

# Optimización de parámetros de co-simulación de sistemas mecánicos utilizando técnicas de inteligencia artificial

**Autora:** *Iraisy Carolina Figueroa Silva*

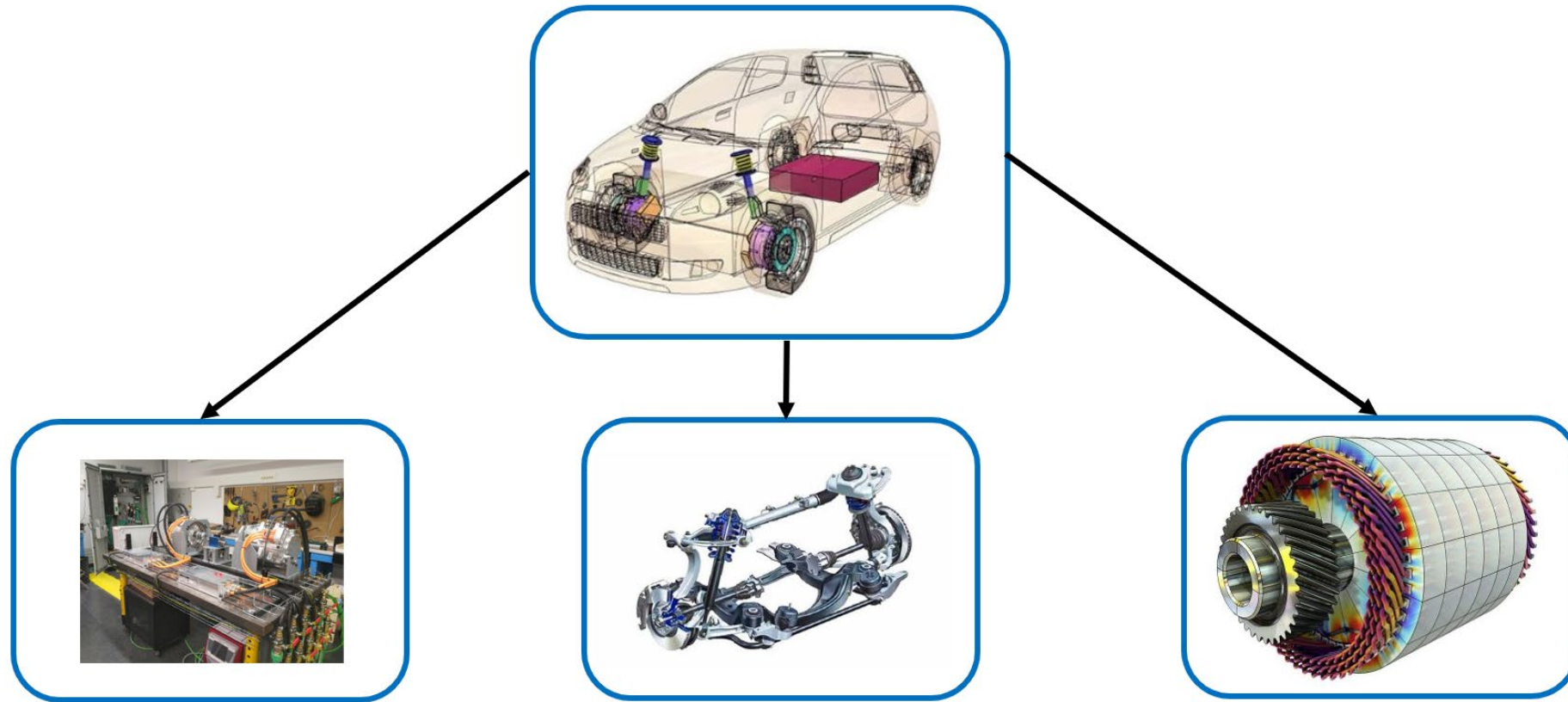
**Tutores:** *José Antonio Becerra Permuy*

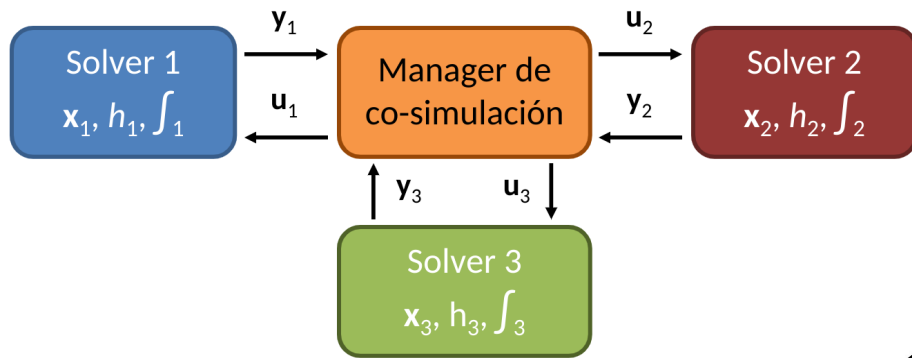
*Francisco Javier González Varela*

***Máster Universitario en Informática Industrial y Robótica***

**Ferrol, 13 de julio de 2023**

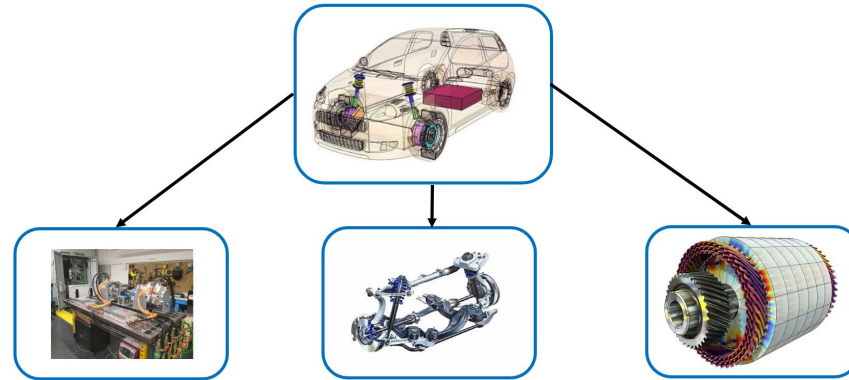
- 1. Contextualización**
- 2. ¿Qué es la co-simulación?**
  - Simulación monolítica vs co-simulación
  - Esquemas de co-simulación
- 3. Problemas con el uso de la co-simulación**
  - Presentación del problema
  - Objetivos
  - Aplicación de la acción correctiva
  - Cuantificación de los errores
- 4. Herramientas utilizadas**
- 5. Ejemplo de benchmark: oscilador lineal**
- 6. Técnicas de inteligencia artificial**
  - Algoritmos evolutivos
  - Funciones de calidad
  - Algoritmo genético
  - Algoritmo evolutivo diferencial
- 7. Resultados**
- 8. Conclusiones y trabajo futuro**





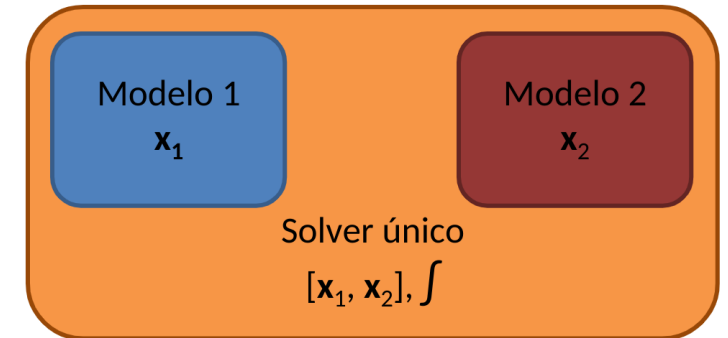
### Co-simulación

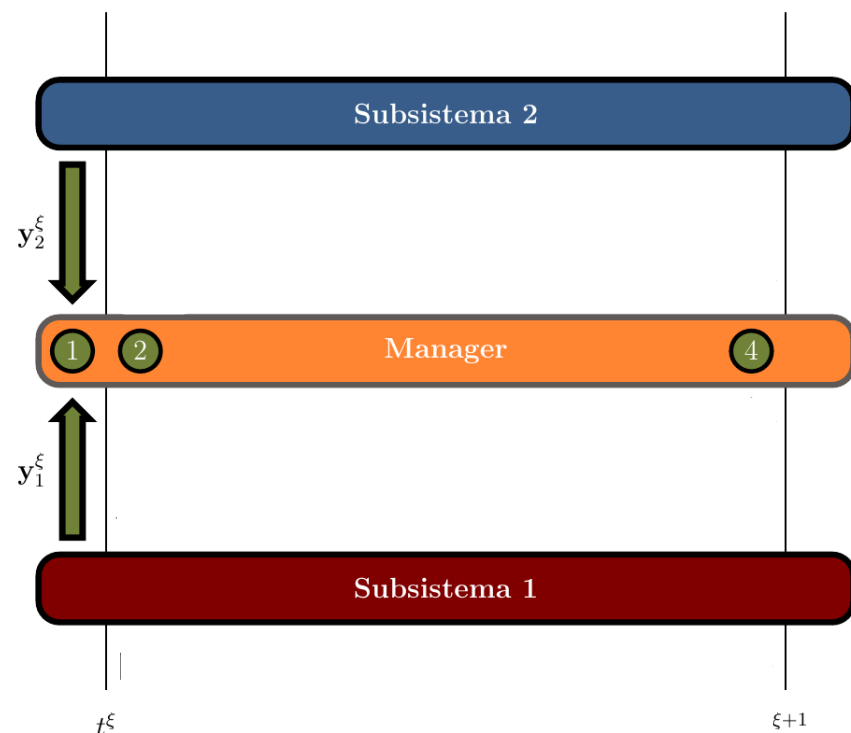
- Se divide en subsistemas.
- Cada subsistema tiene un *solver*.
- Cada subsistema puede tener su paso de tiempo.
- Necesaria sincronización (*manager*).



