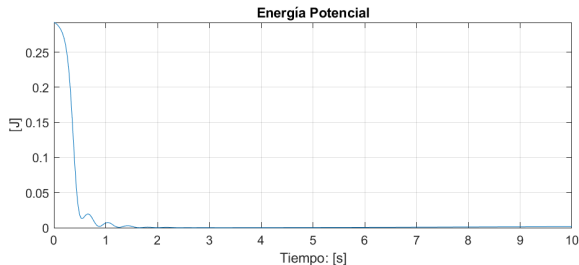
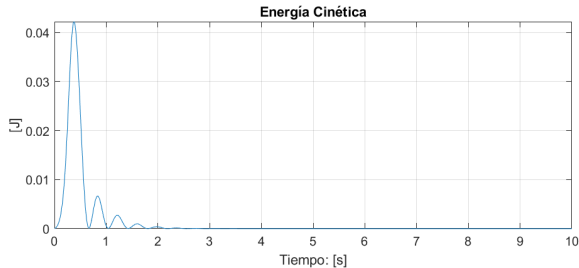
5 Conclusiones

6 Referencias

Caso 1: Sistema no conservativo y $\tau = 0$



Caso 1: Análisis energético



1 Introducción

2 Antecedentes

3 Simulador

4 Resultados

Caso 1

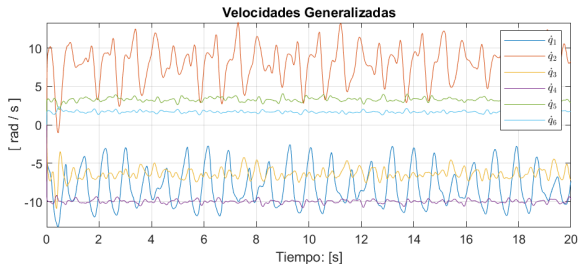
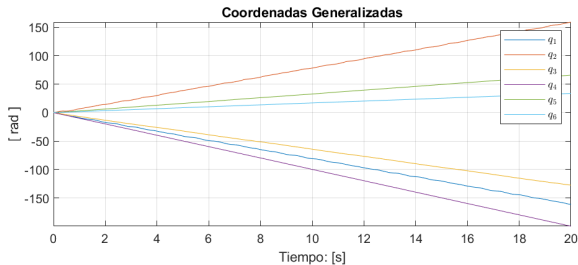
Caso 2

Caso 3

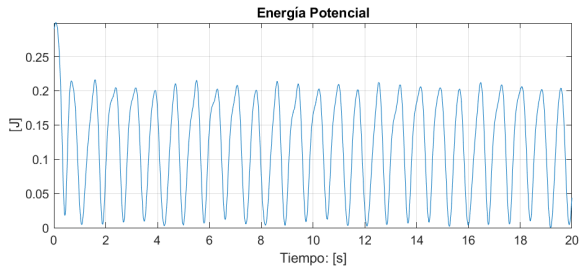
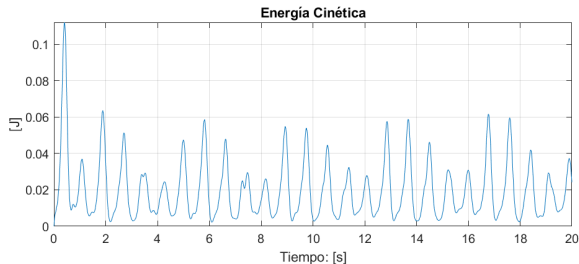
5 Conclusiones

6 Referencias

Caso 2: Sistema no conservativo y τ variables



Caso 2: Análisis energético



1 Introducción

2 Antecedentes

3 Simulador

4 Resultados

Caso 1

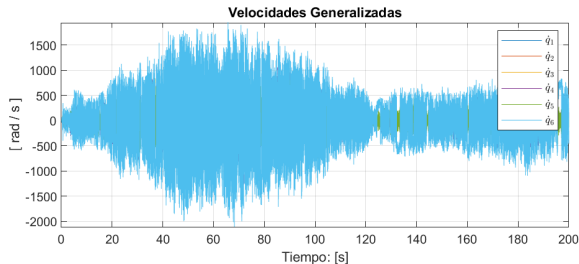
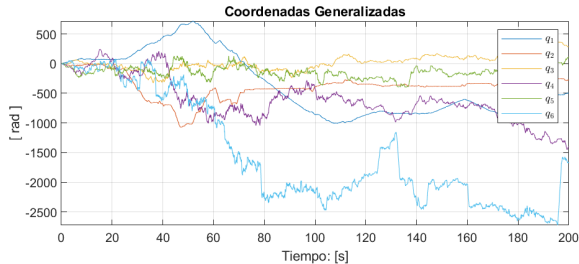
Caso 2

