



Universidad
Carlos III de Madrid

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE SISTEMAS Y AUTOMÁTICA

TESIS DE MÁSTER

**CARACTERIZACIÓN Y ESTUDIO DE SISTEMAS CON
HISTÉRESIS DE TIPO BOUC-WEN**

Autor: Alejandro Martín Clemente

Director: Prof. Luis Moreno Lorente

MÁSTER OFICIAL EN
ROBÓTICA Y AUTOMATIZACIÓN

LEGANÉS, MADRID

NOVIEMBRE 2011

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID
MASTER OFICIAL EN ROBÓTICA Y AUTOMATIZACIÓN

El tribunal aprueba la tesis de Master titulada
"CARACTERIZACIÓN Y ESTUDIO DE SISTEMAS
CON HISTÉRESIS DE TIPO BOUC-WEN " realizada por
Alejandro Martín Clemente.

Fecha: NOVIEMBRE 2011

Tribunal:

Dr. Santiago Garrido Bullón

Dra. Concepción Alicia Monje Micharet

Dra. Dolores Blanco Rojas

El que gana nunca se rinde, y el que se rinde nunca gana...

Índice general

Índice de Figuras	X
Índice de Tablas	XIV
Agradecimientos	XVII
Resumen	XIX
Abstract	XXI
1. Introducción	1
1.1. Motivación y origen de la tesis	2
1.2. Proyecto HYPER	3
1.3. Objetivos	6
2. Estado del arte	7
2.1. Técnicas de identificación de histéresis	8
3. ¿Qué es el Modelo Bouc-Wen?	11
3.1. Introducción	11
3.2. Consideraciones preliminares	14
3.2.1. Estabilidad BIBO	15

3.3.	El modelo	17
3.4.	Tipo de señales de entrada	18
3.5.	El modelo de Bouc-Wen normalizado	19
3.6.	Identificación del modelo Bouc-Wen	21
3.6.1.	Optimización	21
4.	Evolución Diferencial	23
4.1.	Optimización	23
4.2.	Evolución Diferencial	26
4.2.1.	Motivación	27
4.2.2.	Funcionamiento	28
4.2.2.1.	Mutación	30
4.2.3.	Ventajas y desventajas del algoritmo de ED	31
4.2.4.	Pseudo-Código del optimizador	32
5.	Parametrización del modelo de Bouc-Wen normalizado	33
5.1.	Método propuesto	33
5.1.1.	Estrategia de optimización	34
5.1.2.	Funciones de coste	34
5.1.3.	Resolución de integrales	36
5.2.	Resultados	38
5.3.	Espacio de soluciones	42
5.4.	Sensibilidad de las variables	44
5.4.1.	Sensibilidad a la variable ρ	44
5.4.2.	Sensibilidad a la variable σ	45
5.4.3.	Sensibilidad a la variable k_x	45
5.4.4.	Sensibilidad a la variable k_y	46
5.4.5.	Sensibilidad a la variable n	46
5.4.6.	Conclusiones	46

6. Diseño de un controlador PID para un sistema con histéresis BW	49
6.1. Método propuesto	49
6.2. Planteamiento del Problema	49
6.3. Diseño del controlador PID	50
6.4. Simulaciones del sistema propuesto	52
6.5. Resultados de la simulación	54
7. Resultados. Aplicación en un Embrague Magnetoreológico	59
7.1. Introducción	60
7.2. Fluidos Magnetoreológicos	61
7.2.1. Principio de funcionamiento	61
7.2.2. Modos de funcionamiento	63
7.3. Diseño propuesto de actuador	64
7.3.1. Cálculos para el par transmitido	65
7.3.2. Simulaciones del embrague propuesto	66
7.3.3. Resultados preliminares	67
7.3.4. Rehabilitación funcional	68
7.3.5. Ventajas para los terapeutas	70
8. Control de aleación con memoria de forma	71
8.1. Aleaciones con memoria de forma	71
8.2. Control de una fibra SMA	71
8.3. Funcionamiento del nitinol	72
8.4. Búsqueda del punto de inicial de trabajo	74
8.5. Identificación I de la histéresis en una SMA	78
8.6. Identificación II de la histéresis en una SMA	79
8.7. Comparativa entre las estrategias de identificación	80
8.8. Control de la histéresis	81
9. Conclusiones y trabajos futuros	83
9.1. Trabajos futuros	84

A. Código de identificación del modelo Bouc-Wen (m-file)	87
Referencias	91

Índice de figuras

1.1. Logo del proyecto HYPER. (Acrónimo de) Dispositivos Híbridos Neuroprotésicos y Neurorobóticos para Compensación Funcional y Rehabilitación de Trastornos del Movimiento.	3
2.1. Evolución de las publicaciones acerca del modelo Bouc-Wen.	9
3.1. Fuerza en función del desplazamiento para una función con histéresis	12
3.2. Ejemplo de modelo Bouc-Wen que no disipa energía	17
3.3. Forma general de las señales de entrada	19
4.1. Función monomodal. Búsqueda del punto óptimo	25
4.2. Función multimodal a escala local. Búsqueda del mínimo global.	26
4.3. Differential Evolution. Planteamiento inicial del problema.	28
4.4. Differential Evolution. Selección de la población con valores aleatorios y generación del vector de prueba \mathbf{u}_0	29
4.5. Differential Evolution. Puesto que posee el menor coste, u_0 reemplaza el vector con índice 0 en la siguiente generación.	31
5.1. Error Cuadrático vs Generaciones para un <i>crossover</i> = 0.4	38
5.2. Error Cuadrático vs Generaciones para un <i>crossover</i> = 0.6	39

5.3. Error Cuadrático vs Generaciones para un <i>crossover</i> = 0.8	39
5.4. Error Cuadrático vs Generaciones para un <i>crossover</i> = 0.9	40
5.5. Error Cuadrático vs Generaciones para un <i>crossover</i> = 1	40
5.6. Error Cuadrático vs Generaciones para una <i>población</i> = 60	41
5.7. Error Cuadrático vs Generaciones para una <i>población</i> = 80	41
5.8. Error Cuadrático vs Generaciones para una <i>población</i> = 100	42
6.1. Modelo Simulink del sistema mecánico propuesto	53
6.2. Posición referencia, real simulada y error	55
6.3. Velocidad referencia, real simulada y error	56
7.1. Partículas magnéticas en suspensión en un medio líquido (aceite)	61
7.2. Formación de estructuras paralelas al campo magnético aplicado	62
7.3. Modos básicos de operación: (a) pressure driven mode, (b) direct shear mode	63
7.4. Diseño preliminar del embrague MR	64
7.5. Esquema básico de la co-simulación del embrague	66
7.6. Motor ultrasónico USM-TRUM-60-RA	68
7.7. Par realizado por el paciente con un 70 % de ayuda	69
7.8. Co-simulación entre MSMS®-Simulink®	70
8.1. Elongación en una SMA.	72
8.2. Fases de una SMA.	73
8.3. Temperatura frente a deformación para una SMA Dynalloy, co- menzando en fase austenítica con una tensión de 172MPa.	74
8.4. Señal de entrada para el proceso de inicialización.	75
8.5. Búsqueda del punto inicial de partida del ciclo de histéresis (mar- cado en rojo).	77
8.6. Señales triangulares desfasadas q para identificar la histéresis. . .	78
8.7. Ciclo de histéresis. En rojo, curva de subida (<i>loading part</i>) de un ciclo de histéresis.	79

8.8. Esquema de control PID para la SMA alimentada en intensidad y realimentada en posición.	81
9.1. Microventilador. Modelo: SUNON®, UB393-500.	84
9.2. Estrategia de control híbrida mediante el uso del compensador de Prandtl-Ishlinskii.	85
9.3. Microcontrolador e interfaz de control del dispositivo de rehabilitación.	86

Índice de tablas

3.1. Clasificación de los modelos Bouc-Wen con estabilidad tipo BIBO	18
3.2. Clasificación de los modelos Bouc-Wen normalizados con estabilidad tipo BIBO	21
5.1. Distancia de una solución al origen.	43
5.2. Distancias y valor ρ del ajuste, para diversas soluciones con el parámetro ρ forzado a un intervalo	44
5.3. Distancias y valor σ del ajuste, para diversas soluciones con el parámetro σ forzado a un intervalo	45
5.4. Distancias y valor k_x del ajuste, para diversas soluciones con el parámetro k_x forzado a un intervalo	45
5.5. Distancias y valor k_y del ajuste, para diversas soluciones con el parámetro k_y forzado a un intervalo	46
5.6. Distancias y valor n del ajuste, para diversas soluciones con el parámetro n forzado a un intervalo	46
7.1. Par transmitido para diferentes configuraciones del embrague y peso total del dispositivo	67

Agradecimientos

Aparte de mi familia más cercana, padres y hermanos, me gustaría agradecer a Jorge su infinita ayuda en la realización de este proyecto. Además, después de tantas historias que hemos vivido juntos, ¡y las que quedan! que menos que mencionarle en una línea de esta Tesis.

También he de dar las gracias a Bea, ya que es la que a diario suele aguantar mis charlas y *frikadas* y que a la vez es la que me apoya y ayuda a seguir adelante.

Resumen

En la presente Tesis de Máster se pretende plantear una metodología para analizar y controlar sistemas con histéresis. Principalmente se estudiará el tipo de histéresis *Bouc-Wen*, y más concretamente técnicas de identificación de la misma basadas en algoritmos evolutivos. Una vez identificados los sistemas, se estudiarán diversas técnicas de control así como los posibles campos de aplicación de las mismas. Finalmente se plantean varios ejemplos de aplicación de estas técnicas de control en sistemas reales, tales como fibras SMA o un embrague magnetoreológico.

Bajo el proyecto HYPER, todo lo aquí presentado pretende contribuir al diseño de dispositivos portátiles neuroprotésicos y neurorobóticos (NR-MNP) para ser utilizados, tanto para la rehabilitación, como para la compensación funcional de los trastornos motores en las actividades de la vida diaria. El objetivo final es superar las principales limitaciones de las soluciones actuales en rehabilitación.

Palabras clave: Proyecto HYPER, histéresis, modelo Bouc-Wen, SMA, embrague magnetoreológico, control, Evolución Diferencial.

Abstract

This Master Thesis pretends to define a methodology to analyse and control systems with hysteresis. It will be focus mainly on the *Bouc-Wen* model of hysteresis, and more specifically on identification techniques based on evolutive algorithms. Once the system has been identified, various techniques of control and possible fields of application will be stated. Finally, several application examples of these control techniques in real systems have been studied, such as SMA materials or a magnetorheological clutch.

Under the HYPER project, everything presented in this document is intended to contribute to the design of neurorobotic and neuroprosthetics (NR-MNP) devices in order to be used both for rehabilitation and functional compensation of motor disorders in daily activities. The ultimate goal is to improve the current limitations of the classic rehabilitation devices.

Keywords: HYPER project, hysteresis, Bouc-Wen model, SMA, magnetorheological clutch, control, Differential Evolution.

Introducción

Las tareas de rehabilitación y/o recuperación de las funciones motrices en los miembros del cuerpo humano, apoyándose del uso de la robótica no son realmente nuevas ni desconocidas (Pons, 2008), pero su utilización en el ámbito médico se ha visto siempre gravemente limitado por ciertos factores, que tal vez, en el inicio de los desarrollos pasados no se habían tenido en cuenta como una parte fundamental en la aceptación o no del dispositivo mecatrónico en su uso dentro del citado ámbito médico de la rehabilitación. Estos factores pueden ser por ejemplo la **comodidad**, ya que que estos dispositivos no se debe olvidar que están pensados para utilizarse frecuentemente, solidarios al cuerpo humano. Este tipo de robots son denominados *wearable-robots* cuya traducción literal es robots vestibles, y principalmente están pensados para sustituir y/o ayudar las funciones del esqueleto humano. De aquí que encontremos el otro nombre *wearable-exoskeletons*, o exoesqueletos vestibles. Las características que deben buscarse son:

- La **comodidad** no sólo representa el peso del exoesqueleto, también incluye aspectos como el volumen, rozamientos con el cuerpo humano, ruido,

fuerzas de reacción generadas, facilidad de movimientos, etc. Un exoesqueleto será engorroso para el ser humano cuando los movimientos se vean parcialmente impedidos o los actuadores sean pesados o grandes.

- La *facilidad de uso*. Un exoesqueleto de rehabilitación debe de presentar una gran facilidad de uso (debe de ser *amigable* para el paciente y terapeuta). Para utilizarlo y configurar los movimientos de rehabilitación no se debe de precisar estudios de ingeniería, es por ello por lo que deberán de reducir todos los sistemas de control utilizados, hasta tal punto que sea factible su implementación en un entorno doméstico.
- La *portabilidad*. Es la capacidad del dispositivo de rehabilitación para ser trasladado de un lugar a otro de forma sencilla y que pueda ser puesto en marcha de forma casi inmediata. Es el punto más crítico de todo exoesqueleto, y es por ello por lo que la gran mayoría de los diseños pensados y estudiados no son viables. Para que un exoesqueleto pueda ser portable debe de tener una autonomía suficiente y que a su vez el peso no sea excesivo. Estas características son muy complicadas y a día de hoy son los grandes retos de la robótica aplicada en este campo.

1.1. Motivación y origen de la tesis

El la presente tesis se plantea como reto el modelado y control de un sistema no lineal, como el que pueden presentar los Neuro-Robots (NRs) utilizados en rehabilitación, y más específicamente los actuadores con un alto grado de histéresis que se pueden utilizar con este propósito.

Para ello se propone el uso de un algoritmo genético para la identificación

y optimización de la histéresis presente en los actuadores de un exoesqueleto. Además se han realizado una serie de experimentos en aleaciones con memoria de forma SMA. Una vez se han extraído los datos necesarios, se ha procedido al modelado de este material, así como un amplio análisis de los resultados obtenidos.

Con todo esto, se pretende en última instancia el desarrollo de un prototipo de embrague magnetoreológico para la rehabilitación de pacientes con problemas de movilidad en el codo. Además, gracias a la experiencia adquirida en dicho desarrollo, se permitirá la creación de una serie de normas basadas en los resultados empíricos, para el desarrollo de mejoras de dicho embrague así como de controladores similares para otros miembros del cuerpo.

La tesis aquí presentada se enmarca dentro del proyecto HYPER, sostenido por el programa CONSOLIDER-INGENIO 2010. Todo el contenido, resultados y conclusiones extraídos del presente documento serán incluidas en la memoria final del proyecto.

1.2. Proyecto HYPER



Figura 1.1: Logo del proyecto HYPER. (Acrónimo de) *Dispositivos Híbridos Neuroprotésicos y Neurorobóticos para Compensación Funcional y Rehabilitación de Trastornos del Movimiento.*

El proyecto HYPER pretende representar un avance significativo en la investigación de dispositivos neurorobóticos y neuroprotésicos en interacción cercana con el cuerpo humano, tanto en la rehabilitación como en la compensación funcional de trastornos motores en actividades de la vida diaria. El proyecto centrará sus actividades en nuevos neurorobots (NR) vestibles y neuroprótesis (NP) que combinarán estructuras biológicas y artificiales con el objetivo de superar las principales limitaciones de las soluciones robóticas actuales.

Los principales objetivos del proyecto son la restauración de la función motora en pacientes con lesión medular a través de la compensación funcional y promover el re-aprendizaje del control motor en pacientes afectados por accidente cerebro vascular y parálisis cerebral, por medio de un uso integrado de neurorobots y neuroprótesis.

El proyecto validará funcional y clínicamente el concepto de desarrollo de sistemas Humano-Robot híbridos para la rehabilitación compensación funcional de trastornos motores bajo el paradigma de asistencia bajo demanda. En la visión HYPER, se asume que el avance en las terapias de rehabilitación física depende de la obtención de una comunicación más transparente entre los sistemas humanos y las máquinas, y por lo tanto, se explorarán diferentes niveles de actividad neural humana.

Además se tratarán preguntas fundamentales en la frontera del conocimiento en diferentes disciplinas tecnológicas y científicas. Estas preguntas son investigadas en seis líneas de investigación (biomecánica, control neuromotor, tecnologías de control, tecnologías de sensores actuadores y alimentación, interfaces multimodales cerebro-máquina, adaptación de sistemas híbridos a escenarios de aplicación) con interacciones horizontales:

- Los sistemas tratarán la variabilidad en las estructuras neuromusculares humanas, con adaptaciones dinámicas acordes a las capacidades (motrices) residuales de los usuarios.
- La aproximación propuesta promoverá el reentrenamiento del control sensorial y motor, y la plasticidad cerebral. Esto podrá conducir a potenciales soluciones de rehabilitación de pacientes con apoplejía y parálisis cerebral, y a soluciones para la compensación funcional de pacientes con lesión medular.

HYPER propone una interfaz multimodal cerebro-máquina, cuyo objetivo principal es la exploración de los diferentes niveles de actividad neural, caracterizando las demandas específicas de apoyo y la participación del paciente, y así modificar la intervención a nivel periférico con los sistemas híbridos NR-NP.

El proyecto de manera global, propone un marco para los científicos con una formación muy especializada y técnicos de diversas disciplinas. El proyecto tiene por objeto lograr el conocimiento científico del más alto nivel y, al mismo tiempo, aprovechar las tecnologías que se están desarrollando en entornos reales (hospitales, centros de rehabilitación, etc.). Como consecuencia de ello, un equipo de los principales socios industriales en los distintos ámbitos han demostrado su compromiso con este proyecto y participará en el seguimiento y la exploración de los posibles resultados así como la viabilidad comercial de los mismo.

El proyecto HYPER está fundado y sostenido por el programa Consolider-Ingenio financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación del Gobierno de España.

Dentro de las necesidades del proyecto HYPER, el grupo de la Universidad Carlos III de Madrid tiene asignado el diseño de los actuadores del exoesqueleto debido a la alta experiencia en actuadores SMA, neumáticos, etc. del grupo de

investigación de Robótica y Automática. Es por este motivo por el cual se ha originado esta tesis de Máster y mediante la cual se pretende cumplir con los requisitos exigidos dentro del proyecto.

En gran medida, los actuadores estudiados en el ámbito del proyecto HYPER, fundamentalmente los basados en SMA y aquellos en los que intervendrán fluidos magnetoreológicos, presentan no linealidades en su funcionamiento que complican su control. Esta tesis supone el primer paso hacia el desarrollo de algoritmos de control para sistemas que presentan no linealidades del tipo histéresis.

1.3. Objetivos

Se van a enumerar los objetivos principales de esta tesis de Máster:

1. Identificación de ciclos de histéresis en materiales y dispositivos que presente este tipo de no linealidades.
2. Diseño y metodología de control para un dispositivo de compensación funcional del movimiento del codo humano.
3. Estudio de actuadores basados en aleaciones con memoria de forma (SMA), para su posible aplicación en otras articulaciones, como por ejemplo dedos humanos.
4. Planteamiento de una metodología de control para todos los dispositivos anteriores.

Capítulo 2

Estado del arte

Los sistemas no lineales presentan comportamientos que no se pueden expresar con ecuaciones de movimiento, evolución o comportamiento lineales. Todo esto presenta los inconvenientes para los investigadores, científicos, matemáticos, etc. de no poder aplicar las simplificaciones, suposiciones y aproximaciones que se utilizarán para la resolución de los problemas lineales.