### Simulación monolítica

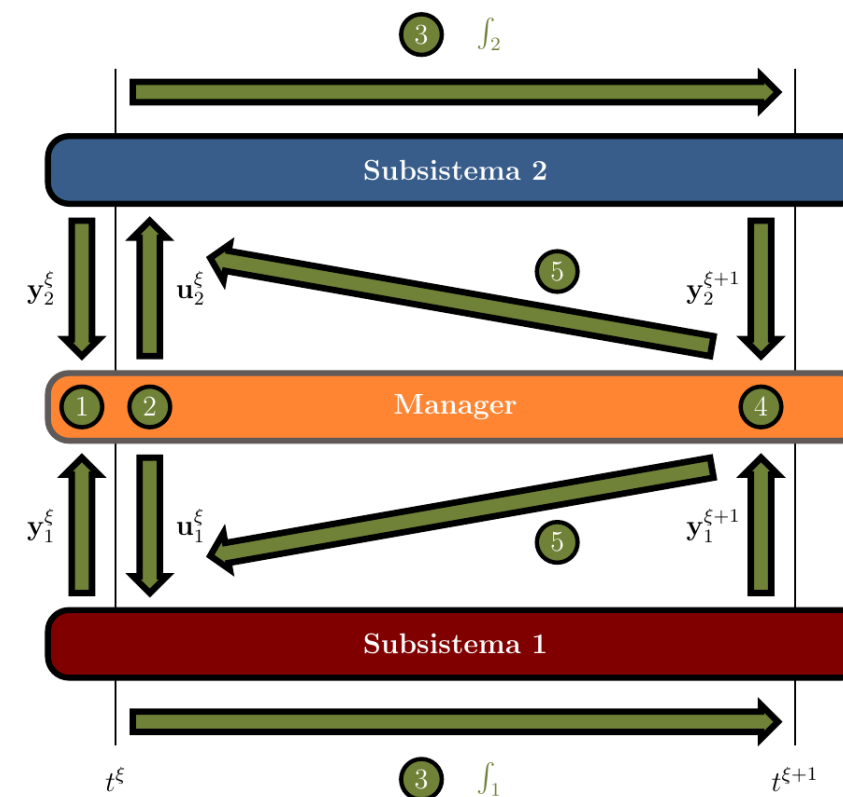
- Único *solver* para todo el sistema
- Formulación global de la dinámica
- Se suele integrar todos los fenómenos con un único paso de tiempo





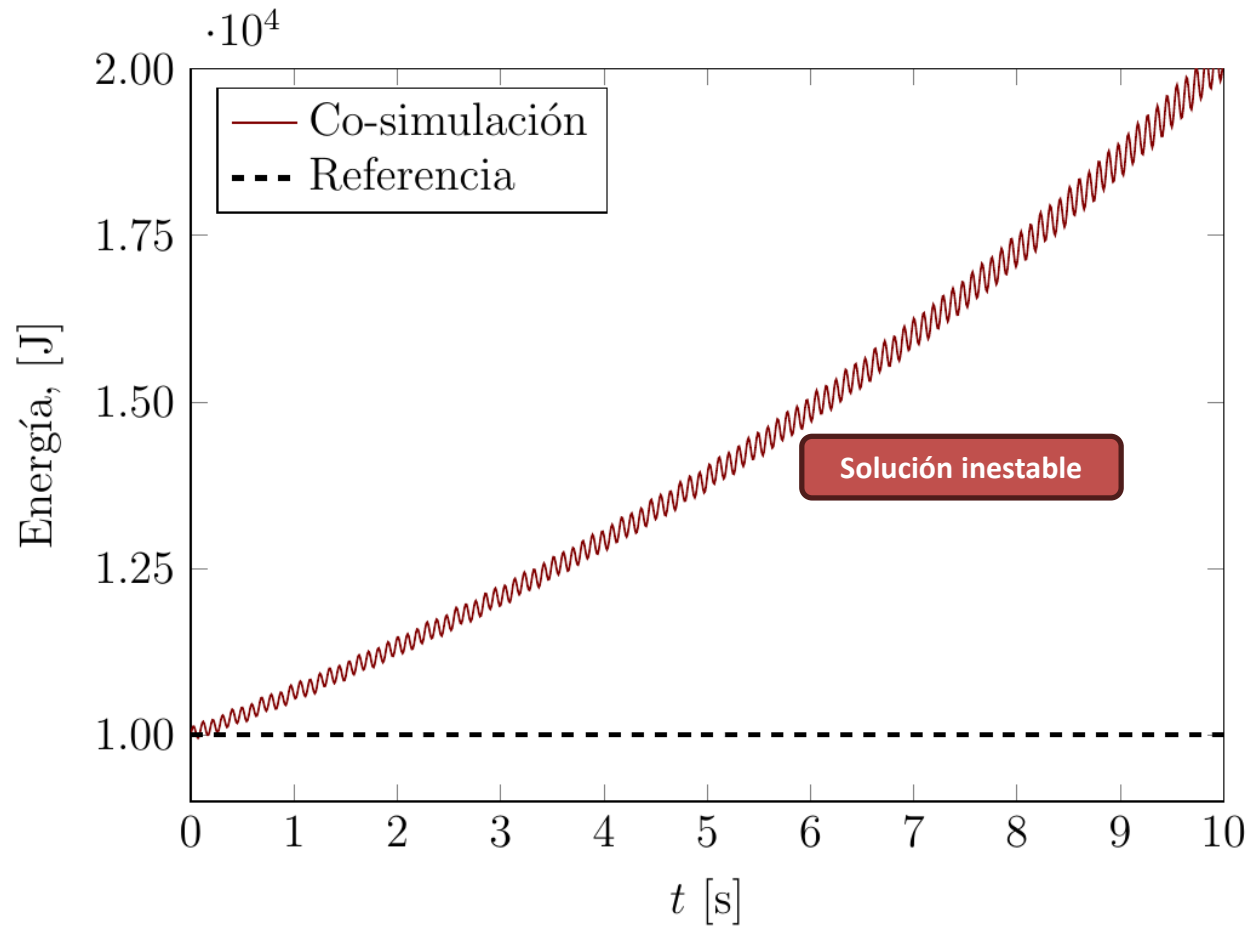
### Esquemas explícitos

- Los pasos de tiempo no pueden ser repetidos entre dos puntos de comunicación



### Esquemas implícitos

- Los pasos de tiempo son repetidos entre dos puntos de comunicación



## ¿Por qué aparece este problema?

- Los subsistemas suelen tratarse como cajas negras
- Se intercambian un conjunto reducido de variables en puntos concretos del tiempo
- **Las discontinuidades en las entradas provocan errores de energía en el sistema**
- **Es necesario utilizar un algoritmo de corrección**

### Objetivos

- 1) Empleo de técnicas de inteligencia artificial para la determinación de los coeficientes óptimos del algoritmo de corrección.
- 2) Proponer un nuevo método para cuantificar el error en co-simulación.

### Tareas realizadas

- 1) Desarrollo de un framework de co-simulación.
- 2) Definición de un ejemplo de benchmark.
- 3) Cuantificar errores introducidos por la co-simulación.
- 4) Cálculo y aplicación de fuerzas correctivas.
- 5) Seleccionar técnicas de inteligencia artificial.
- 6) Comprobar su desempeño calculando las acciones correctivas.

## Acción correctiva

- Se pretende eliminar el exceso de energía con la aplicación de una fuerza de corrección

$$f_{\text{corr}}^{\xi+1} = \mu \frac{\delta P^{\xi+1}}{\dot{\eta}_2^{\xi+1}} + \lambda \frac{\Gamma^{\xi+1}}{\dot{\eta}_2^{\xi+1} H}$$

Coeficiente proporcional      Coeficiente integral      Paso de tiempo      Velocidad

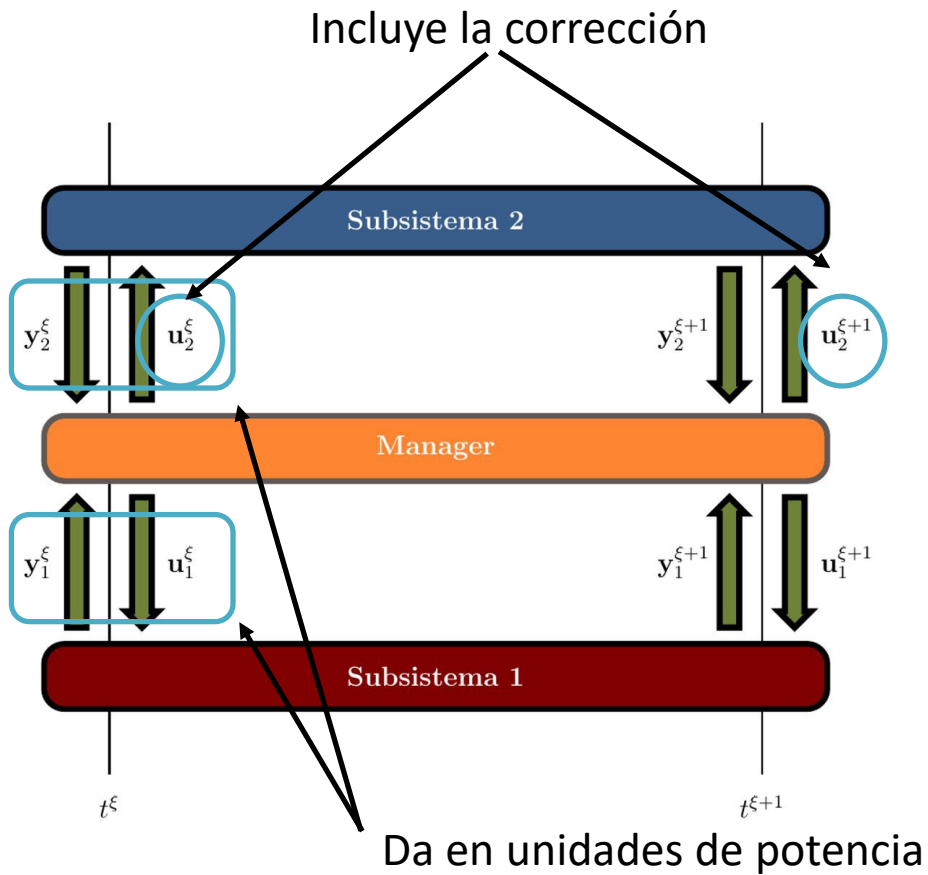


- El término  $\delta P$  cuantifica el error en la interfaz
- El término  $\Gamma$  acumularía la energía que no pudo disiparse por considerar la velocidad constante entre 2 pasos de tiempo

## Limitaciones

- No se puede aplicar si la velocidad es 0 (o próxima)
- Debe limitarse el valor de la fuerza para que sea compatible con la dinámica
- Se aplica en la misma dirección que la fuerza original





## Residuo de potencia (Sadjina, 2017)

- Se refiere al error en el balance de potencia en la interfaz como:

$$\delta P^{\xi+1} = - \left( \tilde{\mathbf{u}}^{\xi+1} \right)^T \cdot \mathbf{y}^{\xi+1} \approx - \left( \mathbf{u}^{\xi} \right)^T \cdot \mathbf{y}^{\xi+1}$$

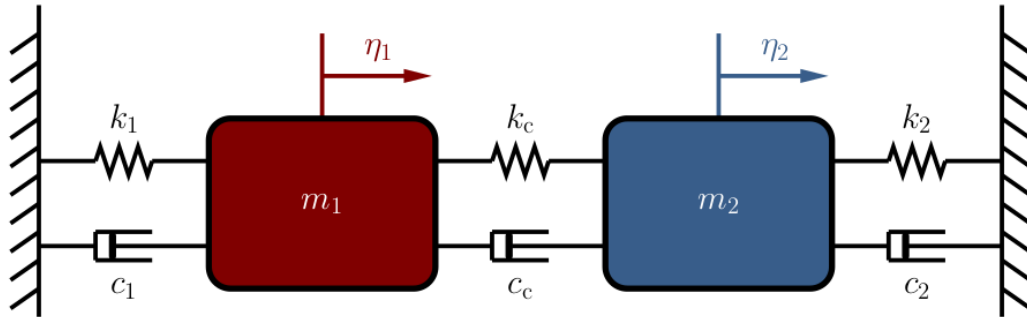
- Teóricamente debería ser 0, pero los **outputs deben ser evaluados antes de recibir los inputs** -> deja de ser 0 en el caso general.