Caso 3

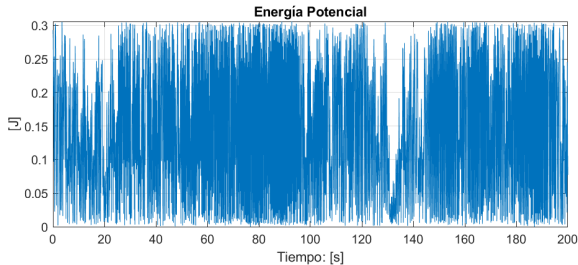
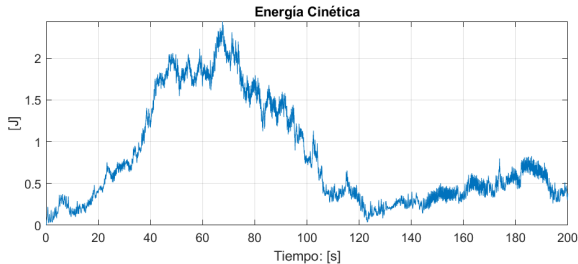
5 Conclusiones

6 Referencias

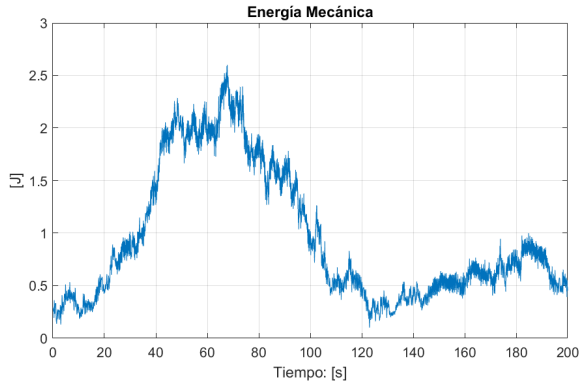
Caso 3: Sistema conservativo y $\tau = 0$



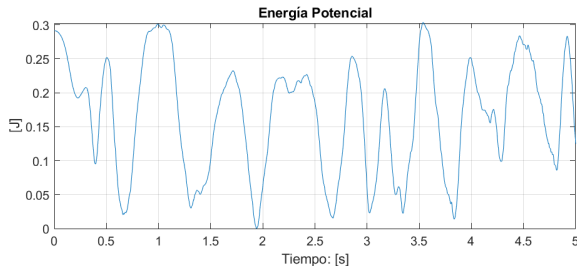
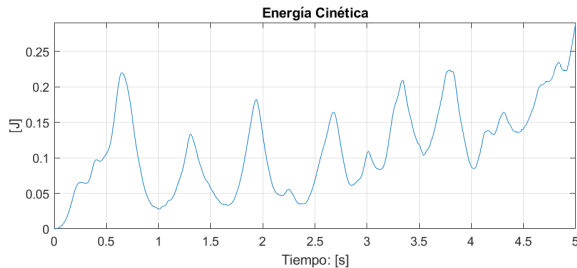
Caso 3: Análisis energético



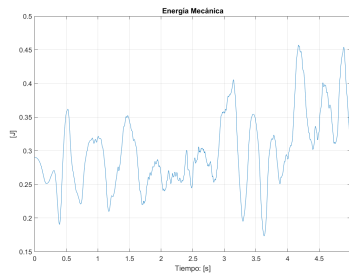
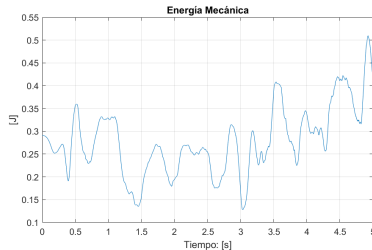
Caso 3: Análisis energético



Caso 3: Análisis energético, periodo 5[s]



Caso 3: Comparación entre integradores, *ode15s* y *ode3*



1 Introducción

2 Antecedentes

3 Simulador

4 Resultados

5 Conclusiones

6 Referencias

Conclusiones

Análisis de sistema no conservativo

- Respuesta congruente con lo esperado.

Análisis de sistema conservativo

- Respuesta no congruente con la Ley de la conservación de la energía.
- Error acumulado del solucionador.

Trabajo futuro

- Desarrollo de segundo simulador con BDA.
- Prueba con solucionadores y parámetros diferentes.

1 Introducción

2 Antecedentes

3 Simulador

4 Resultados

5 Conclusiones

6 Referencias

- [OD19] Ernesto Olguín-Díaz.
3D Motion of Rigid Bodies: A Foundation for Robot Dynamics Analysis.
Springer, 2019.
- [OD21] Ernesto Olguín-Díaz.
Rigid Multibody Systems Dynamics.
CINVESTAV, 2021.



Cinvestav

Gracias por su atención!