Por otro lado, algunos sistemas no lineales tienen soluciones exactas o integrables, mientras que en otros puede resultar imposible llegar a ellas. Un ejemplo de este comportamiento caótico son las olas gigantes, circuitos magnéticos, aleaciones con memoria de forma (SMA), etc. cuyos fundamentos físicos son tan altamente complejos que hacen impensable su estudio a bajo nivel.

En sí, el fenómeno conocido como *histéresis* representa la dependencia histórica en los sistemas físicos. Si se piensa en deformar cualquier material plástico, puede que este no vuelva al estado original al cesar la fuerza aplicada, esto significa que el sistema presenta histéresis de algún tipo. Más específicamente, el término se suele utilizar para materiales magnéticos. Por ejemplo al desconectar un micrófono de una grabadora, los dominios magnéticos del casete no vuelven

a su configuración original (sino la música desaparecería). Esto significa que se debe de tener una serie de precauciones en las tareas de control de los dispositivos de este tipo, y es por ello por lo que se estudiará en lo sucesivo una metodología para conseguir este propósito.

2.1. Técnicas de identificación de histéresis

Es necesario modelar este tipo de no linealidades de modo que podamos estudiarlas y analizarlas, con herramientas matemáticas. Es por esto por lo que existen numerosos modelos y formulaciones matemáticas que intentan ajustar este tipo de fenómenos a expresiones analíticas. La elección de un modelo u otro depende en muchos casos de la complejidad del problema a resolver, potencia de cómputo disponible, etc. pero lo que se esconde detrás de todos ellos es asemejar lo observado con las expresiones que forman el modelo. Por este motivo todo modelado de histéresis en el fondo es una simplificación del problema, y como tal, hace que se pierda exactitud pero que a su vez permita manejarlo con una mayor destreza.

El modelo de *Bouc-Wen* es el que se estudiará en detalle en lo sucesivo debido a la flexibilidad que proporciona en cuanto a tipos de histéresis con los que es compatible. Es importante destacar que antiguamente este modelo apenas se utilizaba por la complejidad computacional que requería para un funcionamiento razonable, pero en la Figura 2.1 se observa como se ha incrementado el interés por este modelo en los años actuales, especialmente en lo que a identificación de histéresis se refiere, tema el cual será objeto de análisis en la presente tesis.

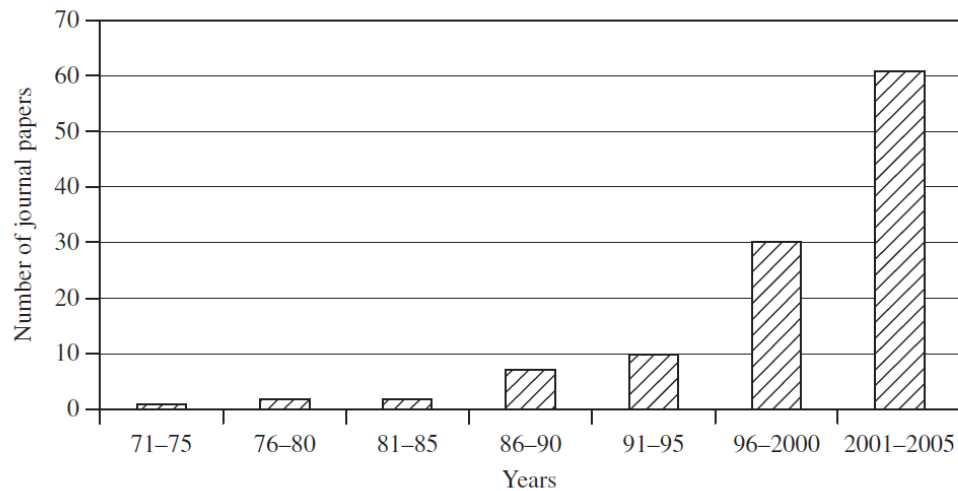


Figura 2.1: Evolución de las publicaciones acerca del modelo Bouc-Wen.

Más específicamente el tema más importante de un modelo de histéresis es conocer los parámetros del mismo, es decir, identificar la histéresis observada en el sistema físico con la aproximación al modelo elegido. Es por este motivo por el cual se encuentran numerosas publicaciones acerca de este tema, utilizando muy distintos tipos de algoritmos.

Trabajos sobre identificación los podemos encontrar en (Sues y Mau, 1988) donde se utiliza un algoritmo no recursivo de minimización del error. Un algoritmo recursivo de mínimos cuadrados es el que se usa en (Loh y Chung, 1993), junto con el método de Newton y filtros de Kalman.

Algoritmos genéticos también se han utilizado para la determinación de los parámetros del modelo de Bouc-Wen en (Ha, Fung, y Han, 2005) entre otras. De especial interés es (Kyprianou, Worden, y Panet, 2001), donde se usa un algoritmo de evolución diferencial, donde la principal diferencia respecto a los algoritmos genéticos convencionales está en los mecanismos de *mutación* y *cruce*.

Métodos basados en redes neuronales se han utilizado en (Xia, 2003), donde se desarrolla un modelo inverso de un amortiguador magnetoreológico, utilizando una red de percepción multicapa y una identificación basada en el modelo ARX.

La estimación Bayesiana se utiliza también en numerosas referencias. Como ejemplo en (Ching, Beck, y Porter, 2006), donde se utiliza una versión modificada del filtro de Kalman y de un filtro de partículas, para determinar los parámetros de un sistema de segundo orden con histéresis de tipo Bouc-Wen.

Por último, técnicas de identificación no paramétricas se han descrito en (Masri, Caffrey, Caughey, Smyth, y Chassiakos, 2004), donde la parte no lineal correspondiente a la histéresis del sistema se describe mediante una combinación lineal de funciones polinómicas con coeficientes desconocidos. Estos coeficientes se determinan utilizando un algoritmo de mínimos cuadrados.

El presente trabajo pretende utilizar una técnica evolutiva basada en Evolución Diferencial (ED) para la identificación de ciclos de histéresis, debido a la rapidez de convergencia así como a una facilidad de uso que hace viable su implementación en un sistema tan complejo de por sí como puede ser un material de tipo SMA.

Capítulo 3

¿Qué es el Modelo Bouc-Wen?

3.1. Introducción

El modelo Bouc-Wen es una metodología de modelado de sistemas que presentan histéresis de algún tipo, cuyo comienzo es el temprano artículo de Bouc (Bouc, 1971), donde se propusieron una serie de funciones que describían el fenómeno de la histéresis. Como se observa en la Figura 3.1 para una misma abscisa $x = x_0$ se tendrían varias ordenadas, esto indica que \mathcal{F} es una función que depende de su estado anterior además de las entradas para ese instante de tiempo. Si se considera que x es una función del tiempo, el valor de la fuerza en ese instante dependería del valor del desplazamiento x en ese instante de tiempo, pero también de los valores en instantes anteriores.

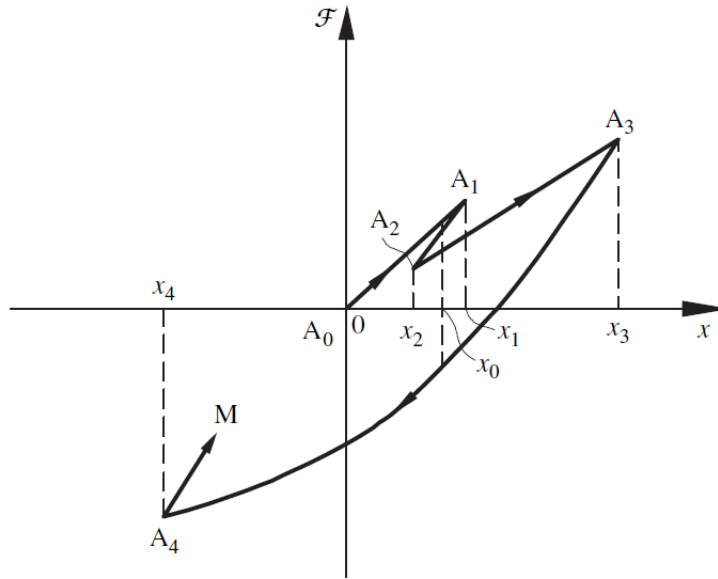


Figura 3.1: Fuerza en función del desplazamiento para una función con histéresis

Este tipo de funciones con la forma definida en la figura anterior, es lo que en la literatura actual se llama *rate-independent property* (Visintin, 1994). Para definir la forma de \mathcal{F} , en (Bouc, 1971) se consiguen agrupar numerosos trabajos anteriores, para llegar a los siguientes planteamientos matemáticos:

$$\frac{d\mathcal{F}}{dt} = g \left(x, \mathcal{F}, \text{sign} \left(\frac{dx}{dt} \right) \right) \frac{dx}{dt} \quad (3.1)$$

Considerando la ecuación

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \mathcal{F}(t) = p(t) \quad (3.2)$$

para una entrada dada $p(t)$ y las condiciones iniciales

$$\frac{dx}{dt}(t_0), \quad x(t_0), \quad \mathcal{F}(t_0)$$

Las ecuaciones (3.1) y (3.2) describen un oscilador armónico con histéresis. Para este símil basta considerar $p(t)$ como la fuerza de excitación del sistema

(dependiente del tiempo), $\mathcal{F}(t)$ la fuerza restauradora del sistema y x el desplazamiento del mismo.

Tal y como se muestra en la ecuación (3.1), la fuerza restauradora depende de la posición, estado, y si se encuentra en un estado de carga o descarga, etc. Estas características hacen que el sistema presente una histéresis de tipo Bouc, y será la que se considerará a partir de ahora (oscilador armónico con un muelle).

El problema reside ahora en lo que Bouc en (Bouc, 1971) hace denotar la dificultad de dar una solución explícita para la Ecuación (3.1), debido a la no linealidad de la función g . Por esta razón el autor propone el uso de una variante de la integral de Stieltjes (Bray, 1919) para definir esta función \mathcal{F} .

$$\mathcal{F}(t) = \mu^2 x(t) + \int_{\beta}^t F(V_s^t) dx(s) \quad (3.3)$$

donde $\beta \in [-\infty, +\infty)$ es el instante de tiempo posterior a la definición del desplazamiento y la fuerza. El término V_s^t es la variación total de x en el intervalo de tiempo $[s, t]$. La función F es elegida de forma que se satisfagan algunas propiedades matemáticas compatibles con la propiedad de histéresis. El siguiente ejemplo de esta elección dado en (Bouc, 1971) cumple las propiedades necesarias:

$$F(u) = \sum_{i=1}^N A_i e^{-\alpha_i u} \quad \alpha_i > 0 \quad (3.4)$$

Ahora es posible definir escribir las ecuaciones (3.2)-(3.4) de la siguiente forma:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + \mu^2 x + \sum_{i=1}^N Z_i = p(t) \quad (3.5)$$

$$\frac{dZ_i}{dt} + \alpha_i \left| \frac{dx}{dt} \right| Z_i - A_i \frac{dx}{dt} = 0 \quad (3.6)$$

Las ecuaciones (3.5) y (3.6) son lo que ahora se conoce como modelo de Bouc. Además la ecuación (3.6) se extendió en la referencia (Wen, 1976) para describir fuerzas restauradoras con histéresis de la siguiente forma:

$$\dot{z} = -\alpha|\dot{x}|z^n - \beta\dot{x}|z^n| + A\dot{x} \quad \text{para } n \text{ impar} \quad (3.7)$$

$$\dot{z} = -\alpha|\dot{x}|z^{n-1}|z| - \beta\dot{x}z^n + A\dot{x} \quad \text{para } n \text{ par} \quad (3.8)$$

Las ecuaciones (3.7) y (3.8) constituyen la versión más temprana de lo que actualmente se conoce como el modelo de Bouc-Wen.

3.2. Consideraciones preliminares

Cuando se utiliza el modelo Bouc-Wen para la descripción de una histéresis, puede ocurrir que la similitud con los datos reales sea muy buena, pero esto no necesariamente significa que se hayan conservado una serie de propiedades físicas inherentes a los datos reales, que además son independientes de la señal de excitación del sistema. Es por ello por lo que a continuación se presentan dos propiedades que son compartidas por la mayoría de los sistemas mecánicos y estructurales con histéresis y en algunos sistemas con histéresis de tipo magnético, y que deberán estar consideradas en el modelo Bouc-Wen de un sistema real.

- Propiedad 1:** En este tipo de sistemas se observan señales acotadas tanto en la entrada como en la salida, y es lo que se denomina estabilidad BIBO (*Bounded-Input Bounded-Output*). Esta propiedad es observada en sistemas mecánicos y magnéticos, siendo estables en lazo abierto.

3.2.1. Estabilidad BIBO

Según la definición dada en (Ogata, 2001), sean $u(t)$, $y(t)$, $h(t)$ la entrada, la salida y la respuesta impulso de un sistema respectivamente. Si el sistema se encuentra inicialmente en reposo, se dice que un sistema es BIBO estable, si para una entrada acotada, la salida también es acotada. El siguiente análisis matemático encuentra las condiciones que debe cumplir el sistema para que sea BIBO estable. La salida del sistema se relaciona con $u(t)$ y $h(t)$ a través de la integral de convolución de la siguiente manera:

$$y(t) = \int_0^t u(t - \tau)h(\tau) d\tau \quad (3.9)$$

La definición de estabilidad BIBO establece que la salida debe ser acotada; es decir que $|y(t)| \leq N$, por lo que:

$$|y(t)| = \left| \int_0^t u(t - \tau)h(\tau) d\tau \right| \leq \int_0^t |u(t - \tau)||h(\tau)| d\tau \quad (3.10)$$

Adicionalmente, si $|u(t)| \leq M$, entonces:

$$|y(t)| \leq M \int_0^t |h(\tau)| d\tau \quad (3.11)$$

y ya que $|y(t)| \leq N$, entonces:

$$M \int_0^t |h(\tau)| d\tau \leq N \quad (3.12)$$

$$\int_0^t |h(\tau)| d\tau \leq Q \quad (3.13)$$

La condición anterior indica que para que el sistema sea BIBO estable se debe cumplir que el área bajo la curva $|h(t)|$ debe ser finita. El análisis se concentra ahora en encontrar bajo qué condiciones la integral anterior

tendrá un área finita. Tal y como se demuestra en (Kuo y Golnaraghi, 2002), el área de la respuesta a impulso es infinita. Dicha conclusión viola el requisito de estabilidad BIBO de que el área deba ser finita, que lleva a concluir que para que exista estabilidad BIBO necesariamente los polos del sistema deben estar en el semiplano izquierdo.

Se dice que un sistema es inestable si no es estable en el sentido BIBO.

- **Propiedad 2:** Considerando que x es el desplazamiento de un sistema mecánico de un grado de libertad, conectado a un elemento o dispositivo que suministre una fuerza “restauradora” $\phi_s(x)$ al sistema. Este elemento o dispositivo contribuirá a disipar la energía mecánica del sistema, tal y como se observa en la práctica. Por lo tanto el modelo Bouc-Wen deberá reproducir esta disipación de energía, para representar adecuadamente el comportamiento físico de sistemas reales.

Una vez planteadas estas dos propiedades, se presenta, para ilustrar esta situación, el ejemplo de la Figura 3.2, donde aunque tiene estabilidad de tipo BIBO, no se disiparía la energía mecánica del sistema. Esto significa que, aunque este modelo puede aproximarse muy bien a una histéresis real, puede que no represente el comportamiento de la histéresis para cualquier tipo de entrada.

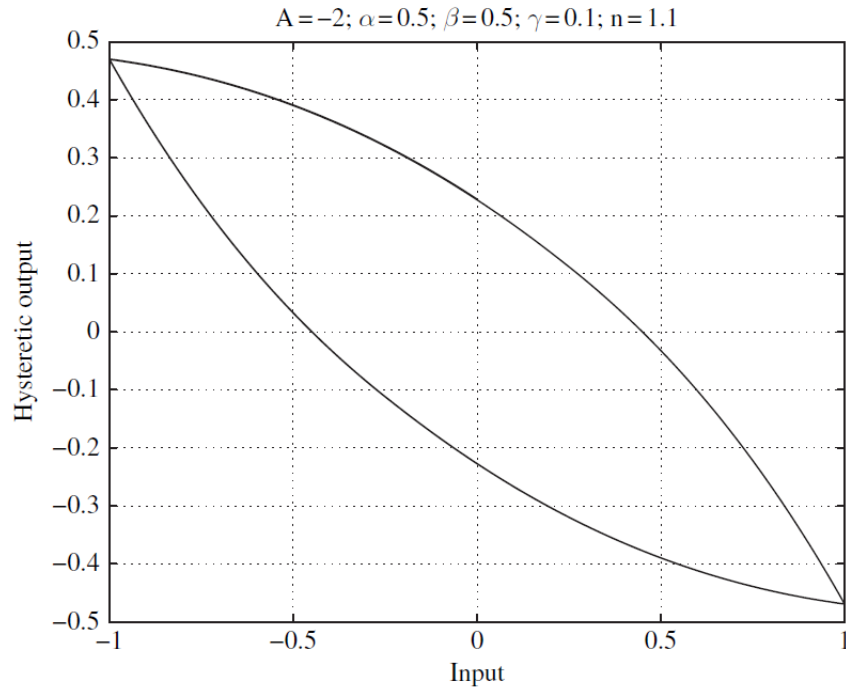


Figura 3.2: Ejemplo de modelo Bouc-Wen que no disipa energía

3.3. El modelo

Considerando un sistema físico, con una componente de histéresis que se puede representar por un mapa $x(t) \rightarrow \phi_s(x)(t)$, donde ϕ_s se refiere a la histéresis real. Entonces el modelo Bouc-Wen que representará a la histéresis tiene la siguiente forma:

$$\phi_{BW}(x)(t) = \alpha kx(t) + (1 - \alpha)Dkz(t) \quad (3.14)$$

$$\dot{z} = D^{-1}(A\dot{x} - \beta|\dot{x}||z|^{n-1}z - \gamma\dot{x}|z|^n) \quad (3.15)$$

Donde \dot{z} denota la derivada temporal, $n > 1$, $D > 0$, $k > 0$ y $0 < \alpha < 1$. También se considera $\beta + \gamma \neq 0$.

Obviando las demostraciones matemáticas correspondientes, se pueden acotar los modelos de Bouc-Wen con estabilidad de tipo BIBO en la Tabla 3.1, donde Ω representa el espacio de posibles valores que puede tomar el conjunto de variables del modelo.

Tabla 3.1: Clasificación de los modelos Bouc-Wen con estabilidad tipo BIBO

Caso	Ω	Cota superior de $ z(t) $	Clase
$A > 0, \beta + \gamma > 0, \beta - \gamma \geq 0$	\mathbb{R}	$\max(z(0) , z_0)$	I
$A > 0, \beta - \gamma < 0, \beta \geq 0$	$[-z_1, z_1]$	$\max(z(0) , z_0)$	II
$A < 0, \beta - \gamma > 0, \beta + \gamma \geq 0$	\mathbb{R}	$\max(z(0) , z_1)$	III
$A < 0, \beta + \gamma < 0, \beta \geq 0$	$[-z_0, z_0]$	$\max(z(0) , z_1)$	IV
$A = 0, \beta + \gamma > 0, \beta - \gamma \geq 0$	\mathbb{R}	$ z(0) $	V
El resto de casos	\emptyset		

De todas estas clases presentadas anteriormente, se demuestra en varias referencias tales como (Ikhouane y Rodellar, 2007) o (Erlicher y Point, 2004) entre otras, que la clase I es la única que además de ser estable de tipo BIBO, es compatible con el comportamiento de los sistemas reales. Es por ello por lo que de aquí en adelante será la considerada para fines de parametrización.