## Residuo de potencia modificado

- Se refiere al error en el balance de potencia en la interfaz tras haber aplicado la acción correctiva sobre el subsistema 2

$$\Phi(t) = \int_{t_0}^t |\delta P(t)_{\text{mod}}| dt = \int_{t_0}^t \left| \delta P_1^{\xi+1} + \left( \delta P_2^{\xi+1} \right)_{\text{mod}} \right| dt$$

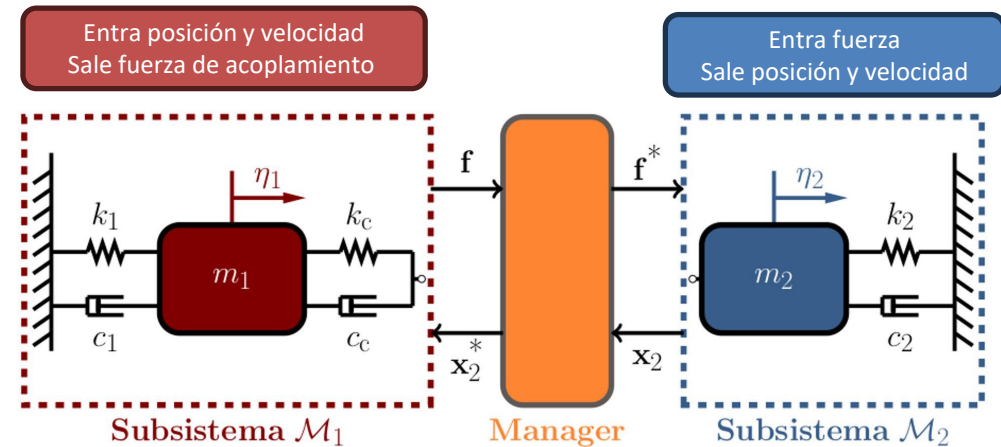


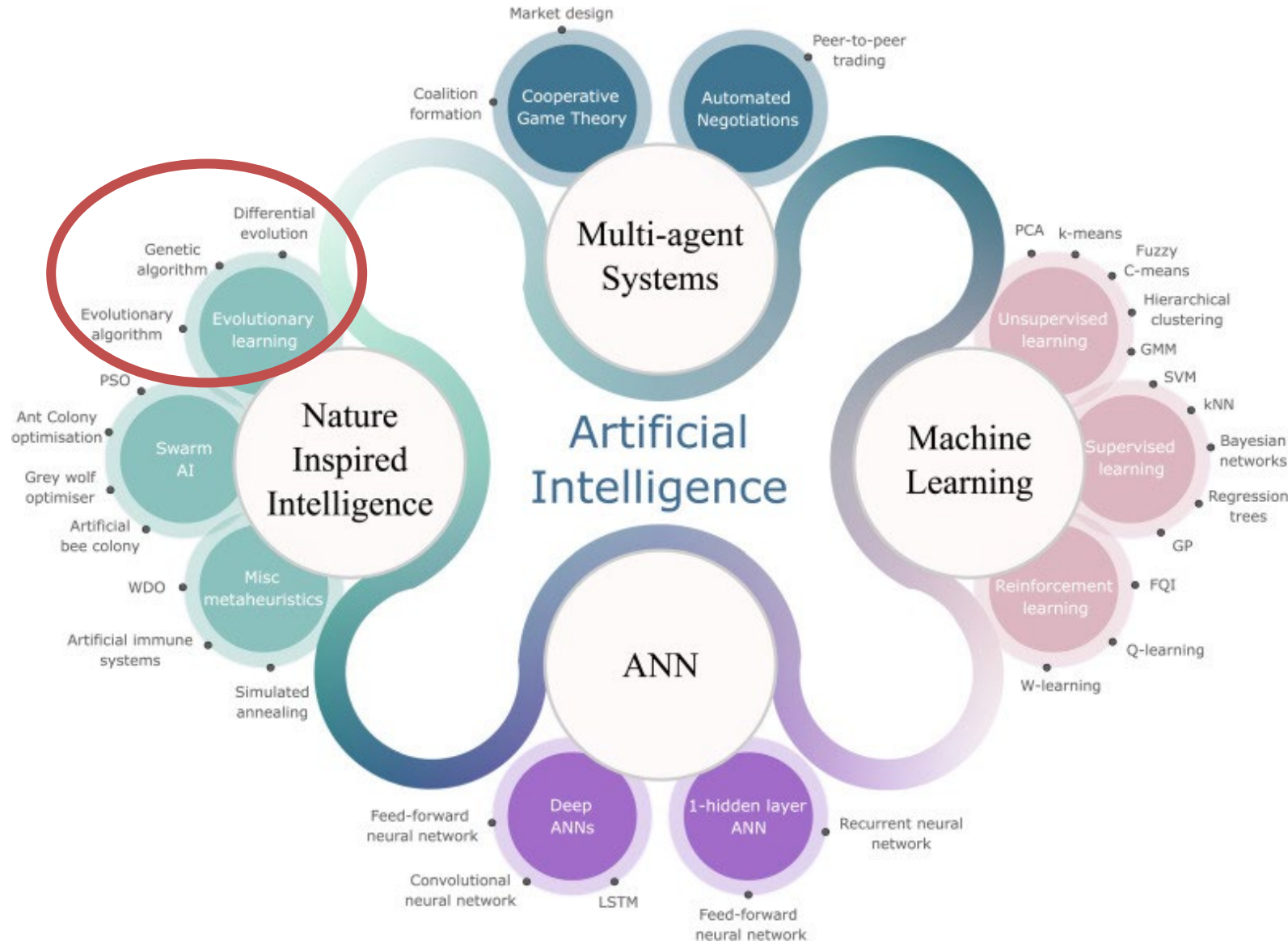


| Caso | $m_1$<br>[kg] | $m_2$<br>[kg] | $k_1$<br>[N/m] | $k_c$<br>[N/m] | $k_2$<br>[N/m] | $c_1$<br>[Ns/m] | $c_c$<br>[Ns/m] | $c_2$<br>[Ns/m] |
|------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 1    | 1             | 1             | 10             | 100            | 1000           | 0               | 0               | 0               |
| 2    | 1             | 1             | 10             | 100            | 1000           | 0,1             | 0,1             | 0,1             |
| 3    | 1             | 1             | 10             | 1000           | 100            | 0               | 0               | 0               |
| 4    | 1             | 1             | 10             | 1000           | 100            | 0,1             | 0,1             | 0,1             |
| 5    | 1             | 1             | 1000           | 100            | 10             | 0               | 0               | 0               |
| 6    | 1             | 1             | 1000           | 100            | 10             | 0,1             | 0,1             | 0,1             |
| 7    | 10            | 1             | 10             | 100            | 1000           | 0               | 0               | 0               |
| 8    | 1             | 10            | 10             | 100            | 1000           | 0               | 0               | 0               |

## Oscilador lineal

- Ampliamente utilizado en la literatura
- Existe solución analítica
- Todos los parámetros permanecen constantes
- Se divide en dos subsistemas siguiendo un esquema fuerza-desplazamiento, donde:
  - El primer subsistema presenta *direct-feedthrough*
  - El segundo devuelve estados internos





## ¿Por qué algoritmos evolutivos?

- Permiten utilizarse cuando apenas hay información sobre el problema a resolver.
- Permiten explorar espacios de soluciones amplios.
- Se han probado:
  - a) Algoritmo genético -> gran popularidad.
  - b) Algoritmo evolutivo diferencial -> obtiene mejores soluciones.

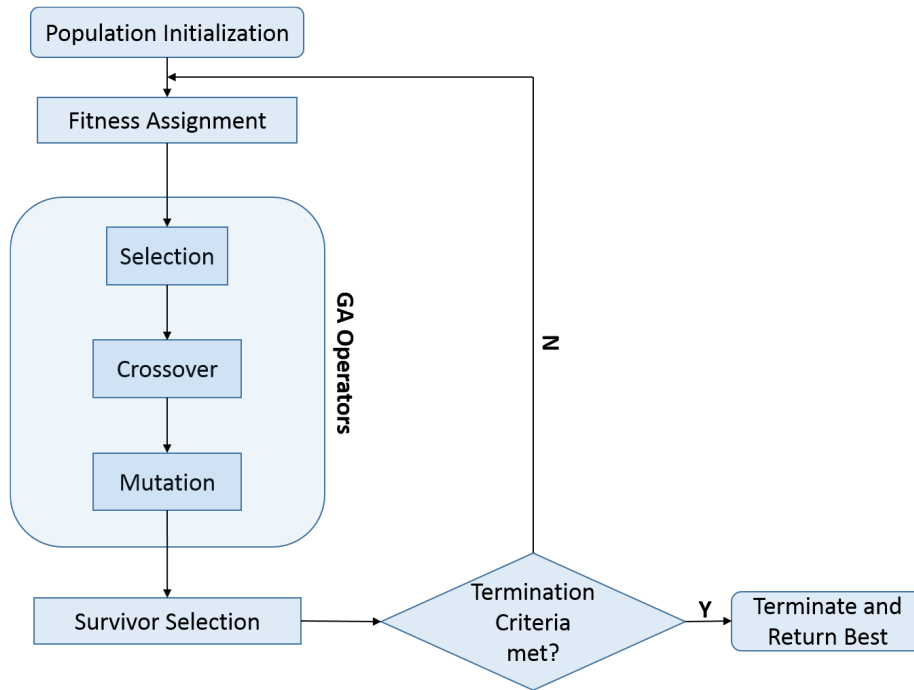
## ¿Cómo medir el desempeño de una solución?

- Se utilizan funciones de calidad que únicamente tienen que garantizar que:
  - a) Si  $f(a) > f(b)$ , a es mejor individuo que b.
  - b) Si la evaluación no es determinista, debe evaluarse varias veces y calcular un promedio.

## Codificar un individuo

- Cada uno de los individuos se codifica con 3 genes:
  - a) Coeficiente proporcional ( $\mu$ ).
  - b) Coeficiente integral ( $\lambda$ ).
  - c) Límite de la corrección ( $\Xi$ ).

$$f_{\text{corr}}^{\xi+1} = \mu \frac{\delta P^{\xi+1}}{\dot{\eta}_2^{\xi+1}} + \lambda \frac{\Gamma^{\xi+1}}{\dot{\eta}_2^{\xi+1} H}$$

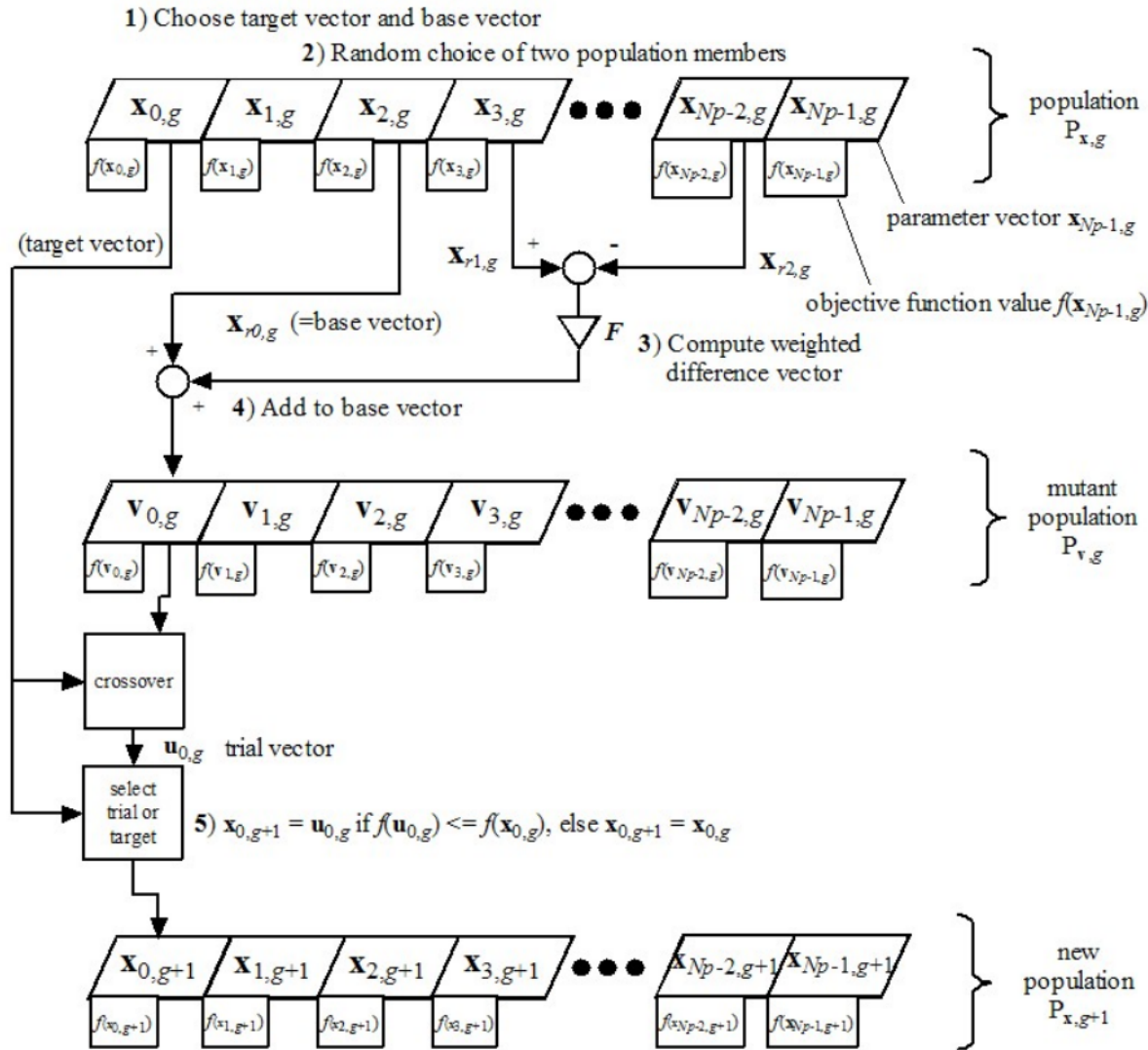


## Algoritmo

1. Creación de una población inicial.
2. Evaluación de la calidad de los individuos.
3. Operadores genéticos.
  - a) Selección
  - b) Cruce
  - c) Mutación
  - d) Evaluación.
4. Reemplazo con elitismo.
5. Volver a 2.) o terminar.

## Parámetros

- a) Selección (torneo con ventana de 2)
- b) Cruce BLX- $\alpha$  ( $\alpha = 0,5$  y probabilidad 0,5)
- c) Mutación (un gen por individuo)
  - i. Distribución normal de media 0 y desviación 0,2.
  - ii. Probabilidad de mutación 1/3
- d) Población 20 (distribución aleatoria uniforme)
- e) Generaciones 100



## Algoritmo

- Creación de una población inicial
- Mutación:
  - Selección aleatoria de 3 miembros
  - Se calcula la diferencia entre 2 de ellos
  - Se multiplica por un factor de amplificación ( $F$ )
  - Se suma este valor al tercer miembro (creación de mutante)
- Se repite 2.) tantas veces como individuos en la población
- Cruce (binomial)
  - Cada mutante se cruza con la población inicial -> trial vector
  - Evaluar la calidad del cruce
  - Actualizar población inicial (target) si el cruce fuese mejor
- Volver a 2.) o terminar

## Parámetros

- Factor de amplificación  $F = 1$
- Cruce binomial  $CR = 0,3$
- Población 20 (distribución aleatoria uniforme)
- Generaciones 100



## Opción 1 (Validación)

- Se dispone de una solución analítica del sistema a estudiar
- Se emplea para validar el código y la implementación del algoritmo de IA
- Se puede definir una función de error como el error cuadrático medio entre la energía analítica y co-simulada:

$$\epsilon = \sqrt{\frac{\sum_{\xi=0}^n (E^{\xi} - (E^{\xi})^{\text{ref}})^2}{n}}$$

- Es necesario poder evaluar la energía de cada subsistema
- **Los subsistemas no son cajas negras**
- **No da generalidad al método**

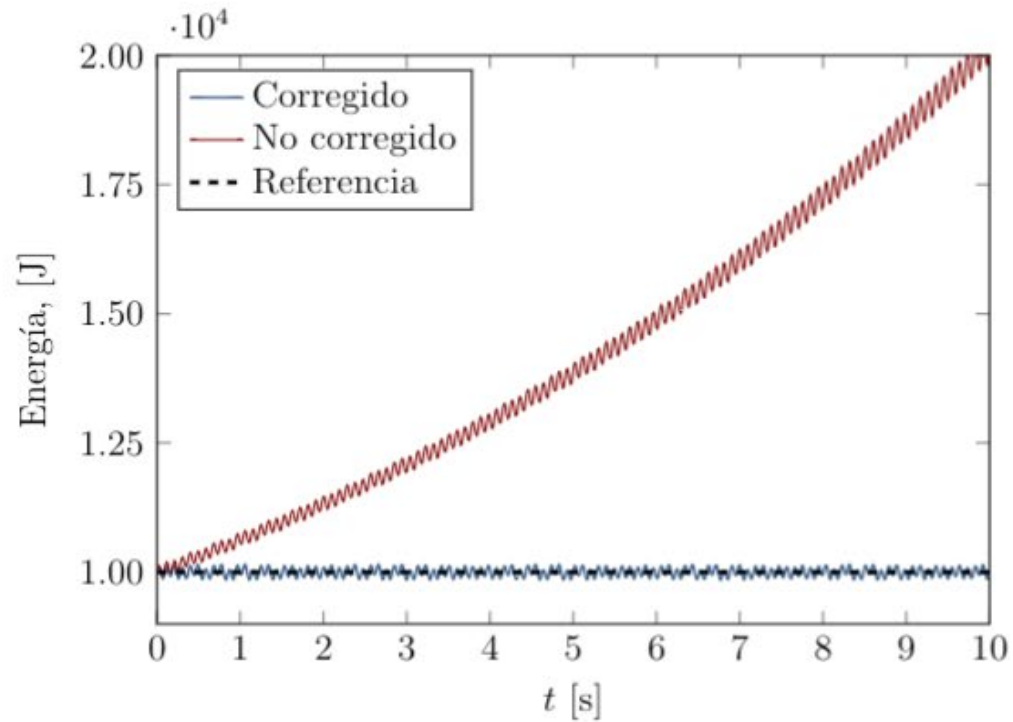
## Opción 2

- No se utiliza la solución analítica para la corrección
- Se define una función de error como el residuo de energía modificado:

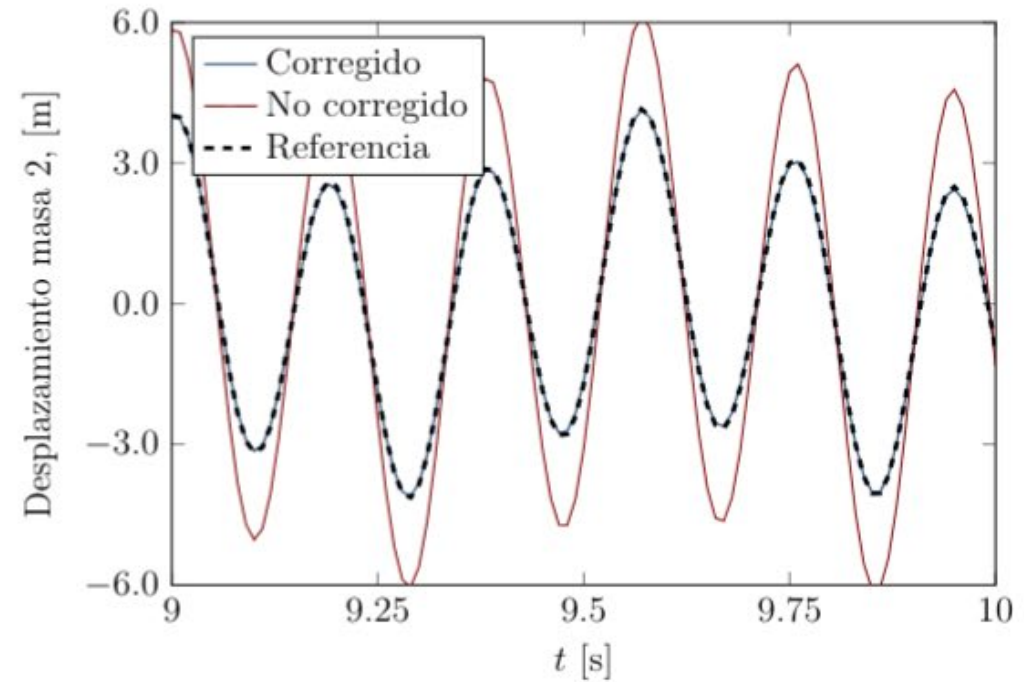
$$\Phi(t) = \int_{t_0}^t |\delta P(t)_{\text{mod}}| dt$$