3.4. Tipo de señales de entrada

En esta sección se pretende definir un tipo de señal de entrada, para la cual la salida de histéresis Bouc-Wen tiende asintóticamente a una solución periódica. Además se dará la expresión matemática de esta solución.

Se considerarán las señales de entrada $x(t)$ continuas en el intervalo $[0, +\infty)$

y periódicas en el tiempo, como se observa en la Figura 3.3. Además se supondrá que las funciones tendrán la primera derivada continua en todo el intervalo, con una posible discontinuidad en el valor X_{max} , cambiando en ese punto el signo de la derivada.

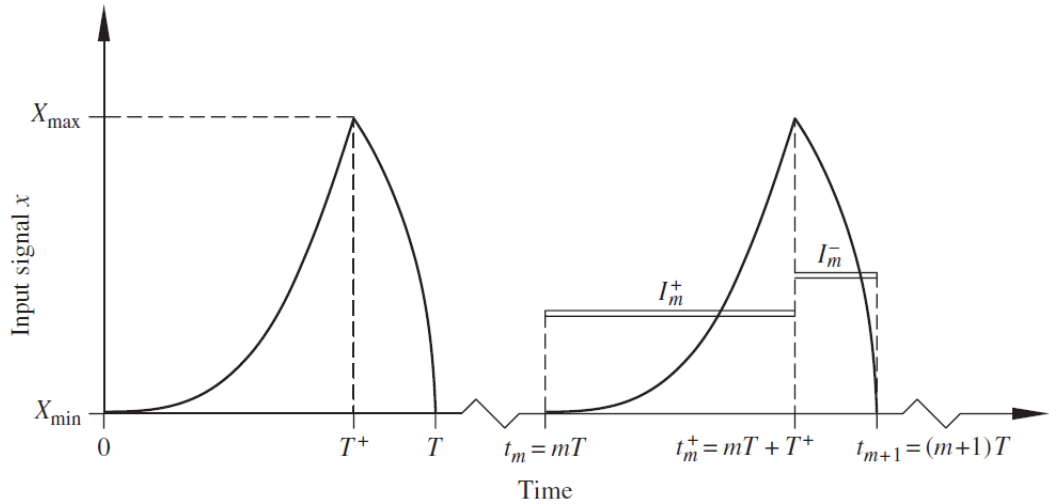


Figura 3.3: Forma general de las señales de entrada

Este tipo de entradas es denominado como *wave T-periodic* y se demuestra en (Ikhouane y Rodellar, 2007) que para este tipo de señales de entrada, el modelo Bouc-Wen converge asintóticamente a una solución periódica de período T, para el caso del oscilador armónico estudiado.

3.5. El modelo de Bouc-Wen normalizado

El comportamiento del modelo Bouc-Wen no se describe por un sólo conjunto de parámetros $\{\alpha, k, D, A, \beta, \gamma, n\}$ tal y como explica (Ikhouane y Rodellar, 2007). Un inconveniente de esta propiedad se ve reflejado en los procedimientos de identificación que utilizan datos de entrada-salida, no pueden determinar dichos parámetros.

Para hacer frente a este problema, los usuarios de este modelo a veces fijan algunos parámetros a valores arbitrarios. Por ejemplo en (Ni, Ko, y Wong, 1998) el coeficiente $(1 - \alpha)Dk$ de $z(t)$ de la ecuación (3.14) se fija a uno, y el parámetro D también es fijado a este mismo valor. Otros autores comparan la forma del ciclo límite, en vez de comparar los valores identificados con los reales, tal y como se puede observar en (Spencer, Dyke, Sain, y Carlson, 1997). Este fenómeno hace muy difícil comparar los resultados de diferentes técnicas de identificación comparando los parámetros que se obtienen. Es por este motivo por el cual es necesario elaborar un modelo equivalente que defina de forma unívoca el comportamiento de entrada-salida de este modelo, de modo que a su vez permita comparar diversos métodos de identificación. Para este propósito, se define el siguiente cambio de variable:

$$w(t) = \frac{z(t)}{z_0} \quad (3.16)$$

Con este cambio es posible reescribir el modelo formulado en las ecuaciones (3.14) y (3.15) a:

$$\phi_{BW}(x)(t) = k_x x(t) + k_w w(t) \quad (3.17)$$

$$\dot{w} = \rho(\dot{x} - \sigma|\dot{x}(t)||w(t)|^{n-1}w(t) + (\sigma - 1)\dot{x}(t)|w(t)|^n) \quad (3.18)$$

Donde:

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{A}{Dz_0} > 0, \quad \sigma = \frac{\beta}{\beta + \gamma} \geq 0 \\ k_x &= \alpha k > 0, \quad k_w = (1 - \alpha)Dkz_0 > 0 \end{aligned} \quad (3.19)$$

Una vez expresado este nuevo modelo con tan sólo cinco variables, y completamente equivalente al anterior, será mucho más sencilla la tarea de identificación de los cinco parámetros que definen completamente este nuevo modelo Bouc-Wen, teniendo en cuenta que $w(0) = z(0)/z_0$.

Para este nuevo caso, el modelo de Bouc-Wen estable de Clase I queda reflejado en la Tabla 3.2, donde además se muestran las características que deben cumplir sus variables para que el sistema presente una estabilidad BIBO.

Tabla 3.2: Clasificación de los modelos Bouc-Wen normalizados con estabilidad tipo BIBO

Caso	Ω	Cota superior de $ w(t) $	Clase
$\sigma \geq \frac{1}{2}$	\mathbb{R}	$\max(w(0) , 1)$	I

3.6. Identificación del modelo Bouc-Wen

Debido a la complejidad del modelo es necesario definir una estrategia de identificación que, basándose en datos experimentales sea capaz de identificar los cinco parámetros del modelo normalizado. Para ello, de entre todas las técnicas ya comentadas en el Estado de Arte se ha elegido la de Evolución Diferencial.

Las cinco variables a identificar hacen que las soluciones reales sean muy complejas e incluso en algunos casos imposibles de conseguir, ya que muchas se basan en métodos experimentales que en la práctica son difíciles de recrear. Es por ello por lo que métodos *aproximados* de optimización son los adecuados a aplicar, para simplificar y hacer factible la resolución del problema planteado.

3.6.1. Optimización

De forma genérica, la optimización intenta resolver una serie de problemas en los cuales se intenta elegir el mejor candidato de entre un conjunto de elementos del espacio de búsqueda. Lo que se intenta resolver, expresado de la forma más simple es:

$$\begin{aligned} \min f(x) \\ x \in \Omega \subseteq \mathbb{R}^n \end{aligned} \tag{3.20}$$

Donde x puede ser un vector de n variables y representa las variables de decisión, $f(x)$ es lo que se denomina función objetivo y representa la calidad de las soluciones. Por último, Ω es el conjunto de restricciones que se le aplican a las soluciones posibles del problema.

Para el caso estudiado la función objetivo a optimizar es el error en términos de semejanza entre los datos observados y los obtenidos para unos parámetros determinados. El espacio de búsqueda se estudiará más adelante, ya que en principio es difícil obtener unas cotas o condiciones de contorno, las cuales dependen en gran medida de cada problema en particular.

De entre todos los métodos posibles, el que se aplicará de aquí en adelante es el de **Evolución Diferencial** (ED), el cual pertenece a la categoría de computación evolutiva, y que principalmente se aplica a problemas complejos y se caracteriza por encontrar soluciones de *calidad* en tiempos relativamente pequeños. Además este tipo de métodos se conocen como metaheurísticos, ya que no necesitan ningún conocimiento del problema en sí a resolver y son capaces de buscar en espacios de soluciones muy grandes. Por contra este tipo de métodos no garantizan una solución óptima.

La principal ventaja por la que se eligió este método es que no es necesario utilizar funciones continuas, derivables y sin ruido, además no necesita que la función a optimizar sea derivable, como es el caso de los métodos clásicos basados en el gradiente y que no cumple el problema planteado.

Capítulo 4

Evolución Diferencial

4.1. Optimización

La optimización es probablemente uno de los desafíos más importante con el que científicos y economistas se han enfrentado en las últimas décadas. ¿Cuál es la cantidad óptima de combustible en un coche de Fórmula 1? ¿Cuál es la localización exacta del robot Spirit tras meses moviéndose por la superficie marciana? Claramente, es necesario a día de hoy disponer de herramientas que permitan a los investigadores responder a estas y otras muchas preguntas de manera precisa, concisa y robusta.

En principio, la optimización y minimización no debería parecer un problema complejo de analizar, por ejemplo, si un ganadero lleva 50 años criando gallinas, sabe perfectamente la cantidad de pienso que debe suministrar a sus animales para alimentarlos al menor precio de coste y con la mayor producción. Nadie le ha dicho nunca cuantos kg debe darles y sin embargo considera *perfecto* el volumen aunque cada año posea un número variable de ellas. Sin embargo, no todos los problemas son posibles de resolver a partir de la experiencia. Existen

casos como por ejemplo la selección de los parámetros que maximizan los niveles de producción de una central lechera (presión de las válvulas, temperatura de los componentes, velocidad de la mezcla) que son complejos de determinar *a priori*. Es decir, no es posible o conveniente *probar y equivocarse* hasta dar con la solución adecuada por tratarse de problemas altamente complejos y caros. Es por ello que se le da la oportunidad a las matemáticas para guiarse en busca de la mejor solución.

Se puede definir la optimización como el proceso de encontrar la mejor solución posible a un problema, bajo ciertas restricciones. Normalmente, existen D parámetros en una función $f(\mathbf{x}) = f(x_0, x_1, x_2, \dots, x_{D-1})$ que modifican su comportamiento al intentar minimizarla. Esto significa que de alguna manera, para minimizar f será necesario comprender e interpretar el papel de cada variable dentro del sistema global. En el caso de la Figura 4.1 se plantea como objetivo encontrar el mínimo de la función $f(x, y) = e^{-(x^2+y^2)}$.

Dado que se trata de una función *monomodal*, pues tan solo existe una solución óptima, resulta sencillo de encontrar su solución por métodos tradicionales como puede ser el método del gradiente, la secante o Gauss-Newton, fuerza bruta, Hooke and Jeeves en un entorno local. Si la optimización comienza cerca de un *cuenco* o mínimo, estos métodos darán resultados muy buenos. Además, es posible implementar un *paso adaptativo* que se reduzca a medida que la función se acerque al mínimo.

Normalmente los problemas surgen en los sistemas no lineales de los cuales se desconocen su mecanismo interno. En estos casos, es muy común encontrarse con funciones que admiten más de una solución (o mínimo) local, creando un nuevo problema: la convergencia hacia otras soluciones peores (mínimos locales) de los algoritmos. Para solucionar este problema, será necesario implementar funciones de optimización que permitan realizar búsquedas en un entorno

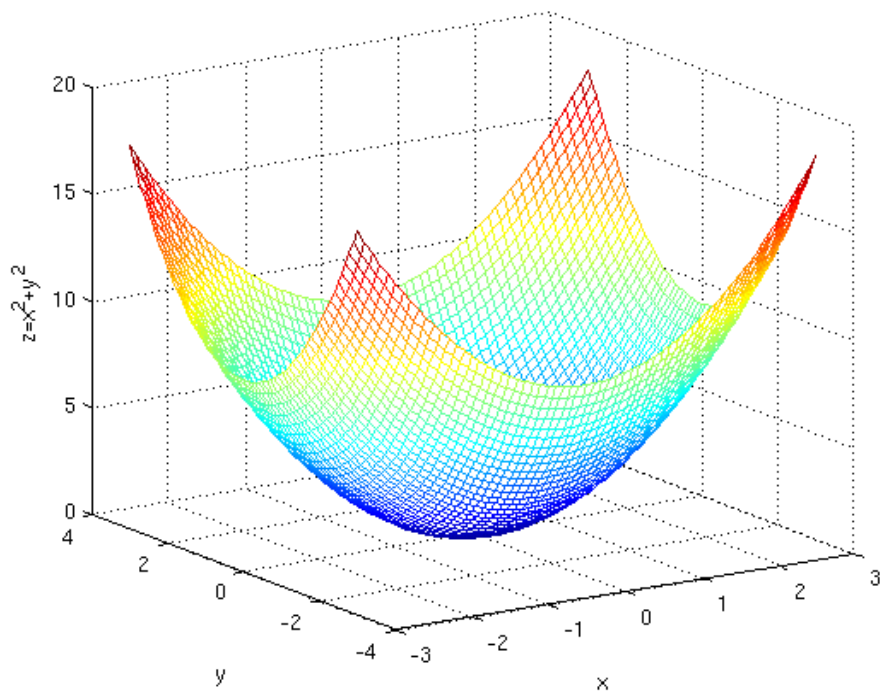


Figura 4.1: Función monomodal. Búsqueda del punto óptimo

global, contrastando así los costes en toda las superficie y seleccionando el valor más representativo de la misma. Este tipo de algoritmos son menos precisos, pero ofrecen la ventaja de trabajar en funciones con numerosos mínimos locales como en el caso de la Figura 4.2.

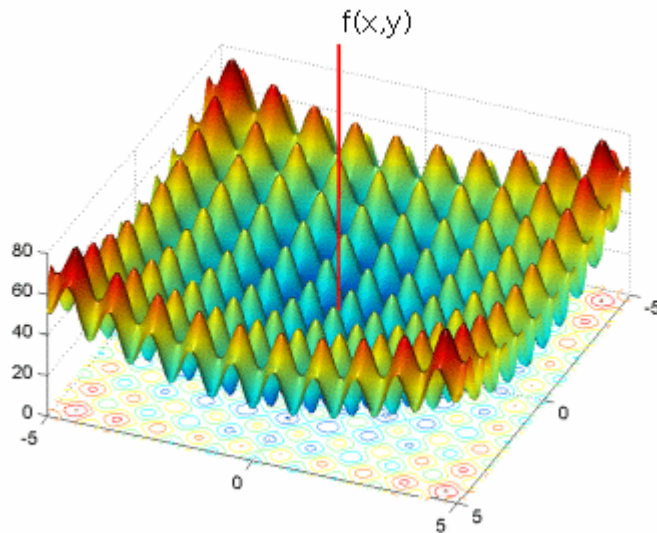


Figura 4.2: Función multimodal a escala local. Búsqueda del mínimo global.

4.2. Evolución Diferencial

La evolución diferencial es principalmente un método de optimización que surgió en 1995 a partir de un algoritmo genético desarrollado por Kenneth Price. Se trata de un optimizador basado en poblaciones que ataca el problema inicial mediante la evaluación la función objetivo en múltiples puntos iniciales seleccionados aleatoriamente y evoluciona sobre las poblaciones anteriores de manera aleatoria.

4.2.1. Motivación

Tal y como plantea (Price, Storn, y Lampinen, 2005), existen muchas formas de resolver el problema de optimización en funciones multimodales. Como es lógico, el principal problema que surge al abordar este tipo de funciones es el punto de inicio o arranque. Antes de desarrollar métodos basados en algoritmos genéticos o evolutivos, se plantearon soluciones más sencillas pero menos robustas y precisas:

1. *Recocido simulado (Simulated Annealing)* – Realiza una búsqueda heurística en el que en cada iteración, se evalúan los puntos cercanos y probabilísticamente se decide si se pasa a un nuevo estado s' o se mantiene en el mismo estado s buscando los puntos de menor energía (Kirkpatrick, Gelatt, y Vecchi, 1983). Este procedimiento se realizará hasta que la energía sea menor a un valor establecido anteriormente. Este método posee como característica importante que la probabilidad de transición siempre es mayor que cero, y por lo tanto, elimina la posibilidad de estancarse en mínimos locales. Además, a medida que se va acercando a un mínimo global, la probabilidad disminuye asintóticamente.
2. *Múltiples puntos. Métodos basados en la derivada*– En los que se proponen varios puntos iniciales y se estima la energía partiendo de todos ellos. Con ello se consigue una optimización global. Normalmente estos métodos aplican la derivada, aunque no es estrictamente necesario, pudiéndose aplicar técnicas de búsqueda directa en casos donde la función no es derivable (Sekhon y Mebane, 1998).
3. *Múltiples puntos. Métodos de Clustering* – Otra posibilidad que se ha planteado es lanzar diferentes puntos y establecer unas agrupaciones o clusters de manera que se agrupan los puntos en función de su base de atracción

(Rinnooy Kan y Timmer, 1987). De esta manera, suponiendo que los mínimos se comportan como hiper-elipsoides, es posible tras un clustering estimar el centro de los mismos y decidir cual es el mínimo global. El problema que surge al utilizar este método es el gran consumo de memoria que se produce pues requiere almacenar todos los valores y posiciones que se van encontrando durante el proceso.

4.2.2. Funcionamiento

El método de DE (*Evolución Diferencial*) es un optimizador basado en población que resuelve el problema de la selección del punto inicial mediante el muestreo de la función objetivo en múltiples puntos seleccionados aleatoriamente. En el **planteamiento inicial** se establecen el dominio de los parámetros de entrada x_m^{min} , x_m^{max} desde los cuales se generarán N_p vectores sobre esta población inicial tal como se muestra en la Figura 4.3. Cada vector se indexa de manera que adquiera un valor entre 0 y $N_p - 1$

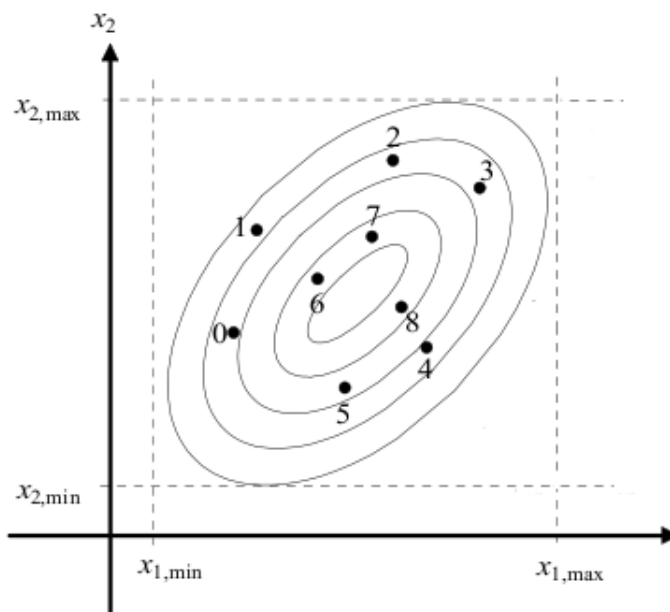


Figura 4.3: *Differential Evolution. Planteamiento inicial del problema.*

Como en otros los métodos basados en población, DE **genera nuevos puntos** (perturbaciones) basado en puntos anteriores. Estas desviaciones no son reflexiones tal y como plantean otras soluciones como *CRS* o *Nelder–Mead* (Nelder y Mead, 1965), ni tampoco se basan en selección de puntos en funciones de probabilidad predefinidas, como en los algoritmos de Montecarlo. La gran diferencia estriba en que en este caso los nuevos valores se generan valiéndose de tres individuos seleccionados al azar. Dos de los elementos x_{r1}, x_{r2} se restan multiplicados por un peso (tasa e mutación) F y se suman al tercero x_{r3} produciendo el vector de prueba

$$\mathbf{u}_0 = x_{r3} + F \cdot (x_{r1} - x_{r2})$$

tal y como se muestra en la Figura 4.4

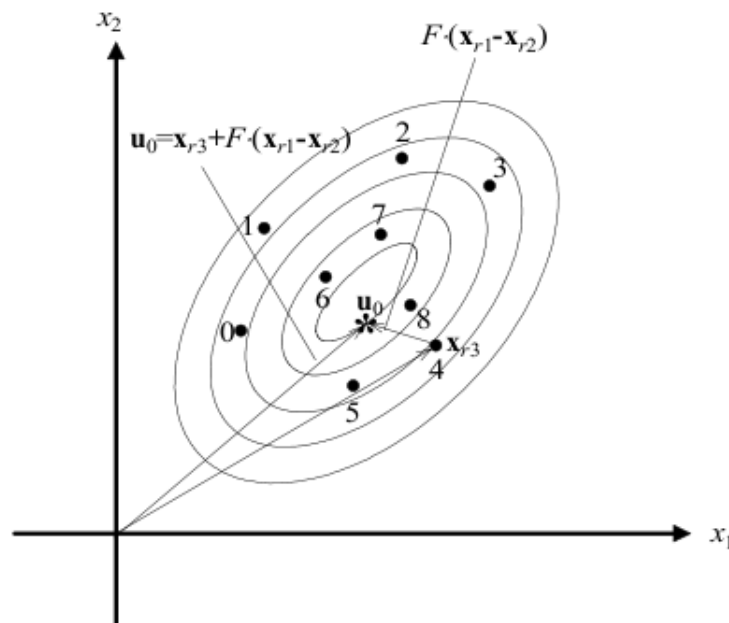


Figura 4.4: *Differential Evolution*. Selección de la población con valores aleatorios y generación del vector de prueba \mathbf{u}_0

Posteriormente, en la etapa de selección, el vector de prueba u_0 compite contra todos los vectores de población del mismo índice, que en el caso de la Figura 4.5 es el número 0. En dicha representación se muestra el paso de **selección y almacenamiento** en el que se marca el vector con menor coste como miembro de la siguiente generación. Este proceso se realizará repetidamente hasta que una población de N_p vectores han competido contra un vector de prueba generado aleatoriamente. Una vez que el último vector de prueba ha sido probado, los vectores supervivientes de las N_p competiciones entre pares pasan a ser los padres de la siguiente generación.

Cuando alguna de las condiciones de salida se cumplan, el algoritmo termina. Normalmente las restricciones son de tiempo, número de iteraciones/generaciones o precisión alcanzada. Dependiendo del uso que se le quiera dar al algoritmo, convendrá usar una u otra condición de salida. En el caso de este proyecto, dado que la búsqueda del óptimo se buscará una sola vez, la velocidad de convergencia no es crucial, siendo la máxima prioridad la precisión (dado que una vez se encuentre la red óptima se establecerán los valores óptimos como pesos y bias de la misma y no se volverá a optimizar).

4.2.2.1. Mutación

Un proceso importante en el algoritmo de ED es la mutación. Ésta consiste en agregar un incremento generado aleatoriamente a una o más variables de un vector solución candidato. El objetivo de la mutación es generar nuevos candidatos tal y como se observa en la Figura 4.4. Complementariamente a este proceso se encuentra también el de cruce, que consiste en intercambiar información de los vectores solución a sus descendientes.

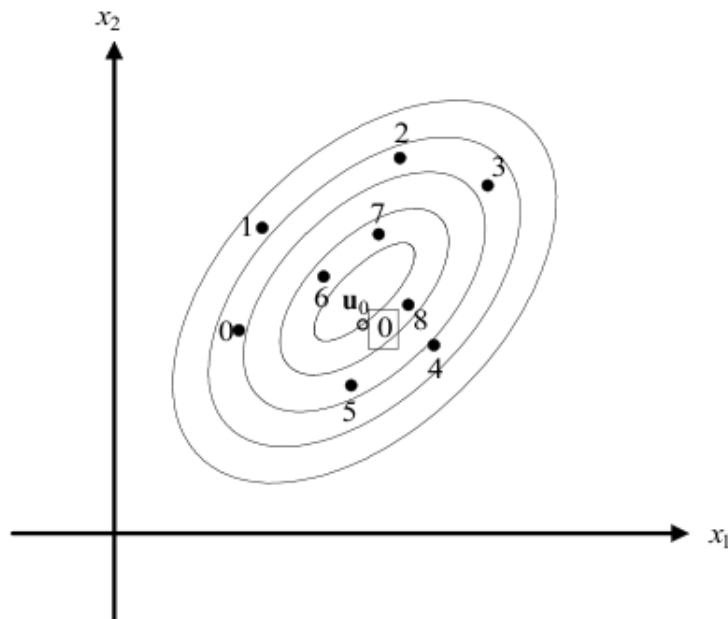


Figura 4.5: *Differential Evolution.* Puesto que posee el menor coste, u_0 reemplaza el vector con índice 0 en la siguiente generación.

4.2.3. Ventajas y desventajas del algoritmo de ED

Las principales ventajas de la ED son:

- Capaz de trabajar con funciones objetivo no lineales, no diferenciables y multimodales.
- Algoritmo fácilmente paralelizable, especialmente útil cuando la evaluación de la función objetivo es computacionalmente costosa.
- No es necesario predefinir distribuciones de probabilidad como en el caso de las estrategias evolutivas.
- Suele converger a un valor óptimo (posiblemente global), de una manera consistente a lo largo de una secuencia de ejecuciones independientes.

Por otro lado, la ED presenta una serie de desventajas propias de este tipo de estrategias como son la posible convergencia inestable en algunos casos, o la

probabilidad de caer en puntos óptimos a nivel local.

4.2.4. Pseudo-Código del optimizador

El siguiente extracto contiene el pseudo-código para DE mostrando la sencillez del mismo y la base del mismo.

```
...
while (criterio de convergencia no es alcanzado)
{
    //xi define un vector con el vector población actual
    //yi define un vector con el nuevo vector de población
    for (i=0; i<NP; i++)
    {
        //Selección de un índice aleatorio desde 1,2,...,Np
        r1 = rand(NP);
        r2 = rand(NP);
        r3 = rand(NP);

        ui = xr3 + F*(xr1 - xr2);
        if (f(ui) <= f(xi))
        {
            yi = ui;
        }
        else
        {
            yi = xi;
        }
    }
}
} //end while
...
```

Capítulo 5

Parametrización del modelo de Bouc-Wen normalizado

5.1. Método propuesto

En este capítulo se explica la aplicación del método Evolución-Diferencial (ED) al cálculo de los parámetros del sistema Bouc-Wen normalizado, para ello se han utilizado varias funciones de error en las pruebas que a continuación se presentarán.

Los parámetros a ajustar son los del modelo Bouc-Wen normalizado que se encuentra en las expresiones (3.16)-(3.18), el cual requiere de cinco parámetros $\rho, \sigma, k_x, k_y, n$, con una serie de restricciones del espacio de búsqueda así como unas condiciones iniciales determinadas:

$$\rho > 0 \quad \sigma \geq \frac{1}{2} \quad k_x > 0 \quad k_w > 0 \quad n > 1 \quad (5.1)$$

Además la condición inicial debe cumplir $|w(0)| \leq 1$, entonces según se demuestra en (Ikhouane y Rodellar, 2007) $|w(t)| \leq 1$ para todo $t \geq 0$.

5.1.1. Estrategia de optimización

Una vez definidos los parámetros a optimizar, lo que se pretende es que, el algoritmo de DE, genere la salida teórica para cada individuo de la población con los parámetros de esa iteración. El proceso de cálculo de la salida de histéresis es muy complejo ya que requiere integrar la función $\omega(t)$.

Para este proceso, al no existir una primitiva directa, se procede a la utilización de métodos numéricos en el cálculo de estas integrales. En concreto lo que se implementó fue la creación de unas *lookup table* o tablas de consulta (LUT) cargadas en memoria, de modo que la evaluación de una integral quede reducida a la búsqueda en una simple matriz.

Una vez calculada la salida de histéresis teórica, cada individuo de la población computará el coste. La función que se optimizará será el *error* o *diferencia* con los datos reales observados. De este modo se irán calculando los parámetros de la función que más se asemeje a la observada en la experimentación.

5.1.2. Funciones de coste

Las funciones a utilizar para el caso de estudio son de un único objetivo a optimizar. Puesto que la *calidad* de las soluciones variará dependiendo de esta elección, es el punto más importante a tener en cuenta en problemas de optimización.

Los dos tipos de función de coste que se plantean son las más utilizadas para este tipo de problemas de optimización, presentando cada una de ellas una serie de ventajas e inconvenientes. Además se pueden combinar entre sí (Qing, 2009) para diseñar otras nuevas funciones.

- **Suma de las diferencias cuadráticas:**

El coste en este caso viene dado por las diferencias cuadráticas entre todos los puntos observados experimentalmente y los obtenidos en la iteración correspondiente del algoritmo DE. Esta función tiene la peculiaridad de penalizar mucho a los puntos lejanos a la solución, de modo que para ciertos problemas de optimización puede ser algo perjudicial ya que se puede limitar el espacio de búsqueda.

$$coste = \sum_{i=0}^N (f_{obs}[i] - f_{gen}[i])^2 \quad (5.2)$$

Donde f_{obs} , es la salida de histéresis observada, mientras que f_{gen} es la obtenida en la generación actual del algoritmo evolutivo, y N es el número de elementos de las muestras.

- **Suma de las diferencias absolutas:**

A diferencia del caso anterior, el coste en este caso viene determinado por la diferencia en valor absoluto entre las funciones de histéresis observadas y calculadas. La penalización del coste para puntos cercanos a los candidatos a solución no es tan severa como en el caso anterior.

Computacionalmente es menos costoso hacer un valor absoluto a un producto, y en determinados casos puede llegar a ser otro de los criterios de elección de este algoritmo.

$$coste = \sum_{i=0}^N |f_{obs}[i] - f_{gen}[i]| \quad (5.3)$$

Finalmente, y tras una serie de pruebas se eligió la función de coste basada en las **diferencias cuadráticas**. Esta decisión surge de un compromiso entre la calidad de los resultados y el tiempo de cómputo.

5.1.3. Resolución de integrales

Debido a la complejidad computacional para la generación analítica de un ciclo de Bouc-Wen se plantean diversos problemas a solventar para su implementación en el algoritmo de DE. La integral a resolver es la de la ecuación explicada anteriormente.

$$\dot{w} = \rho(\dot{x} - \sigma|\dot{x}(t)||w(t)|^{n-1}w(t) + (\sigma - 1)\dot{x}(t)|w(t)|^n) \quad (5.4)$$

- **Integrales**→**LUT**: La no existencia de primitivas directas hace que haya que generar tablas de búsqueda en cada nueva evaluación, ya que a su vez estas integrales dependen de los parámetros del ciclo BW (normalizado). Esto significa que antes de computar el ciclo de Bouc-Wen, hay que calcular una serie de integrales. Éstas son calculadas por una cuadratura de Simpson adaptativa y se almacenan en memoria, como se explicará en detalle más adelante.
- **Interpolación**: Al estar trabajando con LUT para la evaluación de integrales, habrá que interpolar cada vez que se consulten, en este caso se utilizan interpolaciones lineales.
- **Precisión**: Al tener que definir unas LUT de búsqueda, queda a elección del usuario la precisión de generación de las mismas, así como de la salida del ciclo generado de BW. Para altas precisiones de cálculo de LUT el algoritmo correrá de forma muy lenta, y es por lo que se propone la modificación de dichos parámetros para llegar a una situación de compromiso calidad solución ↔ tiempo de cómputo.

Por este motivo y tras unos estudios previos se han establecido los siguientes parámetros a configurar en el *script* generador del ciclo de manera analítica. Principalmente se tuvo en cuenta la velocidad de ejecución del algoritmo sin perder calidad en los resultados. Bajar de los valores que se muestran a continuación no mejora la calidad pero si empeora notablemente el tiempo de ejecución:

- Precisión LUT = 0.01
- Precisión ciclo generado = 0.001

Como resultados de este proceso de optimización se espera llegar a una solución similar a la observada en la experimentación, y es por ello por lo que establecen a continuación una serie de pruebas para comprobar la *calidad* de la solución obtenida.

Para las pruebas que se presentan a continuación se han utilizado los siguientes parámetros fijos del algoritmo de DE.

- **F-VTR = 0.001** El valor a alcanzar de coste, (el algoritmo se parará cuando la función de coste obtenga un valor menor que este parámetro).
- **I-itermax = 100** Valor máximo de iteraciones (generaciones).
- **F-weight = 0.85** El tamaño del paso del DE, su valor pertenece al siguiente intervalo $[0, 2]$.
- **Strategy = 3** Se utilizará en todas las pruebas presentadas la estrategia DE/best/1 (Price y cols., 2005).

Antes de presentar los resultados es importante destacar que el ciclo de histéresis a parametrizar, se generó previamente mediante los algoritmos analíticos, a los cuales se le introdujo un ruido gaussiano.

El ciclo generado para este capítulo es: $\rho = 1,5 || \sigma = 2 || k_x = 3 || k_y = 2 || n = 1,5$

5.2. Resultados

En vista de los resultados, se pueden sacar conclusiones acerca del comportamiento del algoritmo en función de la variable *crossover probability*.

En la Figura 5.1 se observa como a partir de las 15 generaciones apenas se reduce el error. Además en las generaciones previas se puede apreciar como el error se va reduciendo a mucha velocidad, sin estar apenas constante en 5 ciclos antes de llegar al ciclo 15, en donde prácticamente se podría dar por concluida la parametrización.

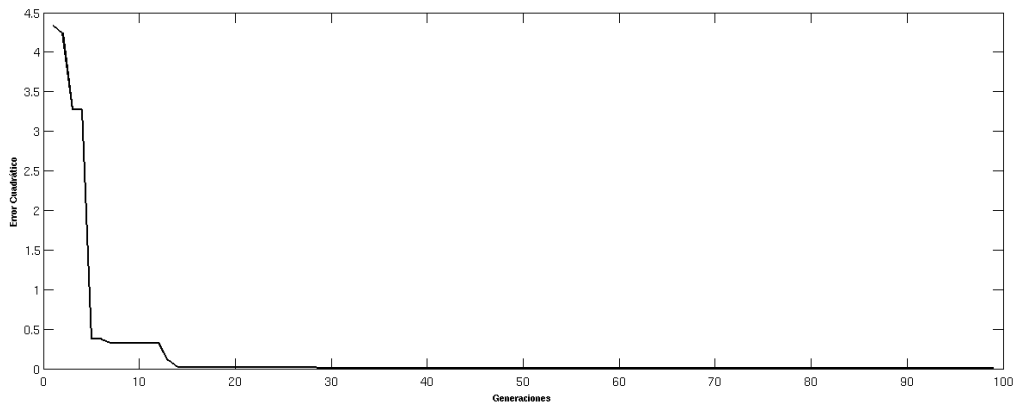


Figura 5.1: Error Cuadrático vs Generaciones para un *crossover* = 0.4

En la Figura 5.2 el error para un *crossover* = 0.6 deja de decrecer a partir de la tercera generación. Análogamente en la Figura 5.3 se produce el experimento con las mismas condiciones, con la diferencia de que tiene un *crossover* = 0.8. En dicho caso se observa como el error disminuye de forma más escalonada, siendo la variación de dicho error prácticamente nula a partir de la generación 25.

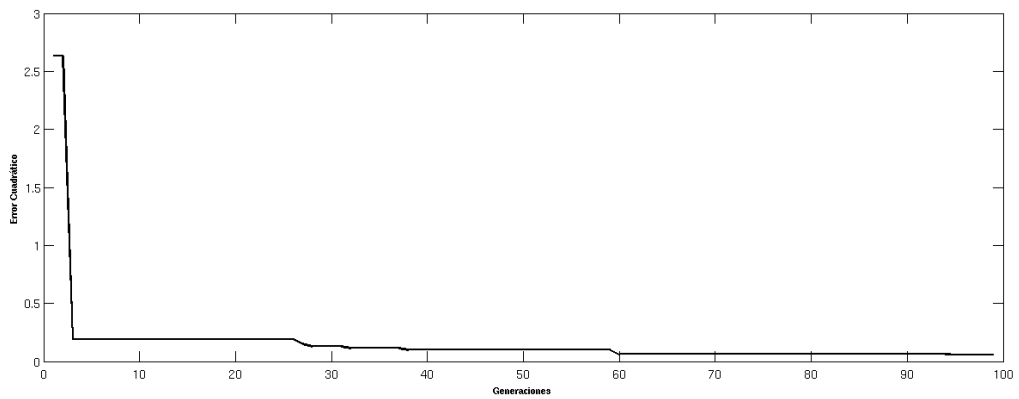


Figura 5.2: *Error Cuadrático vs Generaciones para un crossover = 0.6*

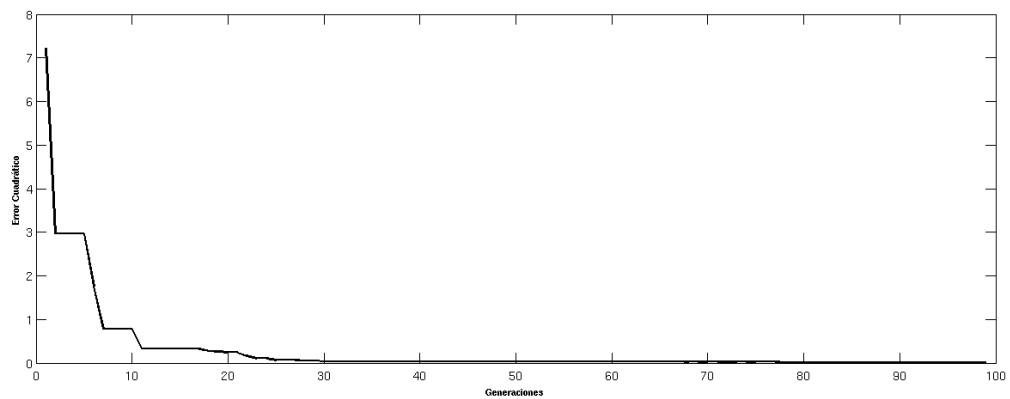


Figura 5.3: *Error Cuadrático vs Generaciones para un crossover = 0.8*

En la Figura 5.4 se incrementa el *crossover* hasta 0.9, y se observa una primera disminución brusca a partir de la iteración 4 y una segunda disminución más sesgada a partir de la iteración 15. Finalmente la Figura 5.5 produce un resultado mejor que las anteriores reduciendo prácticamente el error a partir de la séptima iteración.