- Sólo es necesario conocer las variables de acoplamiento de los subsistemas
- **Los subsistemas pueden considerarse como cajas negras**
- **Da generalidad al método**

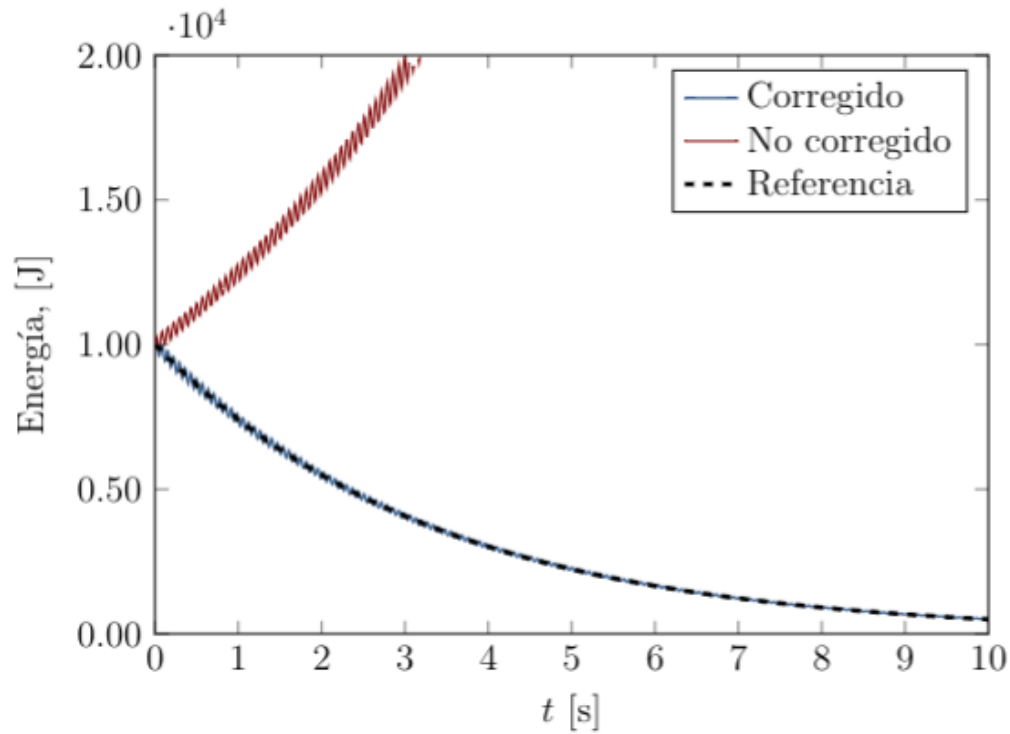




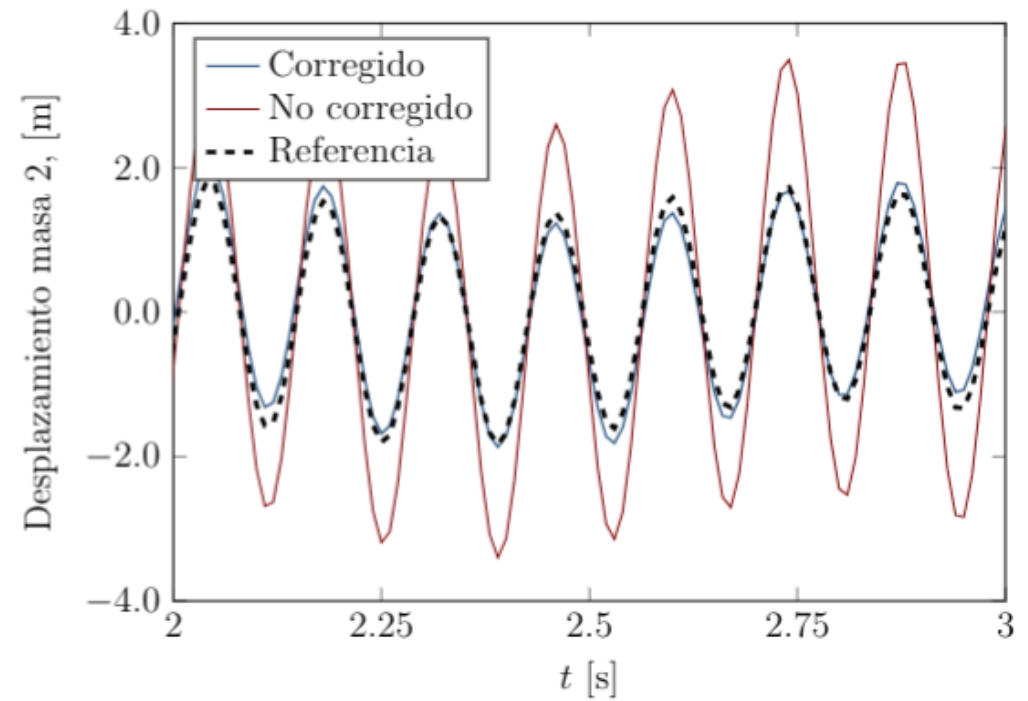
(a) Energía.



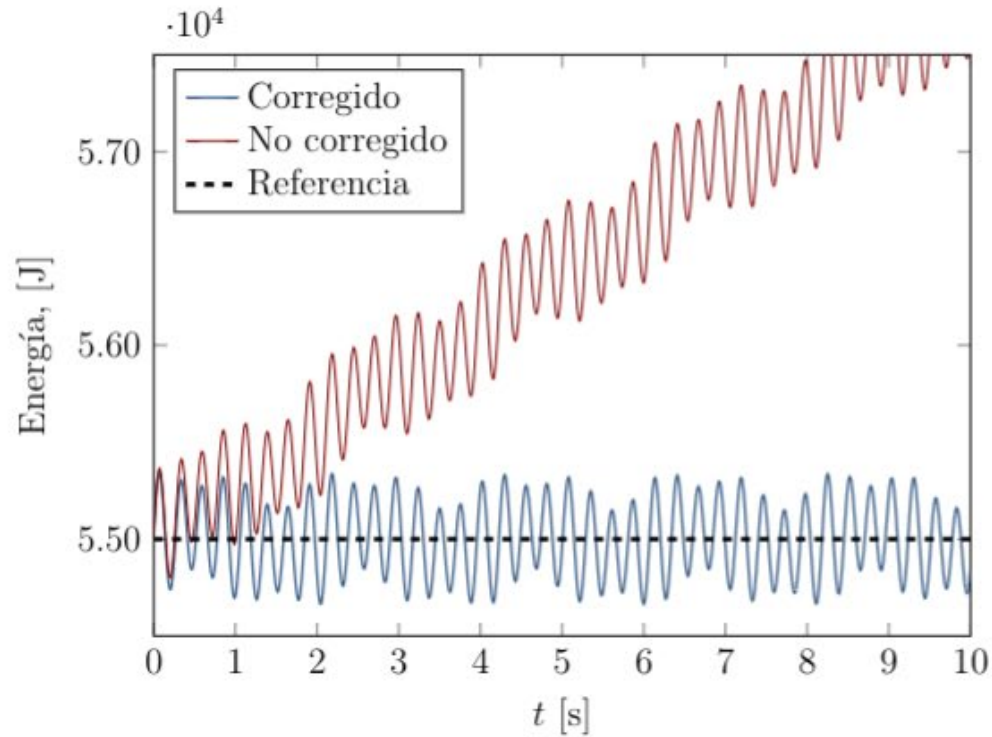
(b) Desplazamiento de la masa  $m_2$ .



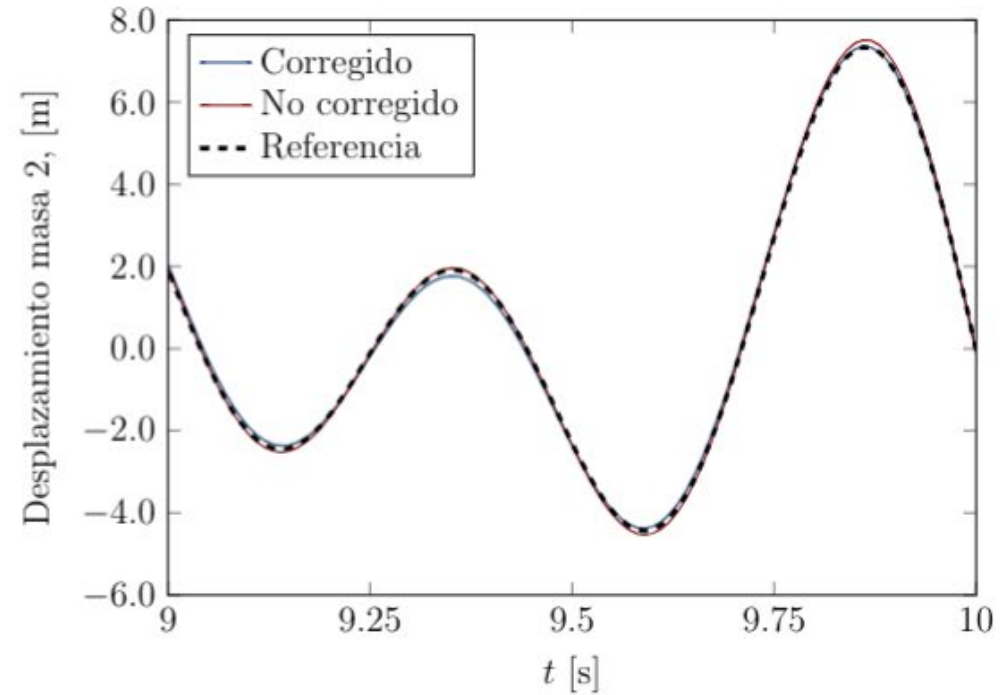
(a) Energía.



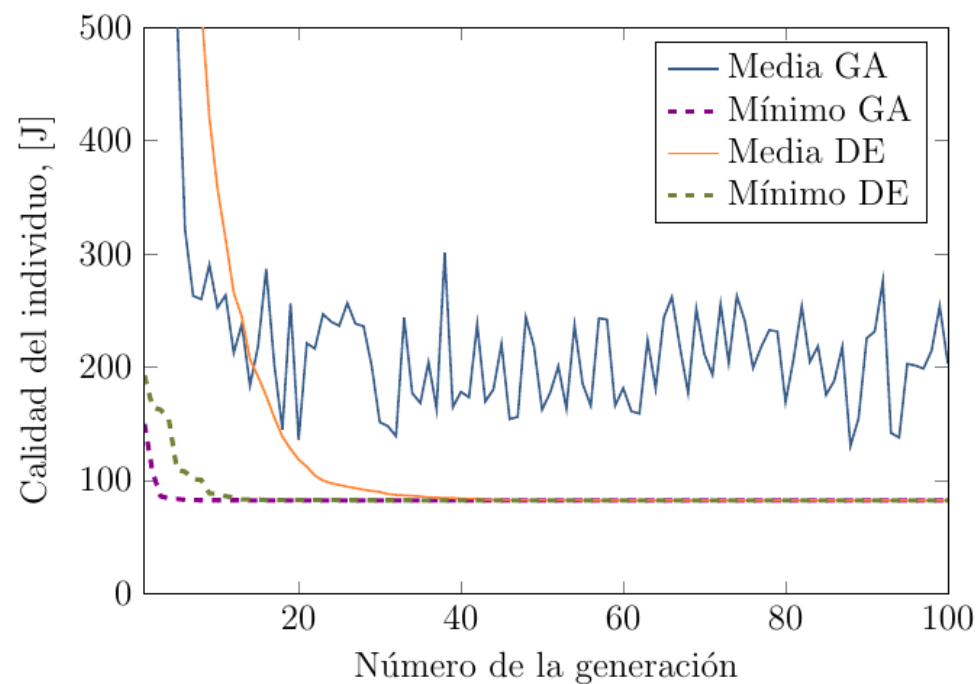
(b) Posición de la masa  $m_2$ .



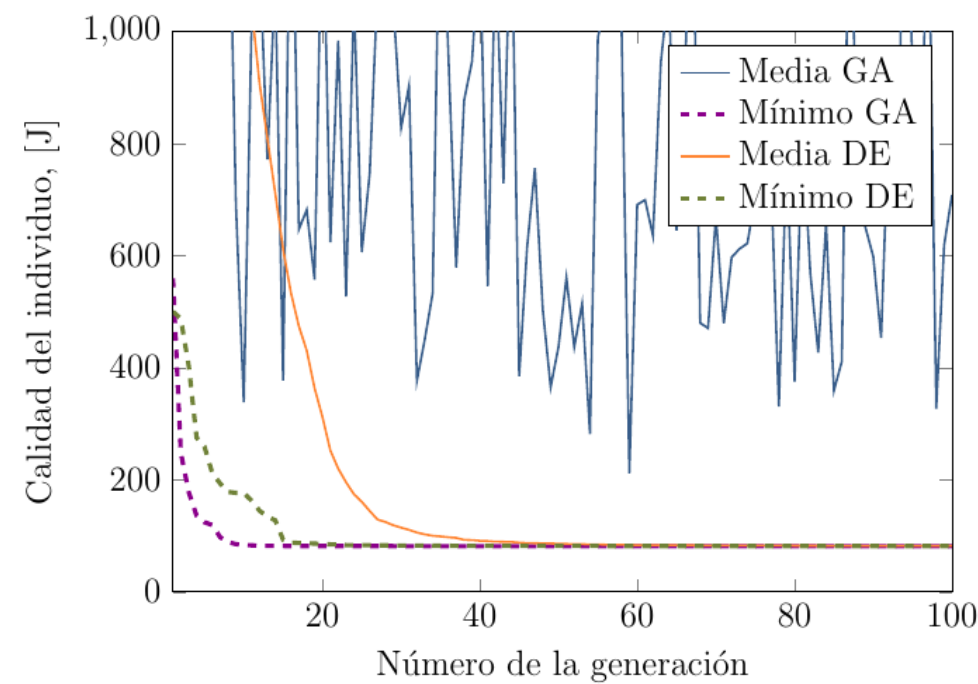
(a) Energía.



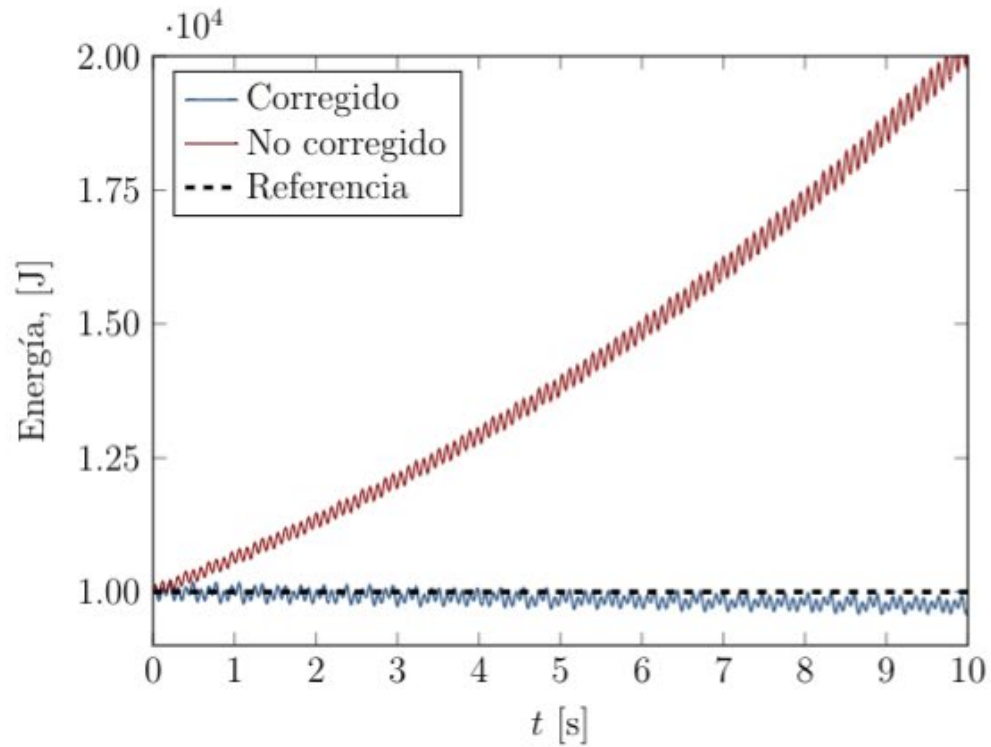
(b) Posición de la masa  $m_2$ .