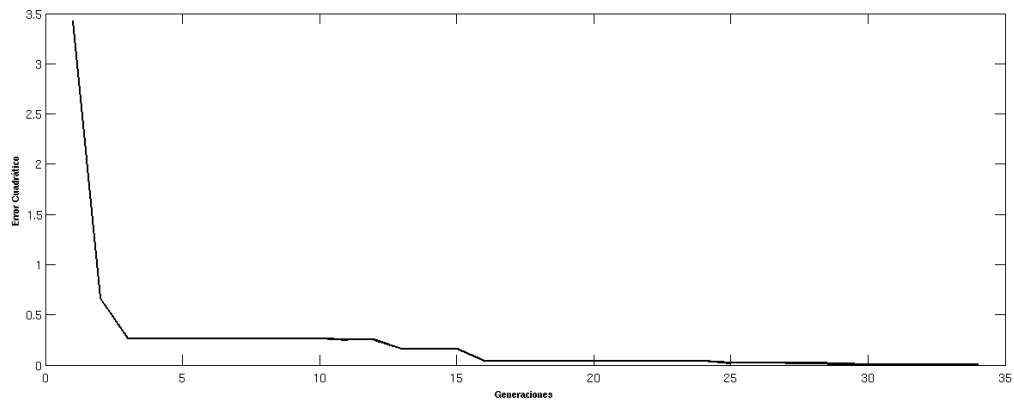


Figura 5.4: Error Cuadrático vs Generaciones para un *crossover* = 0.9

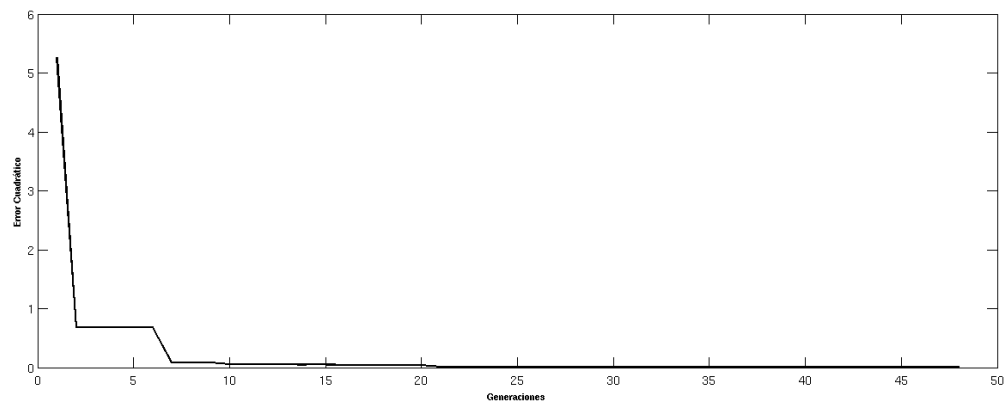


Figura 5.5: Error Cuadrático vs Generaciones para un *crossover* = 1

Una vez concluido este análisis, se puede remarcar como resultado que el parámetro *crossover* no afecta sustancialmente los resultados. Aún así se establecerá 0.9 como el valor a utilizar en lo sucesivo.

A continuación se procede a variar los miembros de la población en cada iteración.

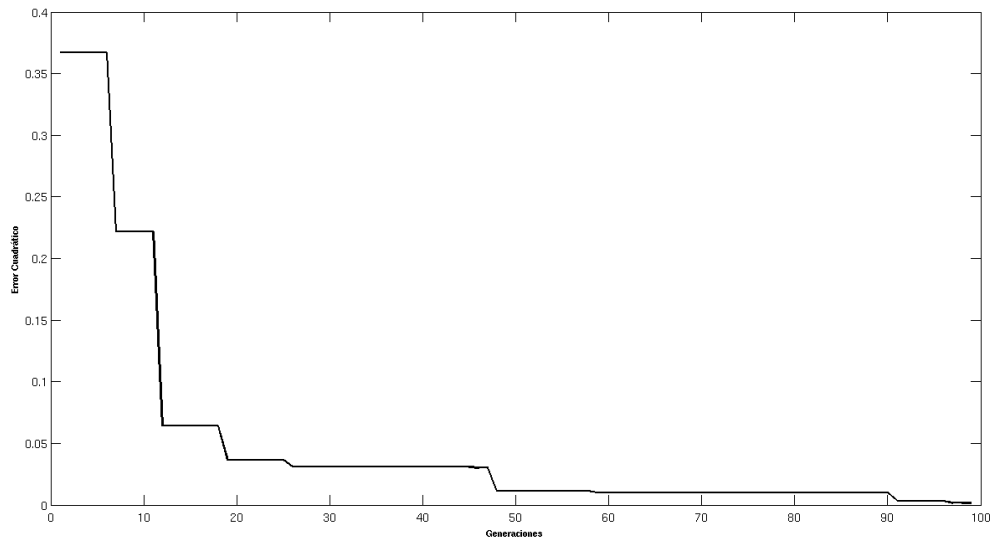


Figura 5.6: Error Cuadrático vs Generaciones para una población = 60

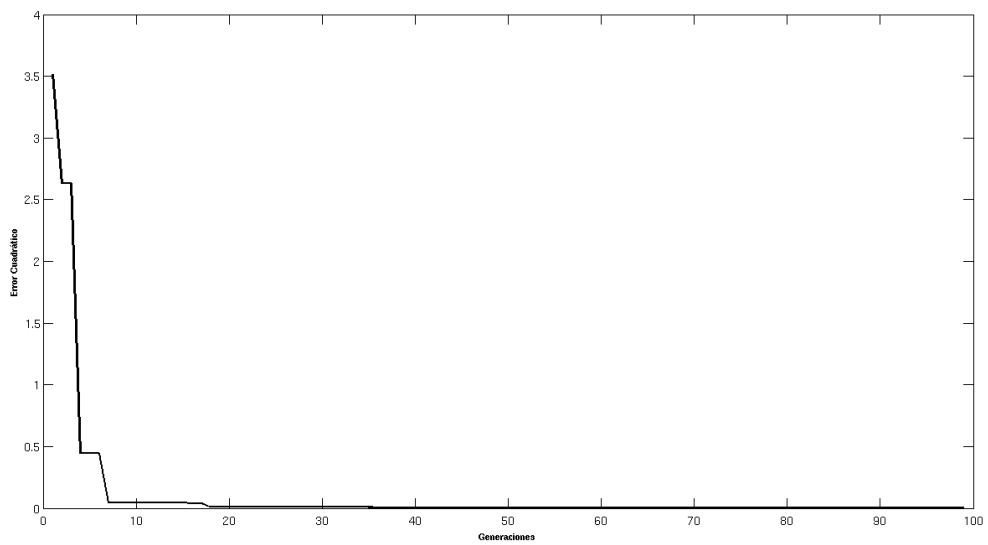


Figura 5.7: Error Cuadrático vs Generaciones para una población = 80

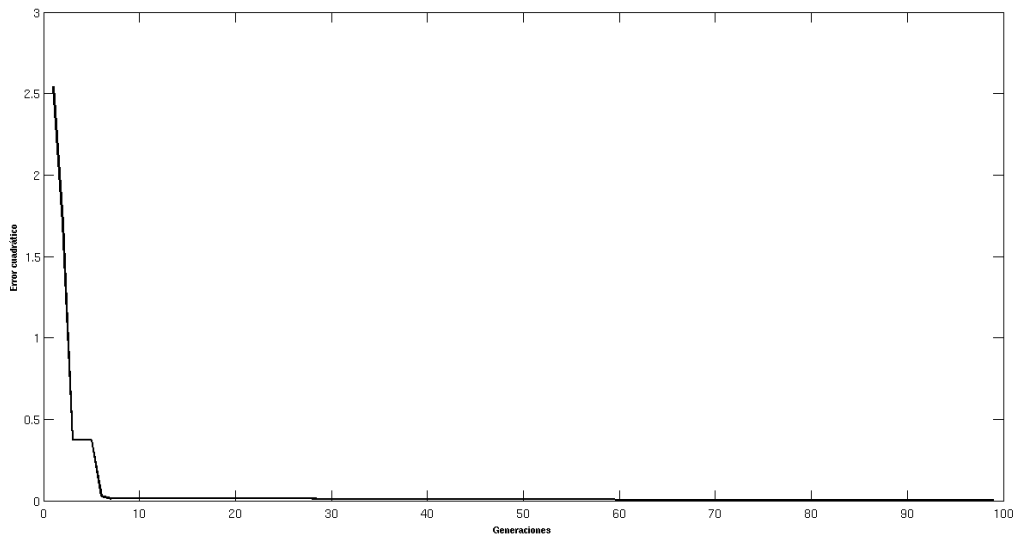


Figura 5.8: Error Cuadrático vs Generaciones para una población = 100

En las figuras anteriores se ha experimentado con diferentes valores de la población con el objetivo de analizar el comportamiento del error cuadrático. Tal y como se observa en la Figura 5.6 para una población = 60, el error disminuye de manera muy escalonada, siendo en la iteración 50 a partir de la cual el error es prácticamente nulo. En la Figura 5.7 este resultado varía mucho más bruscamente, requiriendo únicamente 7 iteraciones para reducir el error. Finalmente, en la Figura 5.8 se observa que para una población = 100, los resultados no varían sustancialmente. Por lo tanto, teniendo en cuenta los anteriores resultados, se establecerá como parámetro óptimo de población un valor igual a 80.

5.3. Espacio de soluciones

El método anteriormente propuesto de evolución diferencial, puede encontrar diversos mínimos locales de la función de error propuesta. Por este motivo se propone un método de comprobación del espacio de soluciones. Éste consiste

en calcular la distancia euclídea entre cada solución y el origen. según se observa la siguiente expresión (5.5):

$$d = \sqrt{\rho^2 + \sigma^2 + k_x^2 + k_\omega^2 + n^2} \quad (5.5)$$

Tabla 5.1: *Distancia de una solución al origen.*

error	distancia
$36 \cdot 10^{-4}$	5.11
$36 \cdot 10^{-4}$	5.27
$54 \cdot 10^{-4}$	4.96
$80 \cdot 10^{-4}$	5.83
$244 \cdot 10^{-4}$	5.13
$86 \cdot 10^{-4}$	4.98
$152 \cdot 10^{-4}$	4.65
$82 \cdot 10^{-4}$	5.23
$50 \cdot 10^{-4}$	5.17

En la tabla anterior se muestra la distancia de todas las soluciones y el origen en un espacio de cinco dimensiones. Además se muestra el error asociado para cada caso con el que concluyen las iteraciones de la Evolución Diferencial. Se puede observar como la variación de la distancia varía relativamente poco, mientras que el error en algunos casos se llega prácticamente a doblar. Estos resultados indican que mientras que el espacio de soluciones es *compacto* en forma, el error presenta un comportamiento algo más variable. Lo que puede significar la presencia de mínimos locales.

5.4. Sensibilidad de las variables

Es importante además de la evaluación del espacio de soluciones, la realización de un estudio acerca del nivel de sensibilidad de cada una de las variables en el ajuste del modelo propuesto. Para ello se propone forzar al algoritmo de DE para que encuentre cada una de las variables en un intervalo erróneo y comprobar de esta manera la *calidad* del ajuste final.

Para la realización de estos estudios se ha utilizado un *crossover* = 0,4 y el resto de parámetros serán los establecidos anteriormente.

5.4.1. Sensibilidad a la variable ρ

Tabla 5.2: Distancias y valor ρ del ajuste, para diversas soluciones con el parámetro ρ forzado a un intervalo

error	distancia	lím. inferior ρ	lím. superior ρ	valor ρ
$197 \cdot 10^{-4}$	4.38	0	8	1.85
$44 \cdot 10^{-4}$	4.96	2	8	2.10
$281 \cdot 10^{-4}$	5.14	3	8	3.02
$885 \cdot 10^{-4}$	6.33	4	8	4.00
$12256 \cdot 10^{-4}$	9.61	5	8	5.00

5.4.2. Sensibilidad a la variable σ **Tabla 5.3:** Distancias y valor σ del ajuste, para diversas soluciones con el parámetro σ forzado a un intervalo

error	distancia	lím. inferior σ	lím. superior σ	valor σ
$76 \cdot 10^{-4}$	4.28	0	8	1.47
$50 \cdot 10^{-4}$	5.22	2	8	2.16
$79 \cdot 10^{-4}$	5.74	3	8	3.06
$144 \cdot 10^{-4}$	6.49	4	8	4.03
$426 \cdot 10^{-4}$	7.00	5	8	5.27

5.4.3. Sensibilidad a la variable k_x **Tabla 5.4:** Distancias y valor k_x del ajuste, para diversas soluciones con el parámetro k_x forzado a un intervalo

error	distancia	lím. inferior k_x	lím. superior k_x	valor k_x
$22 \cdot 10^{-4}$	4.79	0	8	3.57
$10 \cdot 10^{-4}$	4.60	2	8	2.03
$14 \cdot 10^{-4}$	4.61	3	8	3.05
$27 \cdot 10^{-4}$	5.02	4	8	4.05
$256 \cdot 10^{-4}$	7.26	5	8	5.00

5.4.4. Sensibilidad a la variable k_y

Tabla 5.5: Distancias y valor k_y del ajuste, para diversas soluciones con el parámetro k_y forzado a un intervalo

error	distancia	lím. inferior k_y	lím. superior k_y	valor k_y
$39 \cdot 10^{-4}$	5.11	0	8	1.12
$37 \cdot 10^{-4}$	5.23	2	8	2.33
$82 \cdot 10^{-4}$	5.14	3	8	3.94
$10 \cdot 10^{-4}$	5.54	4	8	4.55
$34 \cdot 10^{-4}$	5.63	5	8	5.00

5.4.5. Sensibilidad a la variable n

Tabla 5.6: Distancias y valor n del ajuste, para diversas soluciones con el parámetro n forzado a un intervalo

error	distancia	lím. inferior n	lím. superior n	valor n
$14 \cdot 10^{-4}$	5.04	0	8	1.35
$208 \cdot 10^{-4}$	4.43	2	8	2.01
$334 \cdot 10^{-4}$	5.57	3	8	3.02
$656 \cdot 10^{-4}$	5.95	4	8	4.00
$983 \cdot 10^{-4}$	7.04	5	8	5.03

5.4.6. Conclusiones

En cuanto a la variable ρ , se observa en la Tabla 5.2 la alta sensibilidad de la misma. Sabiendo que su valor real es 1.5 en cuanto se fuerza el intervalo en una unidad mayor o menor a este valor, el error asociado al ajuste es prácticamente inaceptable.

La variable σ presenta un comportamiento similar al descrito anteriormente. Sabiendo que el valor real es 2, se observa en la Tabla 5.3 como la variable es

sensible a este intervalo pero no de una forma tan abrupta como la anterior, sino que el error va aumentando de forma más o menos lineal.

La variable k_x presenta un comportamiento algo distinto a las anteriores. Teniendo en cuenta que su valor real es 3, se puede observar en la Tabla 5.4 como en un intervalo cercano a su valor real apenas varía el error del ajuste, pero una vez superado este umbral el error se dispara en un orden de magnitud.

En cuanto a la variable k_y , el valor real de la misma es de 2. Como se observa en la Tabla 5.5, apenas varía el error de ajuste a medida que la forzamos a distintos intervalos. Esto significa que la forma del ciclo de histéresis puede adaptarse variando otras variables con prácticamente la misma precisión. Por lo tanto será una de las que menos importancia se dará para cálculos posteriores.

Tal y como se puede observar en la Tabla 5.6, la variable n es muy sensible a forzarla a un cierto intervalo, ya que el ajuste dispara el error final. Recordando que el valor real que debería tomar es de 1.5 según el ciclo generado, ya cuando es forzado al intervalo $[2, 8]$ el error del ajuste se dispara en un orden de magnitud.

Capítulo 6

Diseño de un controlador PID para un sistema con histéresis BW

6.1. Método propuesto

El método utilizado para el diseño del controlador PID es analítico en un primer momento, además de estar apoyado por la herramienta de simulación desarrollada por MathWorks Simulink® en la cual se han probado numerosos diseños que se mostrarán en lo sucesivo.

Una vez descrito el modelo de Bouc-Wen se presenta la pregunta de si un sistema que presente un tipo de variable con histéresis de tipo BW, sería controlable con un PID, y en caso afirmativo cómo se realizaría la elección de los parámetros de este controlador.

6.2. Planteamiento del Problema

Se considera el sistema mecánico de segundo orden descrito por:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + \phi(x)(t) = u(t) \quad (6.1)$$

La fuerza restauradora ϕ se considera descrita según el modelo de normalizado de Bouc-Wen (3.17) y (3.18) expresado anteriormente, con la condición inicial $w(0)$. Los parámetros son desconocidos. El desplazamiento $x(t)$ y la velocidad $\dot{x}(t)$ se pueden medir, mientras que la señal $w(t)$ del modelo normalizado no se puede medir. La señal de control $u(t)$ se debe diseñar para este caso.

Los parámetros $n \geq 1, \rho > 0, \sigma \geq \frac{1}{2}, k_x > 0, k_w > 0, m > 0, c \geq 0$ son desconocidos. El rango de parámetros corresponde a la Clase I, donde el modelo de Bouc-Wen es estable y cumple con las leyes de la termodinámica (Ikhouane y Rodellar, 2005).

6.3. Diseño del controlador PID

El diseño de este regulador es el descrito en (Ikhouane y Rodellar, 2007), primeramente se procede a definir las señales de referencia y_r, \dot{y}_r .

y_r es una señal conocida que además es suave y acotada, cuyas derivadas también son suaves de modo que cumplen:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} y_r(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} \dot{y}_r(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} \ddot{y}_r(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} y_r^{(3)}(t) = 0$$

Además exponencialmente van reduciendo su valor, de modo que existen unas constantes $a > 0, b > 0$ tales que:

$$|y_r^{(i)}(t)| \leq ae^{-bt} \quad \text{para } t \geq 0 \quad i = 0, 1, 2, 3$$

El objetivo del control es de manera global y asintótica, regular el desplazamiento $x(t)$ y la velocidad $\dot{x}(t)$ hacia las señales de referencia y_r, \dot{y}_r , manteniendo la estabilidad de las señales en lazo cerrado. En este capítulo se probará como

bajo un control PID, los errores en desplazamiento y velocidad tienden a cero a medida que el tiempo se incrementa.

Para conseguir la regulación de desplazamiento y velocidad se introducen las siguiente variables:

$$x_1(t) = x(t) - y_r(t)$$

$$x_2(t) = \dot{x}(t) - \dot{y}_r(t)$$

$$x_0(t) = \int_0^t x_1(\tau) d\tau$$

Se define el controlador PID según la ley de control:

$$u(t) = -k_0x_0(t) - k_1x_1(t) - k_2x_2(t) \quad (6.2)$$

Para definir los tres parámetros de este regulador hay que definir las siguientes constantes:

$$k_{2min} = \sqrt{2m_{max}(\sigma_{max}\rho_{max}k_{w_{max}} + k_{x_{max}} + k_1)} \quad (6.3)$$

$$e_1 = \frac{(c_{max} + k_2)^3}{m_{min}^2}$$

$$e_2 = \frac{k_1^2}{m_{max}^2}(k_2^2 - k_{2min}^2)$$

$$k_{0max} = \min\left(\frac{k_1k_2}{m_{max}}, -e_1 + \sqrt{e_1^2 + e_2}\right) \quad (6.4)$$

Una vez definidos estos valores se procede a la elección de los parámetros del PID del siguiente modo:

1. Se elige un valor positivo para k_1
2. Se elige k_2 que cumpla $k_2 > k_{2min}$

3. Finalmente se coge $0 < k_0 < k_{0_{max}}$

Obviando las demostraciones pertinentes, se prueba que las señales de control x_0, x_1, x_2, w y la señal de control u están acotadas. Teniendo también $\lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = 0$ y además $\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{x}(t) = 0$.

6.4. Simulaciones del sistema propuesto

Una vez se ha explicado la teoría de diseño del regulador PID, se procede a la simulación del sistema completo, para comprobar si el sistema realmente se podría llevar a una serie de posiciones *target* deseadas por el usuario y/o aplicación correspondiente.

Para ello se aplicó la anterior metodología para conseguir un regulador PID que cumpla con los requisitos de histéresis ya mencionados. Además es importante denotar que, aunque varíen los parámetros del regulador (dentro de los límites de diseño), los resultados apenas varían, y es por lo que no se presentan unos valores fijos con los que se han realizado las pruebas.

En la Figura 6.1 se observa el sistema ya simulado en Simulink. En este modelo todos los bloques corresponden al sistema planteado en la ecuación (6.1), donde el único bloque que no corresponde a dicho sistema es el llamado *Referencia*, que es el que genera la señal de referencia a seguir.

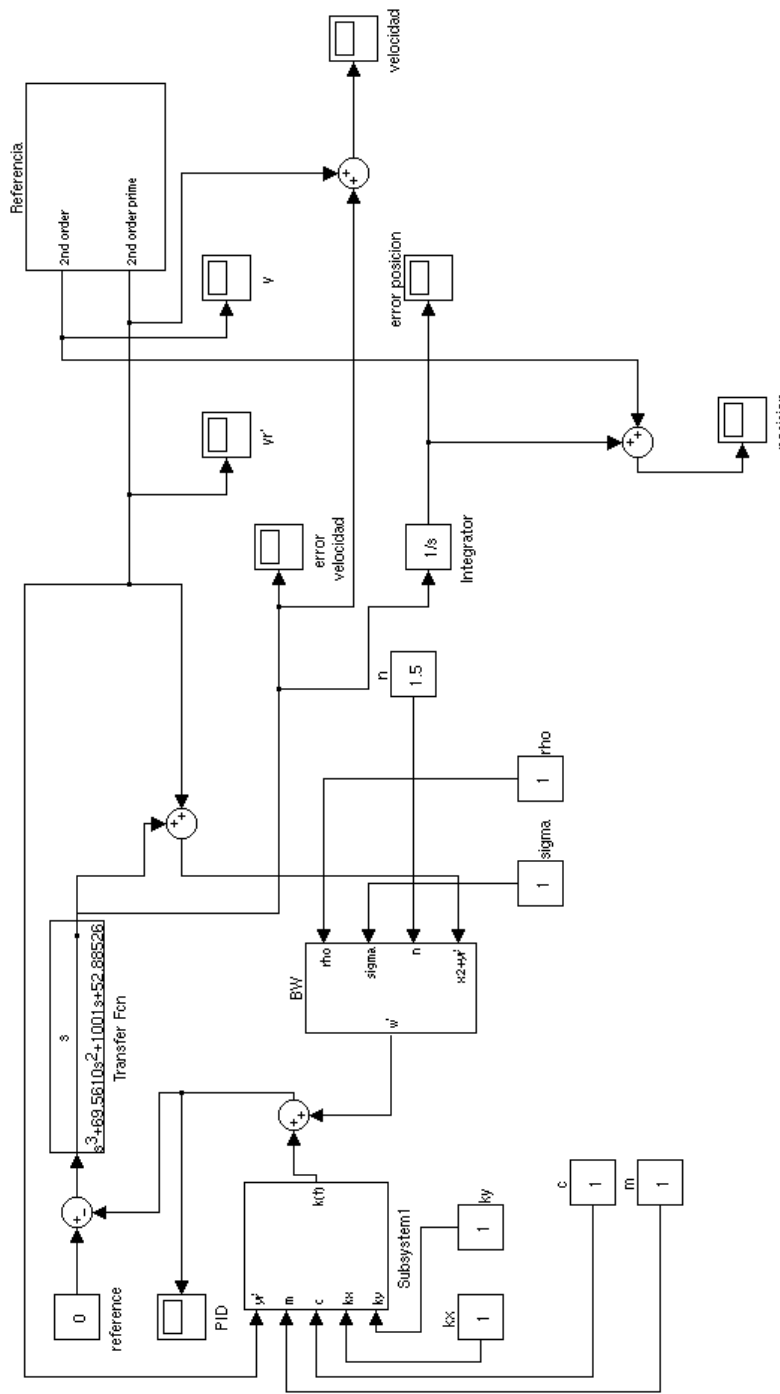


Figura 6.1: Modelo Simulink del sistema mecánico propuesto

Lo interesante de esta simulación radica en observar como responde el sistema ante ciertas señales de referencia del bloque nombrado anteriormente, y es por ello por lo que se define una y_r como la salida del sistema lineal de segundo orden siguiente:

$$\frac{w_0^2}{s^2 + 2\xi w_0 s + w_0^2}$$

Para los resultados que se mostrarán en lo sucesivo, los valores escogidos para este sistema fueron, $w_0 = 1$ y $\xi = 0,7$ y la respuesta ante una entrada de tipo escalón.

6.5. Resultados de la simulación

La señal de referencia escogida fue la combinación de dos sistemas de segundo orden, iguales y desplazados una constante, como se puede observar en la Figura 6.2, de modo que se simule como el sistema de segundo orden alcanza la posición $x = 1$, y tras 50 segundos se vuelve a cambiar al sistema de posición a $x = 2$. Además observamos el error que se comente mediante este control en la variable controlada del sistema (posición).

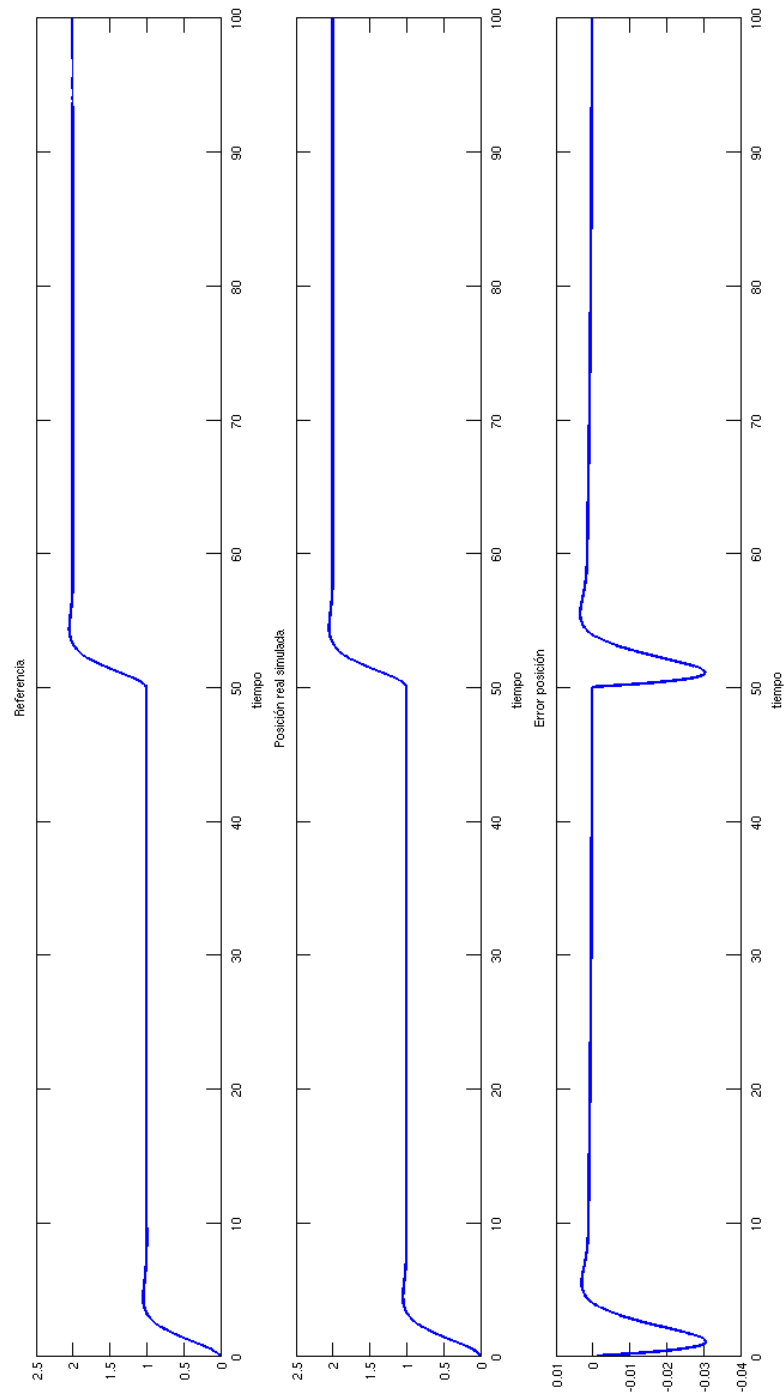


Figura 6.2: Posición referencial, real simulada y error

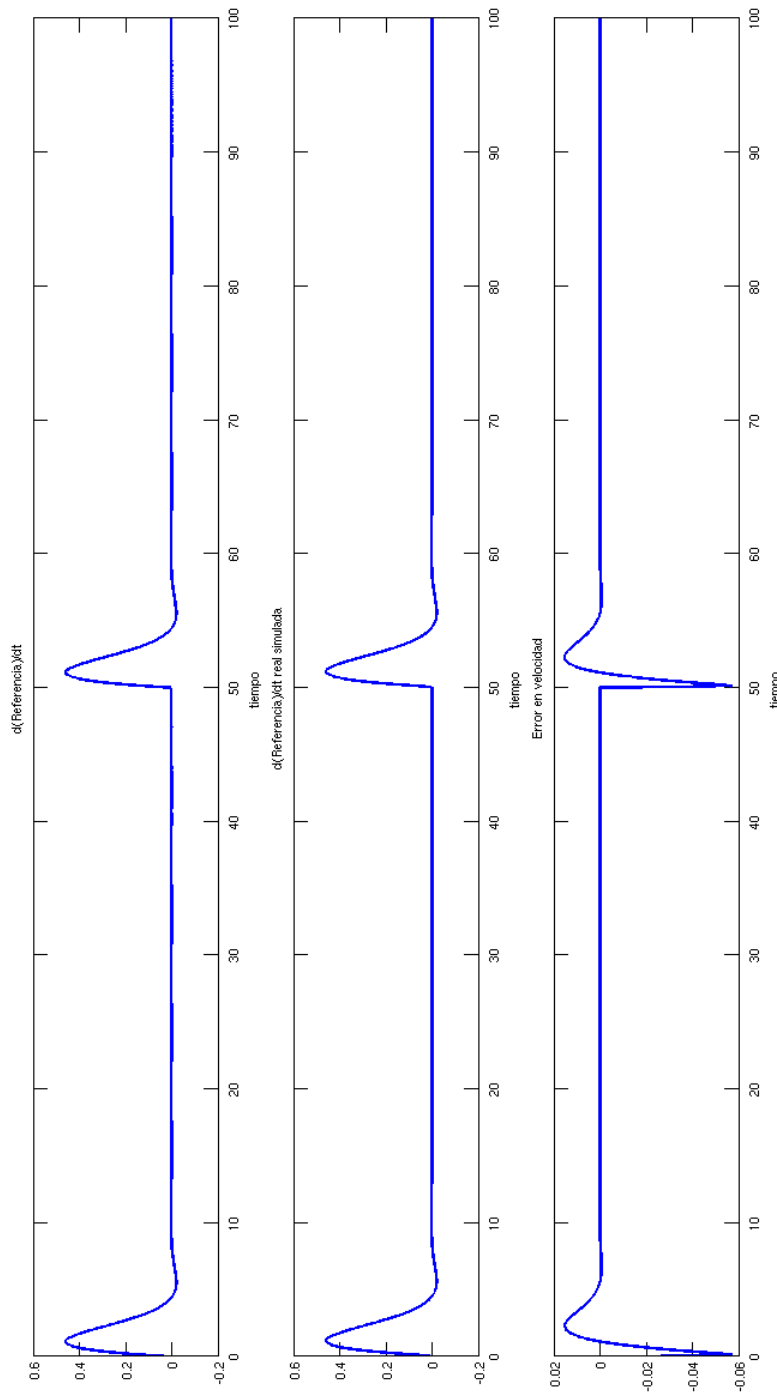


Figura 6.3: Velocidad referencia, real simulada y error

En vista de los resultados para la regulación en posición, se comprueba como para los datos escogidos para el PID, según el proceso ya explicado, se consigue alcanzar la señal de referencia con pocas oscilaciones y de forma suave.

En cuanto a regulación de velocidad, los resultados también son bastante buenos, aunque el sistema tarda un poco más en alcanzar la velocidad deseada que la posición, de ahí que la pendiente algo más abrupta (se observa en la Figura 6.3), pero sigo el resultado sigue siendo bastante bueno para un sistema cuyos tiempos de ciclo son bastante más grandes.

Capítulo 7

Resultados. Aplicación en un Embrague Magnetoreológico

Una vez que se han establecido las bases de control de sistemas complejos, que presentan algún tipo de histéresis, se pretende llevar a cabo el diseño de un dispositivo de rehabilitación para el codo humano, el cual está basado en un actuador que utiliza fluidos magnetoreológicos como medio de transmisión de movimiento.

Este actuador consiste en una especie de embrague con un comportamiento no lineal, con la principal ventaja de transmitir el par de un eje al otro mediante un medio de viscosidad variable, como se consigue con este tipo de fluidos. Todo el diseño y desarrollo está bajo en proyecto *Hybrid Neuroprosthetic and Neurorobotic devices for Functional Compensation and Rehabilitation* (HYPER) (Sitio Web del proyecto HYPER, 2011).

Los robots están tomando un importante papel en la rehabilitación de personas, es por ello por lo que nuevos diseños están emergiendo cada día, pero la mayoría de de ellos aún no están preparados para ser utilizados en prototipos

en términos de autonomía y peso entre otros. Uno de los requerimientos de dicho proyecto es precisamente el desarrollar prototipos pensados para posibles usos en exoesqueletos portables en los que el peso y autonomía son las variables críticas.

Según los propósitos de este proyecto se requieren tecnologías de actuadores que se puedan utilizar en dispositivos de rehabilitación portables. El diseño propuesto se basa en una transmisión de par entre el motor y la articulación perjudicada, mediante el uso de dicho embrague. Este actuador presenta la enorme ventaja de poder liberar la articulación de manera muy rápida, de modo que en el caso de que el paciente sufriera una contracción involuntaria (espasmo) se liberase el par de ayuda de forma que no se sufriera ningún daño asociado al uso de este sistema.

7.1. Introducción

Los exoesqueletos son estructuras externas superpuestas al cuerpo humano, cuya misión es transmitir par y fuerza de actuadores a los miembros solidarios al mismo. El uso de este tipo de dispositivos para rehabilitación, como se observa en la literatura actual (Chen y Liao, 2006), permiten a los pacientes recuperar o mejorar las funciones motoras afectadas (He y cols., 2005) de una manera rápida y personalizada para cada paciente.

Los actuadores convencionales requieren complejas técnicas de control para resolver las contracciones involuntarias en los músculos sobre los que actúan. Cuando estos fenómenos ocurren es necesario, de algún modo, proporcionar una respuesta *suave* no sólo por parte del software sino de los modelos a diseñar.

Como norma general se puede establecer que hay que conseguir optimizar

la relación de par por peso y volumen. Estas restricciones son las que hacen que el diseño sea un problema no trivial de resolver, además un desafío para la mayoría de los ingenieros tratando de encontrar situaciones de compromiso para aplicaciones biomédicas.

7.2. Fluidos Magnetoreológicos

Los fluidos magnetoreológicos (MR) son suspensiones de partículas polarizables que tienen un tamaño del orden de micrómetros y que se encuentran sobre una matriz (aceite) que hace de medio de transporte. Como característica principal destaca su cambio de viscosidad cuando es aplicado un campo magnético externo.

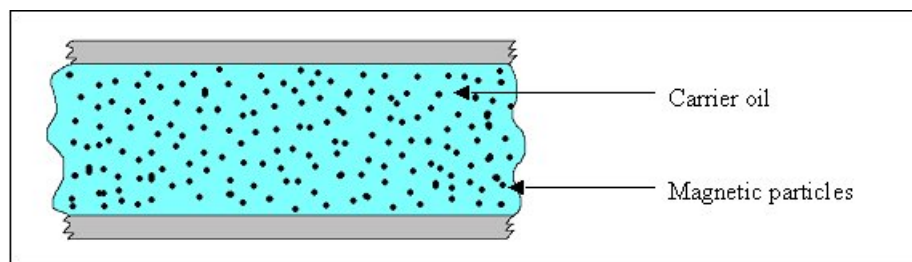


Figura 7.1: Partículas magnéticas en suspensión en un medio líquido (aceite)

7.2.1. Principio de funcionamiento

Cuando se les aplica un campo magnético, se producen formaciones de cadenas columnares en la dirección de las líneas de flujo. Estas estructuras son las que restringen el movimiento del fluido, ya que incrementan la viscosidad del fluido en conjunto.

Una vez que se retira el campo magnético aplicado, se vuelve a las condiciones iniciales de manera instantánea (tiempos del orden de 1ms).

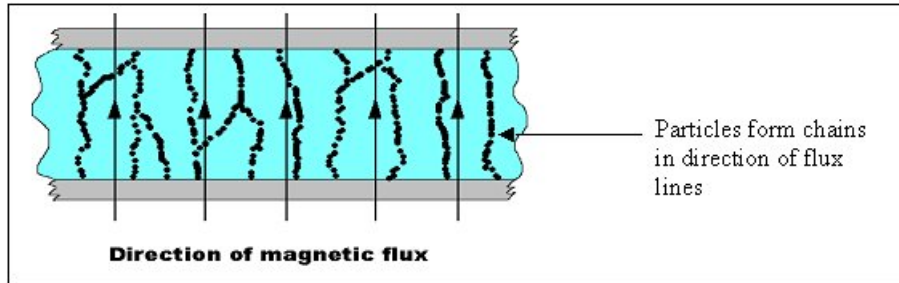


Figura 7.2: Formación de estructuras paralelas al campo magnético aplicado

El comportamiento de un fluido MR se representa generalmente como un plástico de Bingham que tiene un límite elástico variable (Phillips, 1969). En este modelo, el flujo se gobierna según (7.1):

$$\tau = \tau_y(H) + \eta \dot{\gamma}, \quad \tau > \tau_y \quad (7.1)$$

En esta expresión, τ_y es el límite elástico. H es el campo magnético aplicado, $\dot{\gamma}$ es el *shear rate* o velocidad de cizallamiento, y η es la viscosidad del plástico (para $H = 0$). Por debajo de este límite (para tensiones del orden de $10^{-3} Pa$), se comporta de manera viscoelástica (7.2).

$$\tau = G\gamma, \quad \tau < \tau_y \quad (7.2)$$

Donde G es el módulo complejo del material. Además se ha observado en la literatura (Weiss, Carlson, y Nixon, 1994) que este módulo es dependiente del campo magnético aplicado. Por otro lado, los fluidos MR se alejan de manera significativa del comportamiento como plásticos de Bingham cuando no aplicamos campo magnético, pero aún así, utilizando debidamente (7.1) es suficiente para el diseño de la mayoría de los dispositivos.

7.2.2. Modos de funcionamiento

La mayoría de los dispositivos que utilizan fluidos MR se pueden clasificar en función de si tienen polos fijos (*pressure driven flow mode* (PDF)) o con movimiento relativo entre ellos (*direct-shear mode*). Los diagramas de estos modos de funcionamiento se pueden observar en la Figura 7.3.