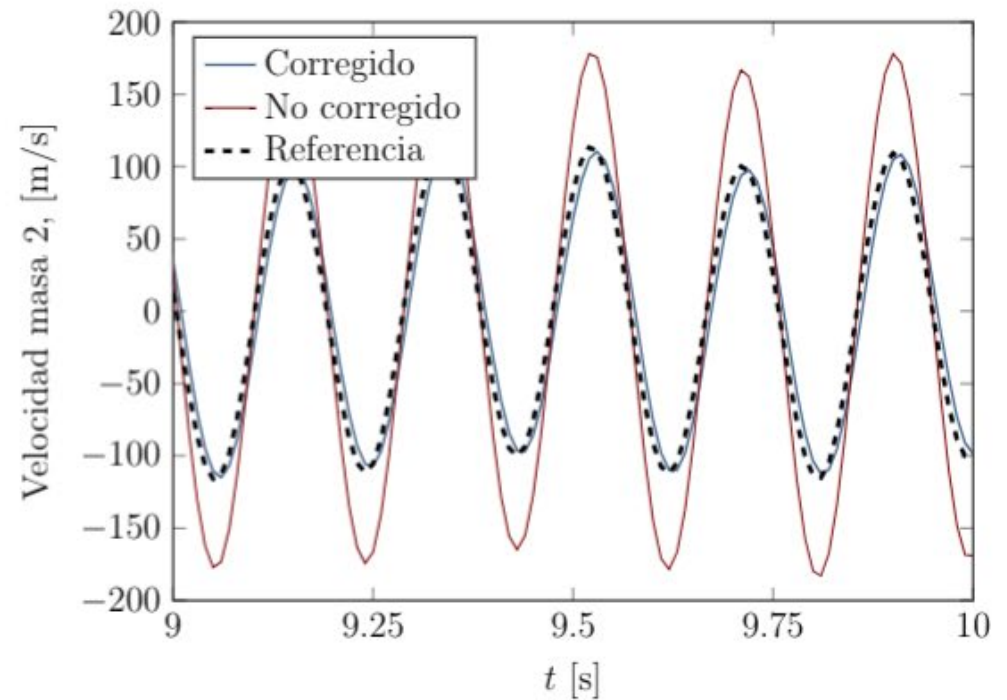
**Caso 1**



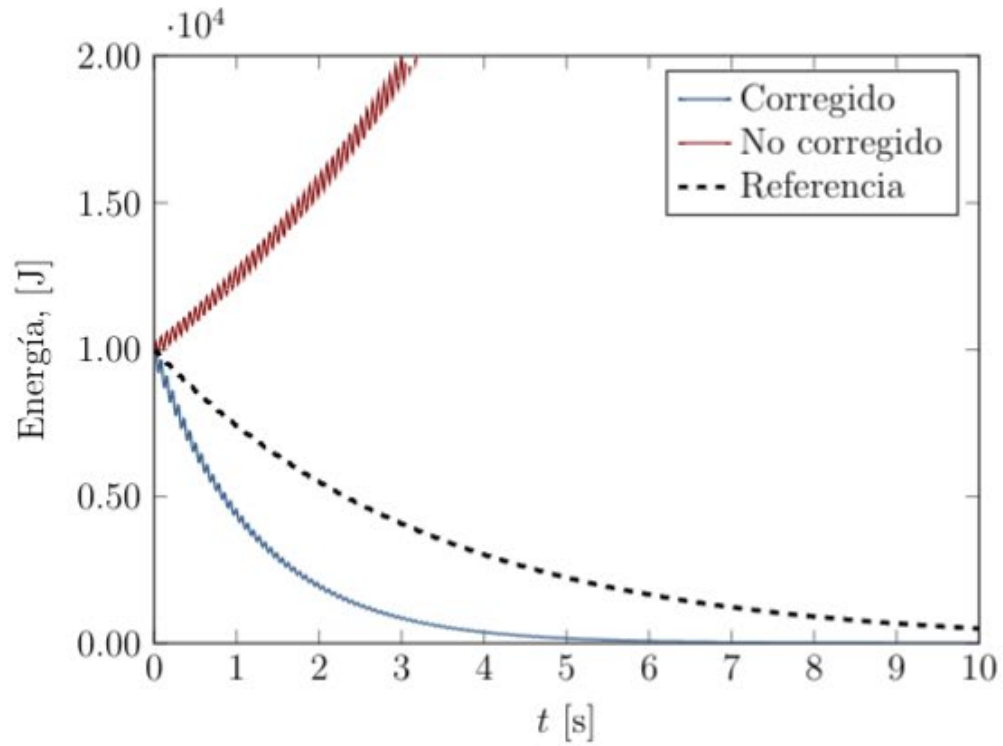
**Caso 4**



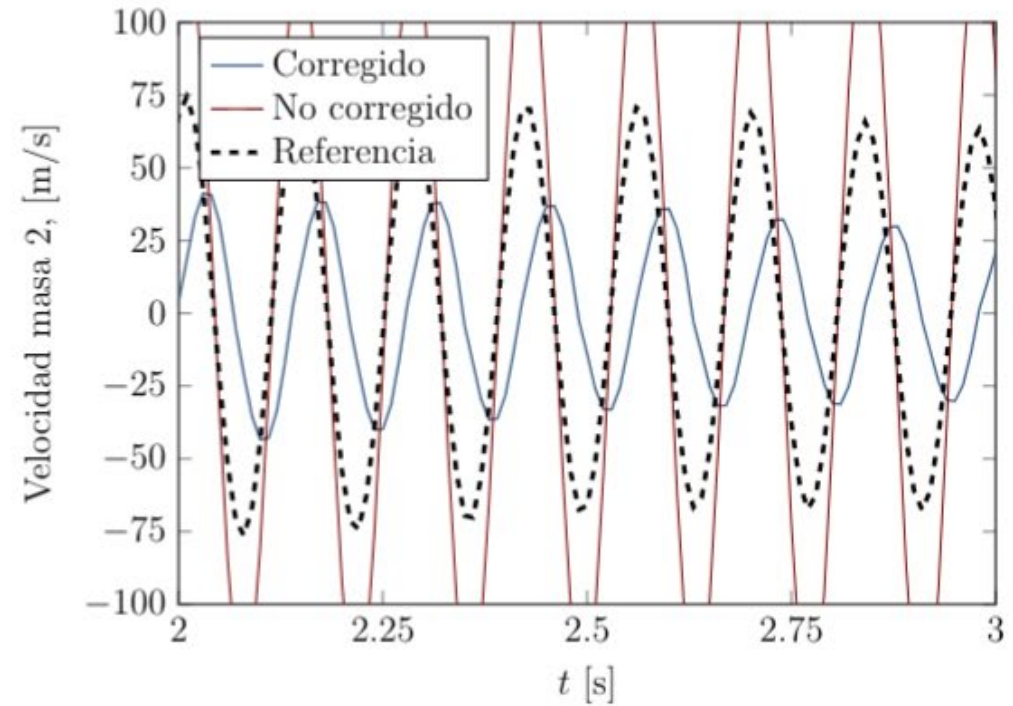
(a) Energía.



(b) Velocidad de la masa  $m_2$ .

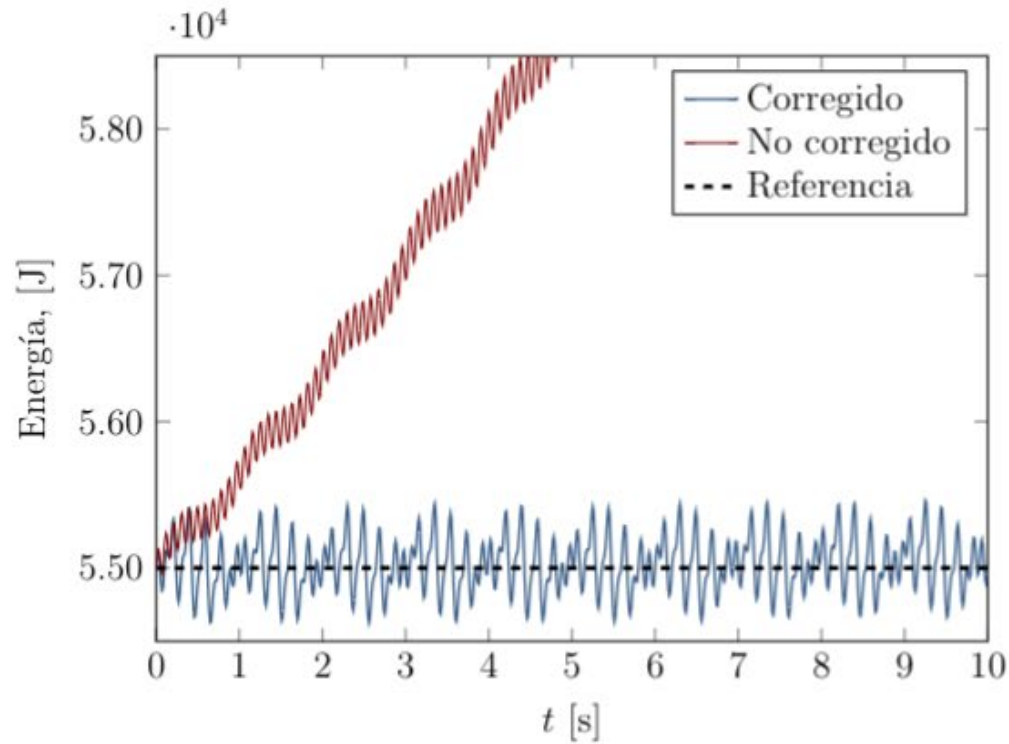


(a) Energía.

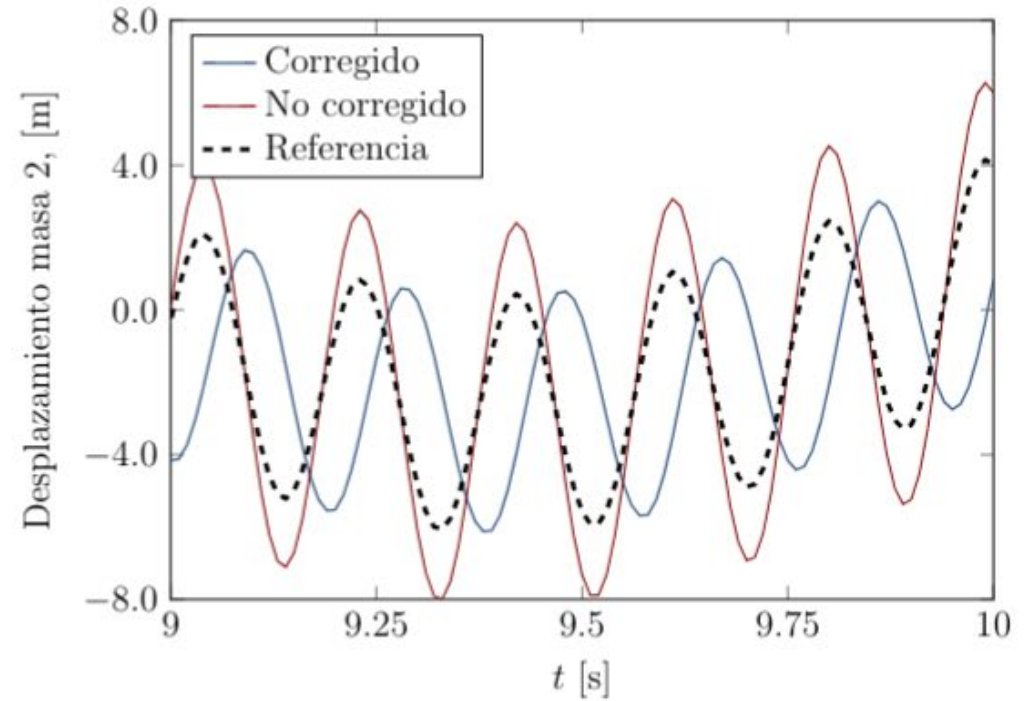


(b) Velocidad de la masa  $m_2$ .

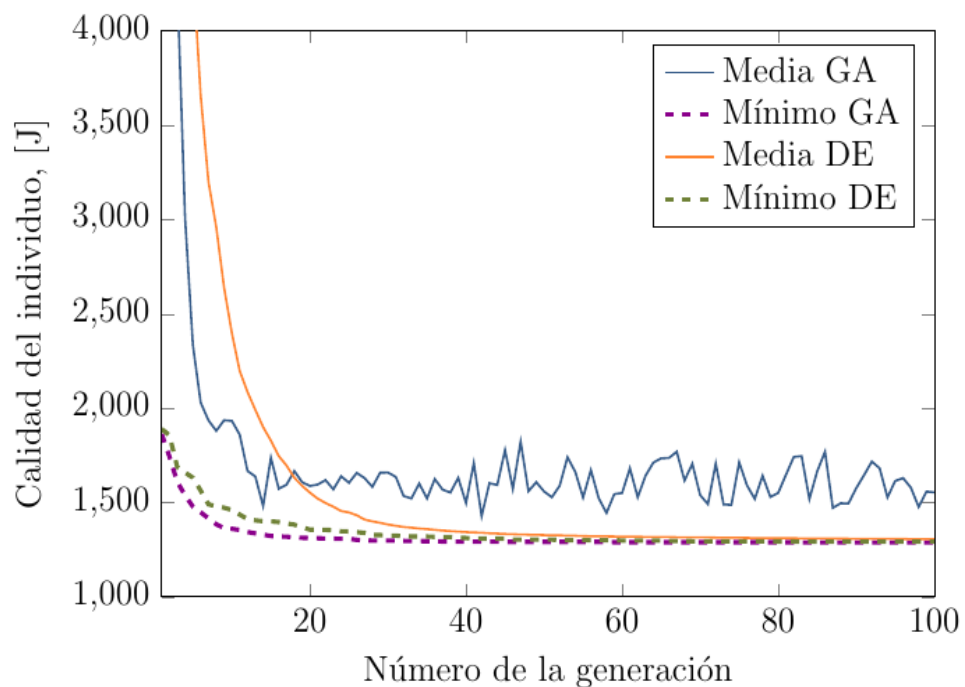




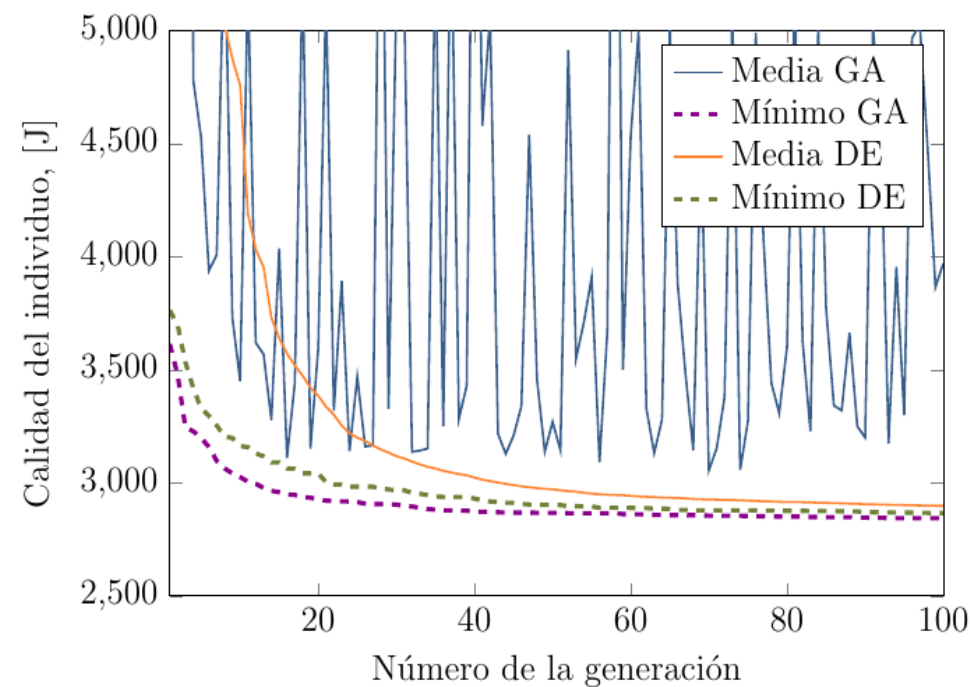
(a) Energía.