Ejemplos de dispositivos de funcionamiento en modo PDF son: servo válvulas o amortiguadores. Ejemplos de dispositivos de funcionamiento en modo *direct-shear* son: embragues, frenos, dispositivos de freno y sujeción.

Un tercer modo de funcionamiento conocido como *squeeze-film* también ha sido utilizado en pequeños movimientos con requerimientos de altas fuerzas y pares (Jolly y Carlson, 1996)

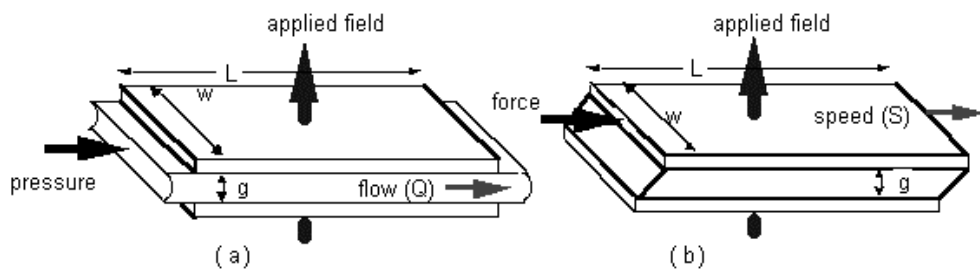


Figura 7.3: Modos básicos de operación: (a) *pressure driven mode*, (b) *direct shear mode*

El modo de funcionamiento que se utilizará en lo sucesivo será el *direct-shear*, donde la fuerza que se ejerce sobre las placas paralelas al vector velocidad del fluido vienen dado por (7.3)

$$F = F_{\eta} + F_{\tau} = \frac{\eta SA}{g} + \tau_y A \quad (7.3)$$

Donde S es la velocidad relativa entre dichas placas, y $A = Lw$ es el área de contacto.

7.3. Diseño propuesto de actuador

Entre los requerimientos iniciales para el desarrollo del dispositivo dentro del proyecto HYPER, se requiere una solución con buena relación entre el par transmitido y el confort, para ser viable la aplicación en un posible exoesqueleto. Es por este motivo por lo que el diseño de embrague propuesto consiste en una forma cilíndrica como se puede observar en la Figura 7.4, similar al presentado en (Walker, Thoma, y Niemeyer, 2009).

Como característica principal destaca, la conexión de la carcasa al eje de entrada. La transmisión de par hacia el eje de salida se realiza a través del fluido MR, en especial al rozamiento que éste genera cuando se *plastifica* por la presencia de un campo magnético externo.

La utilización de fluidos MR permite al dispositivo liberarse de manera casi instantánea cuando se desee, de modo que si el campo magnético se retira el par transmitido al eje de salida (a su vez conectado a la articulación deseada) será nulo. Esta característica, unida al bajo peso son las que hacen viable al embrague en casos de movimientos repentinos e involuntarios del usuario, tales como espasmos.

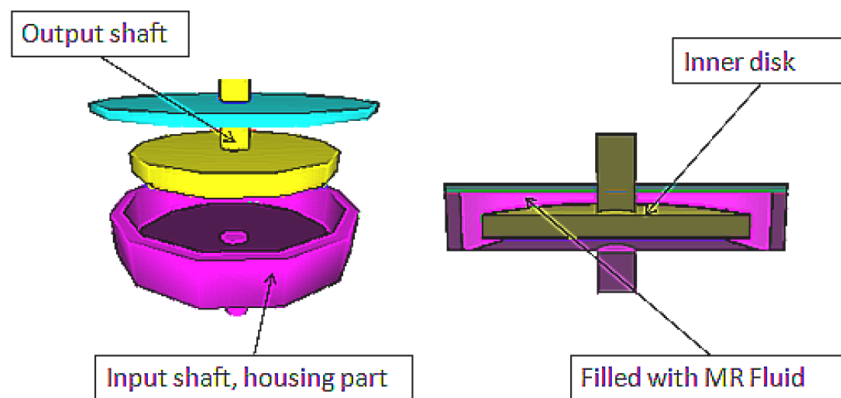


Figura 7.4: Diseño preliminar del embrague MR

7.3.1. Cálculos para el par transmitido

El procedimiento aquí descrito (7.4)-(7.6) es similar al utilizado en (Hongsheng, Juan, Liang, Jiong, y Xuezheng, 2009), con la principal diferencia de haberse introducido la posibilidad de cambiar el número de discos internos.

Para simplificar los cálculos, se han hecho algunas aproximaciones considerando que sólo el 95 % del área es efectiva en términos de transmisión de par hacia el eje de salida.

$$\frac{T_d}{n-1} = \frac{\pi\eta \cdot |\Delta\omega|}{h_d} (R_2^4 - R_1^4) + \frac{4}{3}\pi(R_2^3 - R_1^3)\tau_B \quad (7.4)$$

$$T_h = \frac{\pi\eta \cdot |\Delta\omega|}{h_h} \cdot R_2^4 + \frac{4}{3}\pi \cdot R_2^3 \cdot \tau_B \quad (7.5)$$

$$T_{tot} = T_d + T_h \quad (7.6)$$

En las expresiones (7.4)-(7.6), el cálculo está dividido en dos partes. T_d denota el par transmitido debido a los discos internos y T_h el correspondiente al transmitido por la carcasa. La suma total depende además del número de discos n .

Además, η es la viscosidad del fluido magnetoreológico sin campo magnético aplicado. Para el resto del trabajo se supone un valor constante de $0.3 \text{ Pa} \cdot \text{s}^1$.

$|\Delta\omega|$ es la velocidad de rotación relativa entre los ejes de entrada-salida.

h_d es la separación entre dos discos consecutivos, y h_h es la separación entre un disco (más cercano a la carcasa) y la carcasa.

¹Tal y como se ha determinado partiendo de las especificaciones genéricas de fluidos magnetoreológicos

R_2 es el radio de los discos internos y R_1 es el radio del eje que los conecta entre sí.

τ_B es el límite elástico del fluido para un campo magnético aplicado. Para el resto del trabajo se se aproximará a una constante de valor $5 \cdot 10^4 Pa$.

7.3.2. Simulaciones del embrague propuesto

Antes de la construcción de un prototipo se han llevado a cabo numerosas simulaciones para entender el comportamiento de los fluidos MR y el par que será transmitido al eje conducido del dispositivo. Debido a la necesidad de hacer un estudio más a fondo de lo que con un programa CAD convencional se haría, Matlab-Simulink® ha sido utilizado para simular el comportamiento de estos fluidos conectado con otros Software como MSC Adams®. Éste sirve para analizar el movimiento de la estructura como sólido rígido. Además el funcionamiento como dispositivo de rehabilitación se simulará mediante MSMS, cuya interfaz visual permitirá desde ver el movimiento en un cuerpo humano, hasta definir condiciones de contorno para articulaciones humanas, etc.

Todo estos estos programas informáticos se encuentran conectados entre sí (co-simulación) como se observa en Figura 7.5.

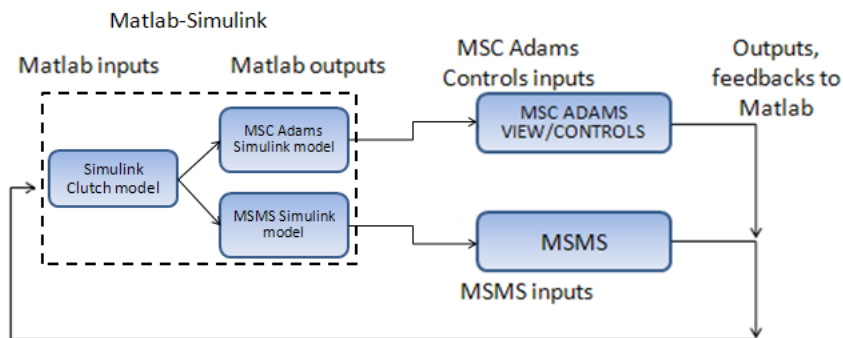


Figura 7.5: Esquema básico de la co-simulación del embrague

7.3.3. Resultados preliminares

Después de numerosas pruebas llevadas a cabo se planteó la posibilidad de variar el número de discos internos del embrague para evaluar si la relación par-peso mejoraría el diseño inicial propuesto. Los resultados obtenidos se encuentran recogidos en la Tabla 7.1.; donde el material utilizado para todos los cálculos es Al-Mg 5052 con densidad $2,68g/cm^3$.

Tabla 7.1: Par transmitido para diferentes configuraciones del embrague y peso total del dispositivo

Número de discos	Disco interno ϕ (cm)	Carcasa exterior ϕ (cm)	Par máximo (Nm)	Peso (g)
1	10	13	38.5	141
1	7	10	12	83
1	6	9	8	61
1	5	8	4.5	48
2	10	13	72	221
2	7	10	25	117
2	6	9	16	90
2	5	8	9	68
3	10	13	103	306
3	7	10	38	157
3	6	9	24	119.68
3	5	8	13	88

Como el par estimado para levantar un brazo adulto es de 3.3Nm (sin carga), y si se piensa en un diseño para ayudar e incluso poder levantar pequeñas cargas (500-600g) y que se pueda utilizar en pacientes de mayor peso y altura, el diseño con un disco interno de 10cm (83g) (ver Tabla 7.1) sería la mejor solución. Esta opción es capaz de transmitir un par de hasta 12Nm, lo cual cumple con las condiciones descritas y además deja cierto margen de sobra en el par transmitido, que permitirá adaptar el diseño a varios perfiles de personas.

El eje conductor será movido por un motor ultrasónico (el peso del mismo no está incluido en el dispositivo). Este tipo de motores tienen la ventaja de disponer de relaciones par/peso muy elevadas y tamaños muy pequeños además de tener una respuesta en posición y velocidad muy buena. También su respuesta es muy rápida y requiere voltajes pequeños lo cual justifica su uso para aplicaciones médicas. Para este primer diseño se ha seleccionado el USM-TRUM-60-RA (Figura 7.6) con un par de 1.5Nm, 250g de peso y una velocidad de rotación de 120rpm.

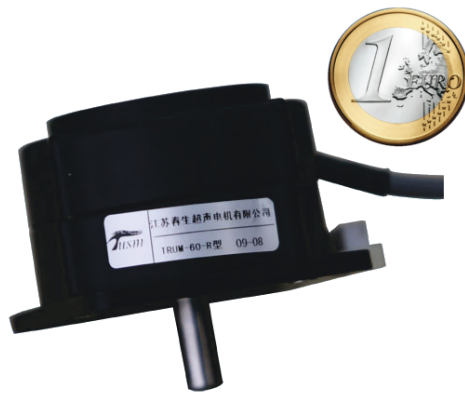


Figura 7.6: Motor ultrasónico USM-TRUM-60-RA

7.3.4. Rehabilitación funcional

El actuador propuesto tiene como principal función ayudar a recuperar la función motora del codo humano. Dependiendo del daño de cada paciente, el diseño propuesto podrá ayudar al paciente con un porcentaje de par necesario para llevar a cabo de ejercicio deseado (Chen y Liao, 2009). Además, será posible definir ejercicios de rehabilitación de forma que se compense esta movilidad perdida, de modo que los terapeutas dispongan de herramientas de control y seguimiento de cada uno de sus pacientes.

Un ejemplo de ayuda que se podría transmitir en un ejercicio de rehabilitación es la que se muestra en Figura 7.7, donde se observa una simulación de un ejercicio de rehabilitación con un 70 % de par de ayuda en un paciente de 1.80m de altura y 80kg de peso. Además se considera un movimiento sinusoidal $[0, \frac{\pi}{2}]$ del codo con una carga adicional de 1kg en la mano.

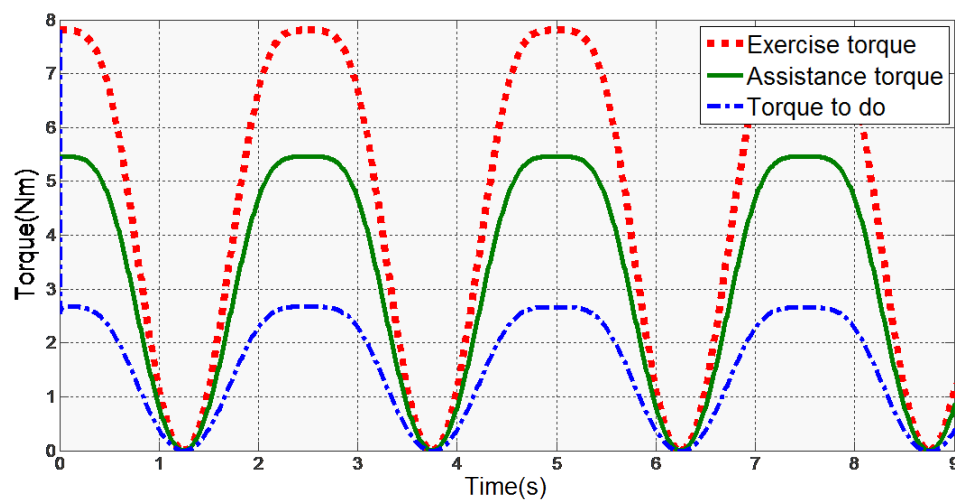


Figura 7.7: Par realizado por el paciente con un 70 % de ayuda

La principal ventaja del actuador diseñado es la capacidad de liberar el eje de salida de forma instantánea. Esta característica es esencial para su posible implementación en un robot portable ya que las articulaciones humanas no pueden ser forzadas a moverse. Movimientos involuntarios como *espasmos* u otro tipo de contracciones se estudian mediante el modelado musculoesquelético que permite el software MSMS[®], y que son exportadas directamente a Matlab-Simulink[®] como se observa en la Figura 7.8.

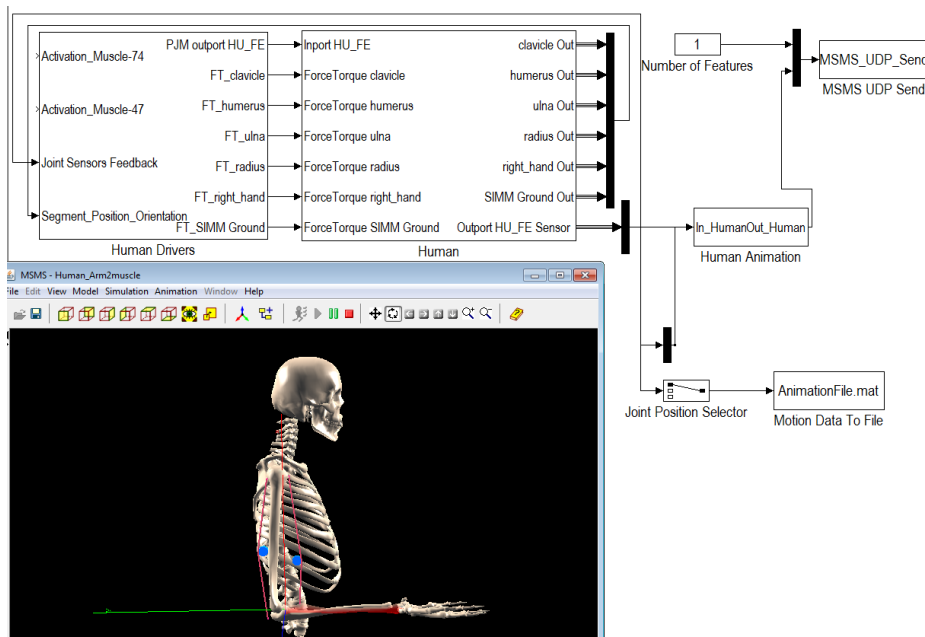


Figura 7.8: Co-simulación entre MSMS®-Simulink®

7.3.5. Ventajas para los terapeutas

Las principales ventajas son la posibilidad de disponer de un exoesqueleto para propósitos de rehabilitación, donde la articulación del codo está gobernada por un embrague MR. Además se tendrá la posibilidad de tratar a un mayor número de pacientes de manera personalizada, definiendo ejercicios individuales para cada uno de ellos. Se podrá disponer de historiales de evolución para cada uno de ellos, de manera que la ayuda aplicada por el dispositivo irá decreciendo a medida que avanza el tratamiento.

Tal y como se ha visto en este capítulo, el modelo del embrague MR diseñado en Matlab® incorpora el modelado del comportamiento del fluido analizada y explicado en los anteriores capítulos. Además, el esquema de control definido anteriormente ha sido implementado y puesto en marcha en este modelo.

Control de aleación con memoria de forma

8.1. Aleaciones con memoria de forma

Las aleaciones con memoria de forma (SMA) son un tipo de aleaciones metálicas deformables, y que cuando son sometidas a cambios de temperaturas en un determinado rango, recuperan el estado inicial no deformado, teniendo la capacidad de generar fuerzas durante dicha recuperación. Por tanto, son un tipo de actuadores controlables eléctricamente mediante el calentamiento por efecto Joule, y con una actuación silenciosa, aunque tienen una baja velocidad de respuesta.

8.2. Control de una fibra SMA

Todo el desarrollo presentado en los anteriores capítulos ha sido utilizado, para el control de una *aleación con memoria de forma*, debido a lo altamente no lineales que son estos materiales. Además para la identificación de la histéresis se planteó un procedimiento para llevar a la fibra a un estado conocido *zero point*,

de este modo los algoritmos de control siempre parten de un estado conocido del material. Las elongaciones básicas de este tipo actuadores rondan en torno al 4%, como se observa en la Figura 8.1, y se consiguen mediante la excitación térmica del mismo, debido a las propiedades de la estructura cristalina que presentan.

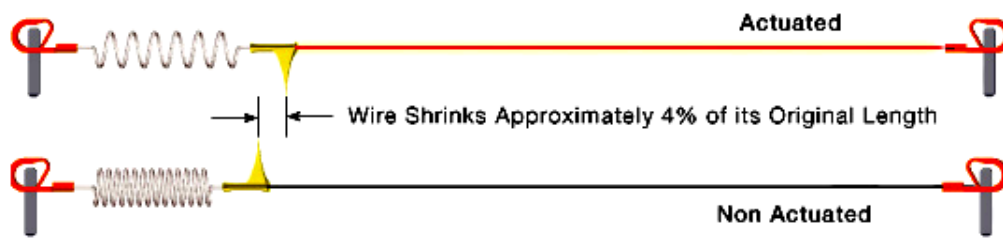


Figura 8.1: *Elongación en una SMA.*

8.3. Funcionamiento del nitinol

El material de las SMA utilizadas es nitinol (aleación de níquel y titanio), el cual es una aleación intermetálica de níquel y titanio en proporciones prácticamente equiatómicas (Klemas y cols., 2002). Mientras la aleación se encuentra por debajo de su temperatura de transición puede ser deformada y estirada con facilidad, sin daño permanente (dentro de los límites de elasticidad). Una vez que el material ha sido deformado, si es calentado por encima de su temperatura de transición (ya sea por corriente eléctrica o una fuente externa), la aleación recupera su forma predeterminada deshaciendo la deformación previa.