(b) Posición de la masa  $m_2$ .



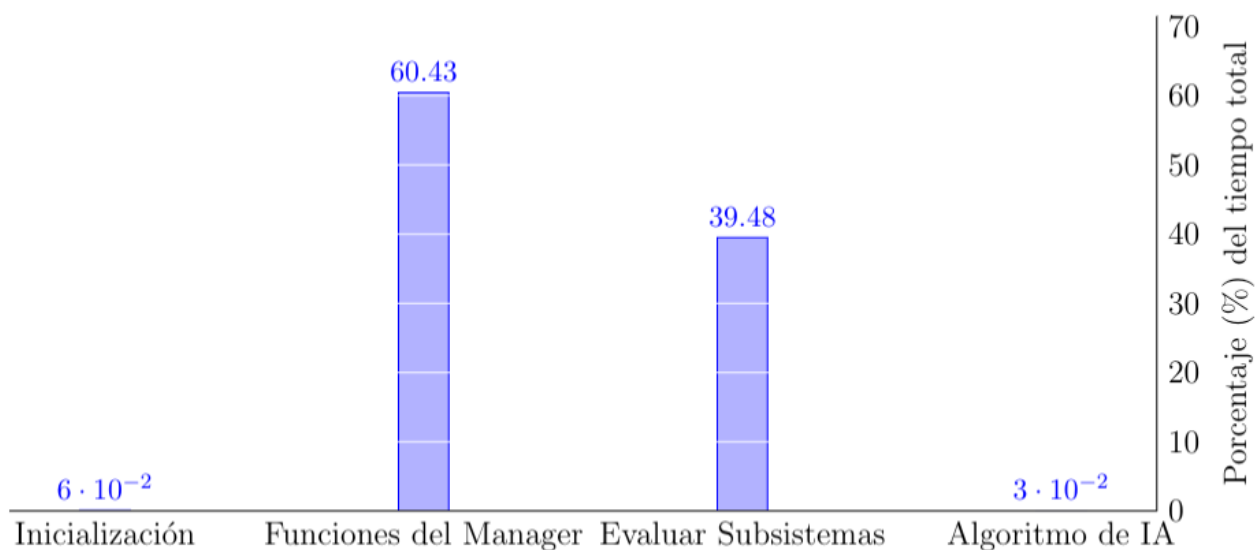
**Caso 1**



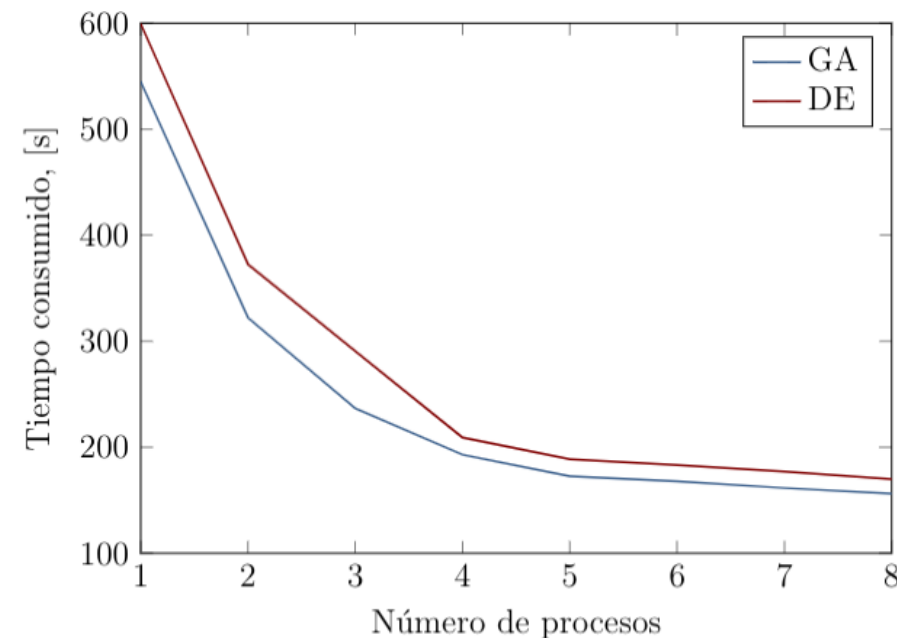
**Caso 4**



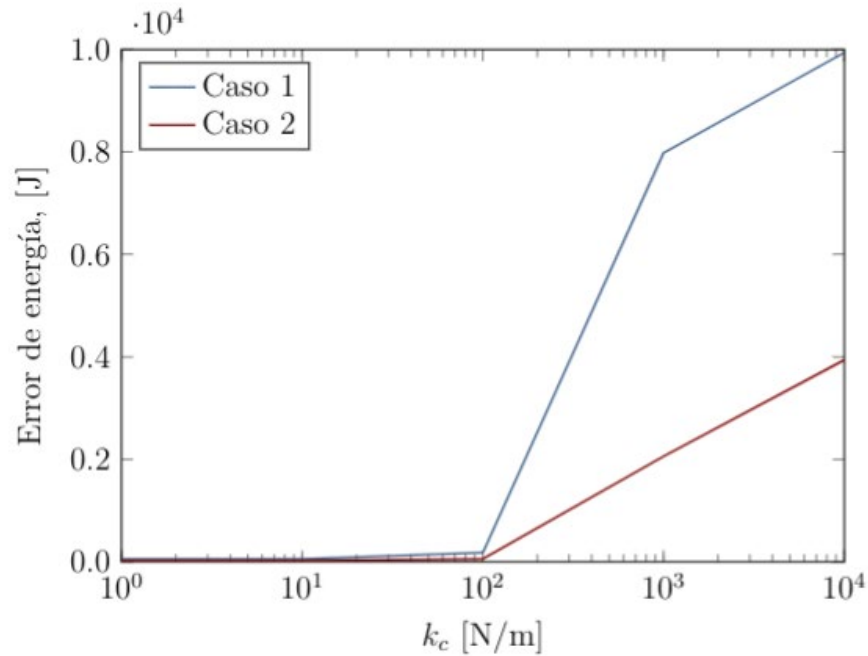
**Porcentaje del tiempo consumido por las principales tareas (cProfile 1 proceso)**



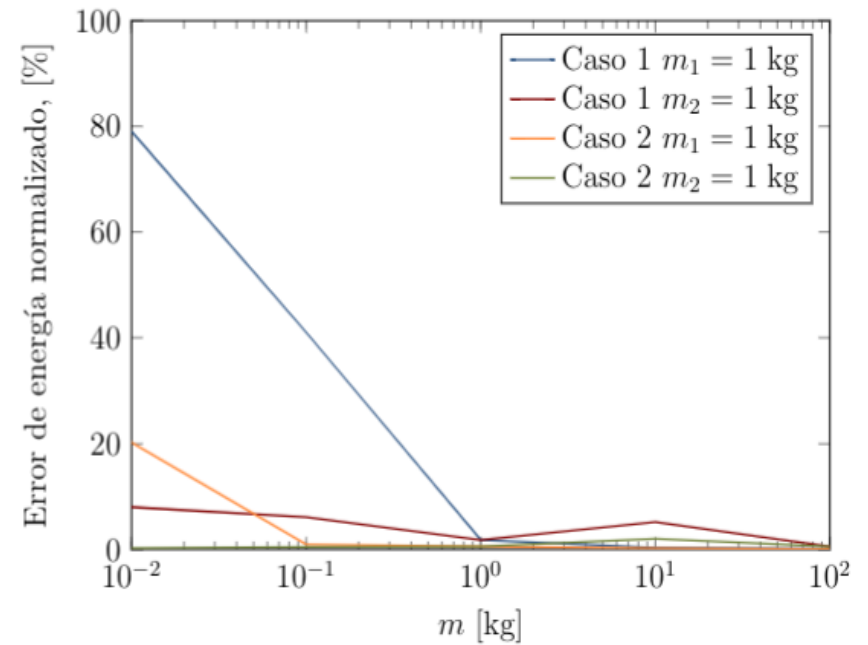
**Tiempo consumido (SCOOP multiproceso)**



## Resultados tras aplicar la corrección según la opción 2



**Error de energía al variar la rigidez del acoplamiento**



**Error de energía normalizado al variar las masas**

### Conclusiones

- Los algoritmos evolutivos se han mostrado útiles para poder obtener automáticamente los parámetros del manager en un sistema de co-simulación.
- El aumento de la rigidez en el acoplamiento empeora las soluciones obtenidas, especialmente con métodos que no usan la energía analítica.
- Las correcciones basadas en métodos energéticos no necesariamente corrigen la dinámica.

### Trabajo futuro

- Estudio de otros indicadores basados en únicamente variables de acoplamiento
- Extensión a *multi-rate*, sistemas no lineales y otros esquemas de co-simulación
- Explorar otras técnicas de inteligencia artificial para mejorar los resultados.

# Optimización de parámetros de co-simulación de sistemas mecánicos utilizando técnicas de inteligencia artificial

*Autora: Iraisy Carolina Figueroa Silva*

*Tutores: José Antonio Becerra Permuy*

*Francisco Javier González Varela*

*Máster Universitario en Informática Industrial y Robótica*

**Ferrol, 13 de julio de 2023**