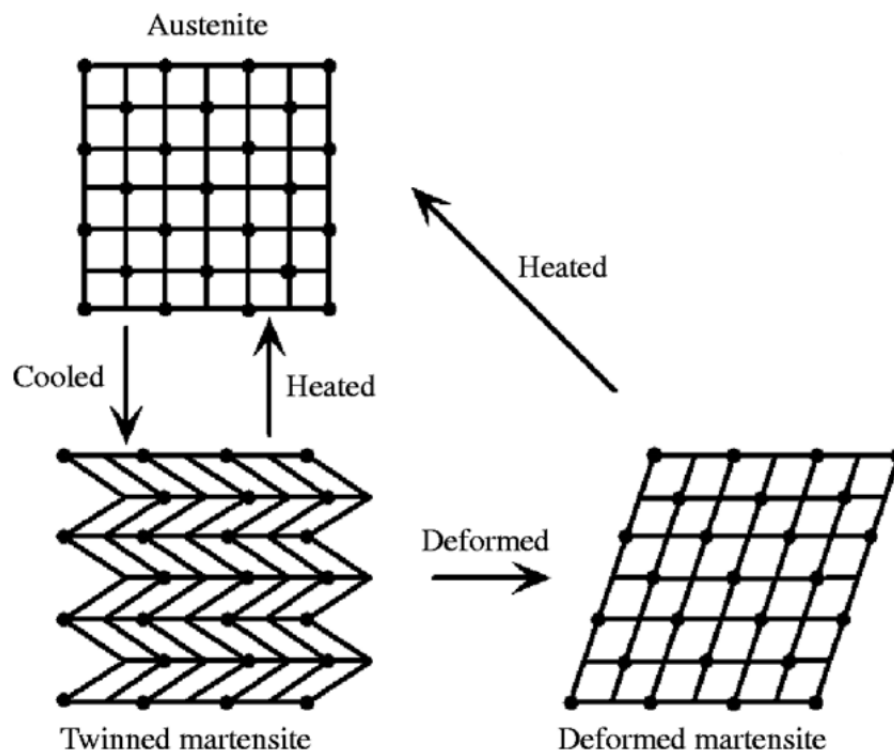


Figura 8.2: Fases de una SMA.

En la Figura 8.2 se observa el porqué de esta deformación, donde cada cuadro representa un grano del material con sus respectivos límites. Los granos se orientan simétricamente a lo largo de los límites de grano, dando lugar a una estructura muy organizada (Villoslada, 2010). Esta configuración permite el cambio del enrejado interno de cada grano, al mismo tiempo que se mantiene la misma interfase con los granos adyacentes. Es por esta razón por la cual las SMA pueden experimentar deformaciones macroscópicas mientras la estructura microscópica mantiene su orden.

La transformación de la estructura cristalina de la SMA durante el efecto de memoria de forma, no es un proceso termodinámicamente reversible, ya que debido a fricciones internas y a la aparición de defectos estructurales, se da una

disipación de energía. La consecuencia de estas irreversibilidades es la aparición de **histéresis** (Figura 8.3) en su comportamiento, lo cual hace que su manejo sea complejo y requiera de una estrategia de control muy bien definida.

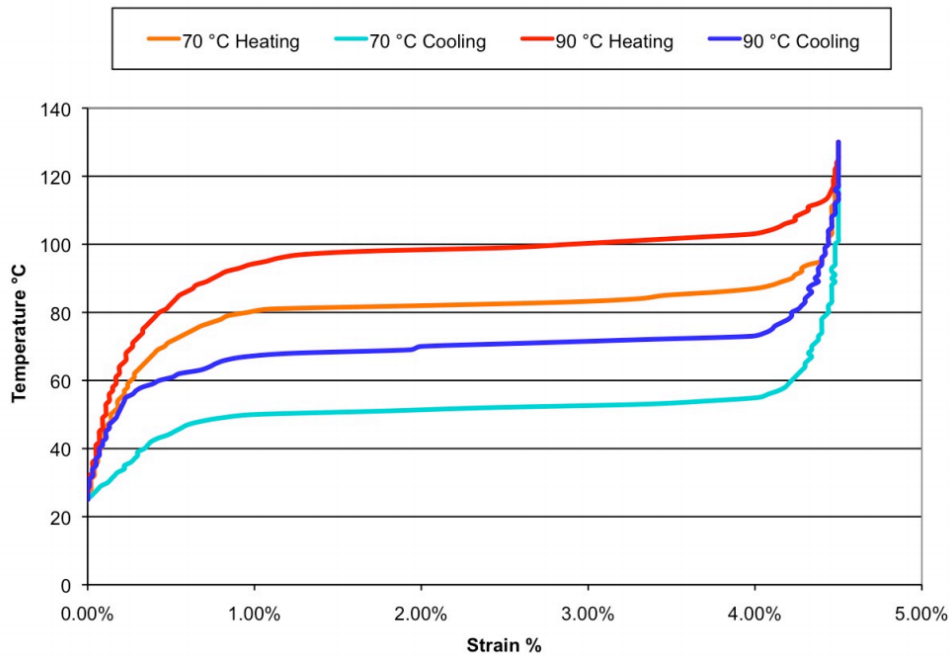


Figura 8.3: Temperatura frente a deformación para una SMA Dynalloy, comenzando en fase austenítica con una tensión de 172MPa.

8.4. Búsqueda del punto de inicial de trabajo

Uno de los problemas que plantean este tipo de materiales con histéresis es conocer el punto en el que se encuentran inicialmente del ciclo de histéresis. Dependiendo de la historia de uso que hayan tenido, velocidades de enfriamiento, última tensión a la que fueron sometidas, número de ciclos, etc. su comportamiento será distinto. Es por estos motivos por los cuales es necesario partir desde un estado "conocido" antes de iniciar cualquier procedimiento de identificación y/o control.

La técnica aplicada para esta *inicialización* consiste en aplicar una señal sinusoidal de amplitud decreciente y desplazada un *offset* determinado, como se observa en la Figura 8.4. Esta señal tiene la expresión matemática:

$$I(t)[A] = (at + b) \cdot \sin(\omega t) + C \quad (8.1)$$

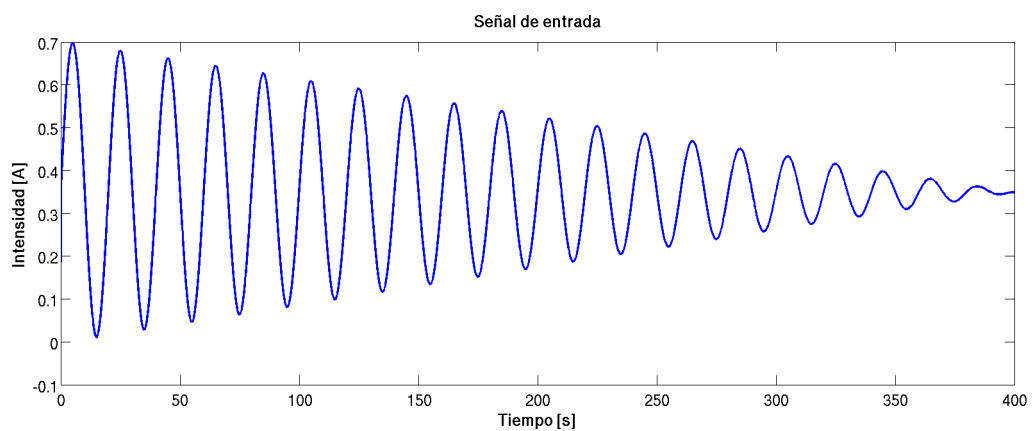


Figura 8.4: Señal de entrada para el proceso de inicialización.

Los parámetros a , b son los que corresponden a la amplitud de la señal sinusoidal, donde en función de la velocidad requerida para la inicialización se variarán en mayor o menor medida. Por otro lado ω es la velocidad de la señal.

La constante C es la que define el punto medio de trabajo de la SMA en intensidad. Para poder representar un ciclo con parte de subida y bajada, partiendo desde el origen, es necesario el cálculo o estimación de este punto. Por simplicidad se ha cogido el valor medio entre las intensidades máxima y mínima aplicadas, ya que como primera aproximación es bastante acertada.

De forma más intuitiva, lo que se está haciendo es ir reduciendo los ciclos de histéresis que presenta el material hasta que se alcanza, en régimen permanente, el punto buscado que se observa en la Figura 8.5, donde la fibra SMA se encontraría lista para ejecutar cualquier tarea, ya sea de control o identificación.

Este proceso se ha realizado de forma muy lenta para evitar la aparición de otras no linealidades en el material, pero se puede acelerar bastante dependiendo de la aplicación. Para ello se debe proceder a variar las constantes a, b anteriores, así como ω , pero siempre se debe prestar especial atención a que la SMA realice al menos 2 o 3 ciclos completos.

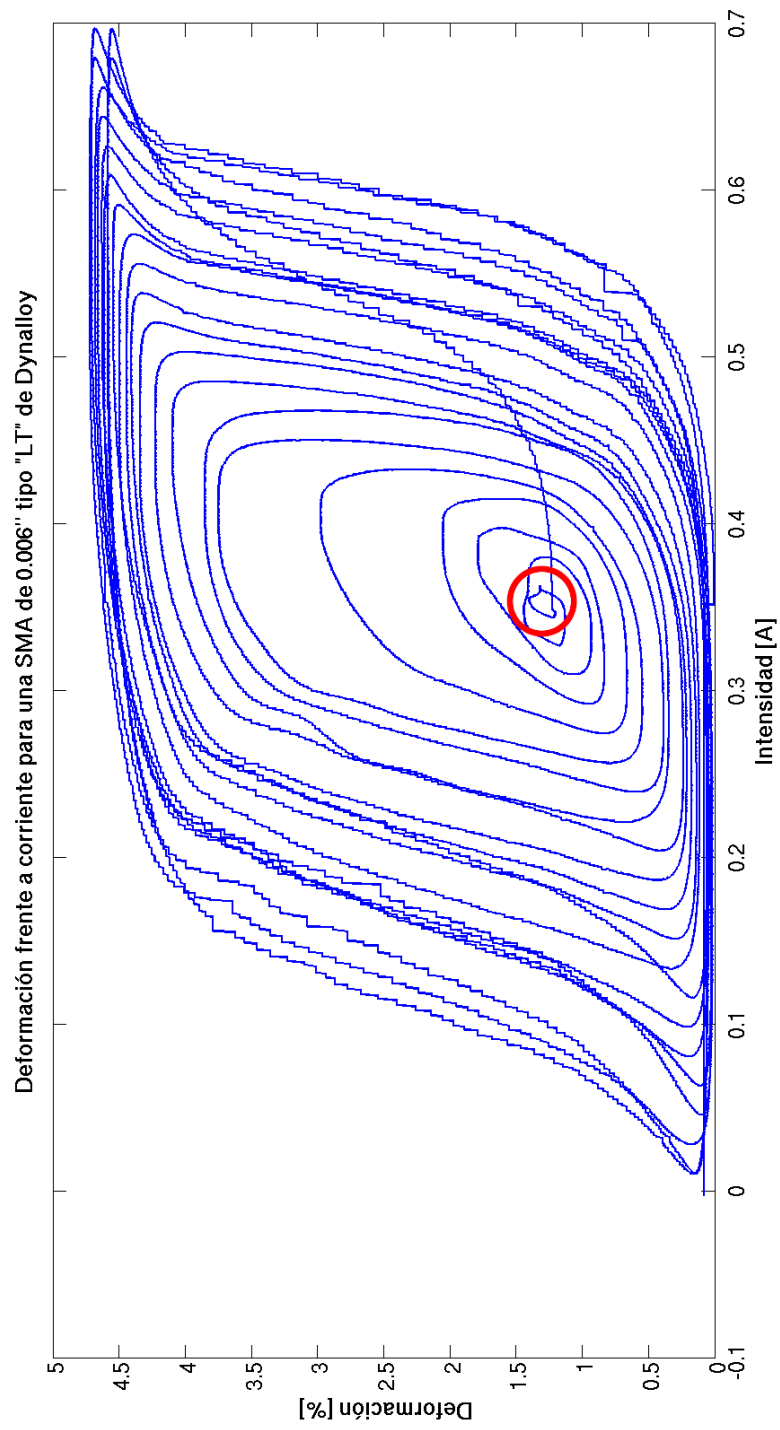


Figura 8.5: Búsqueda del punto inicial de partida del ciclo de histéresis (marcado en rojo).

8.5. Identificación I de la histéresis en una SMA

Una vez conocido el estado inicial, el sistema se encuentra listo para proceder a la identificación de la histéresis (de la variable observada). El procedimiento consiste en excitar al sistema con dos señales triangulares con una separación entre ellas q como se observa en la Figura 8.6. Una vez aplicadas estas señales a la SMA se esperará varios ciclos hasta que se alcance un régimen con una estabilidad aceptable.

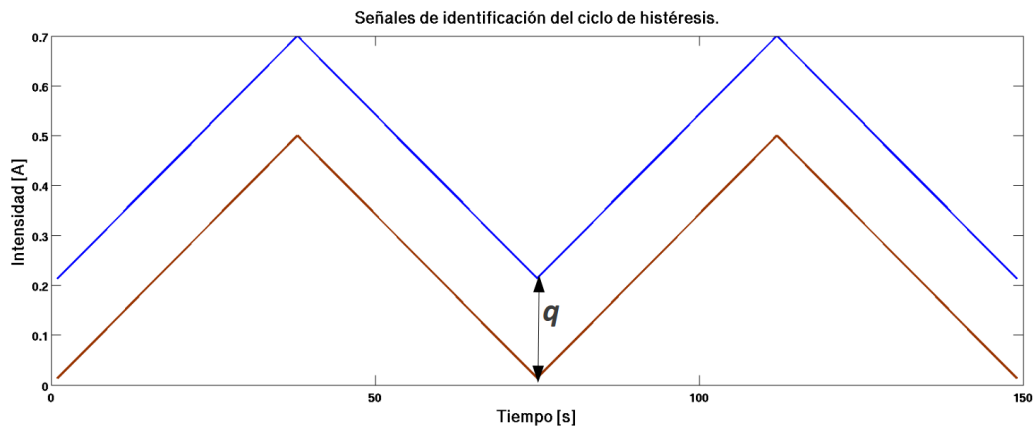


Figura 8.6: Señales triangulares desfasadas q para identificar la histéresis.

A continuación sólo se seleccionarán las partes de subida del ciclo de histéresis para ambas señales (Figura 8.7). Una vez filtradas estas señales se aplicará el proceso descrito en (Ikhouane y Rodellar, 2007) para la identificación de los parámetros de la histéresis, cuya implementación en Matlab[®], se encuentra en el Apéndice A.

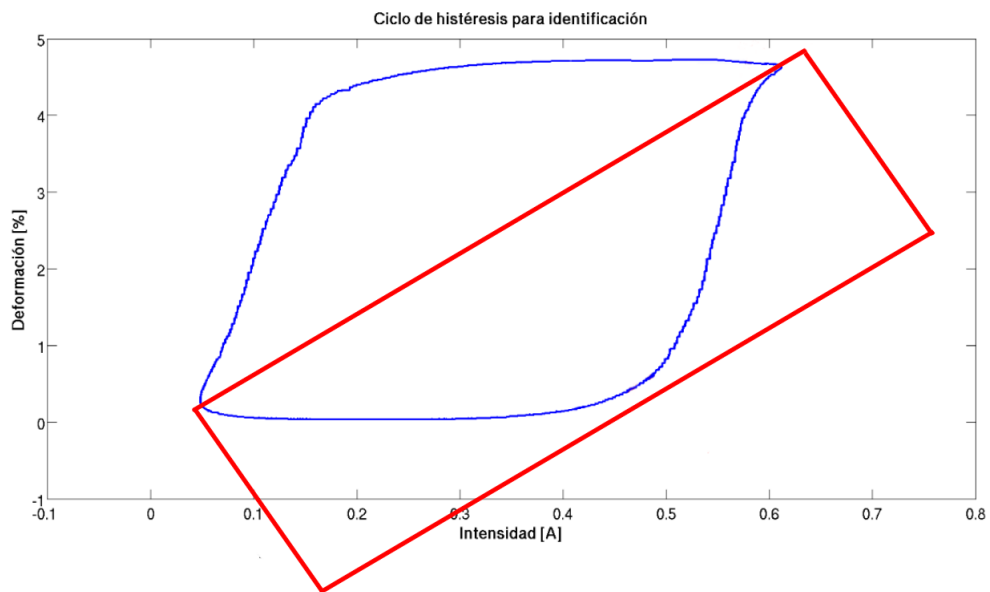


Figura 8.7: Ciclo de histéresis. En rojo, curva de subida (loading part) de un ciclo de histéresis.

En la función implementada,

```
[kx, kw, rho, sigma, n]=identificacion(input, hyst1, hyst2, q)
```

el vector **input** corresponde a la parte de la señal de entrada para el cual se consiguen las partes de subida del ciclo (parte creciente de la señal triangular). Las partes de subida del ciclo de histéresis se introducirán como **hyst1**, **hyst2** así como el desplazamiento **q** entre ambas. El resultado de la ejecución de este algoritmo son las cinco variables del modelo Bouc-Wen normalizado.

8.6. Identificación II de la histéresis en una SMA

Tal y como se expresó en capítulos anteriores, la técnica de Evolución Diferencial (DE) funciona bastante bien en lo que a identificación de parámetros se

refiere, es por ello por lo que se plantea la siguiente metodología de identificación:

- Elección de una señal de trabajo adecuada para llegar al régimen permanente, donde el ciclo de histéresis se repite de forma idéntica. Se sugiere la utilización de señales sinusoidales y/o cuadradas, o una combinación de ambas para aligerar el enfriamiento de la SMA.
- Determinación de la frecuencia de trabajo de la SMA. Por motivos térmicos, la velocidad de funcionamiento está muy ligada al método de enfriamiento que se utilice, es por ello por lo que si se piensa utilizar convección natural se deberá de comprobar si es posible su uso.
- Una vez aplicada la señal durante varios ciclos hasta llegar a un ciclo estable, se extraerán los datos correspondientes a la salida de histéresis que se esté midiendo de un ciclo completo (subida y bajada).
- Aplicación del algoritmo de Evolución Diferencial para la obtención de los parámetros, donde la función de coste será la de diferencias cuadráticas (véase la ecuación 5.2).

8.7. Comparativa entre las estrategias de identificación

La última estrategia de identificación, basada en algoritmos genéticos no ha sido llevada a cabo por falta de medios experimentales. Aún así, se pueden establecer cuales serían las principales diferencias entre ambos métodos:

- El segundo método obtendrá una solución mucho más rápida, ya se es una de las posibles soluciones del proceso de optimización.
- La primera estrategia requiere de señales desfasadas una constante muy bien determinada, lo cual puede ser un problema para su generación y medida. Además, sólo tiene en cuenta el ciclo de subida, lo cual puede propagar pequeños errores en medidas a unos mayores en la estimación.

- Para sistemas bien conocidos y en condiciones muy estables de funcionamiento, se recomendaría la primera estrategia, pero para el presente trabajo se utilizará el primer método por necesidades de una mayor flexibilidad y robustez.

8.8. Control de la histéresis

Una vez se han identificado los cinco parámetros del modelo Bouc-Wen normalizado, se plantea una estrategia de control basada en un regulador PID. Los parámetros de éste, se calcularán siguiendo el procedimiento ya explicado en el Capítulo-5 y serán específicos para la aplicación cuya señal de entrada, sea la utilizada en los propósitos de identificación del ciclo de histéresis.

El bucle de control en lazo cerrado a implementar será el que se observa en Figura 8.8:

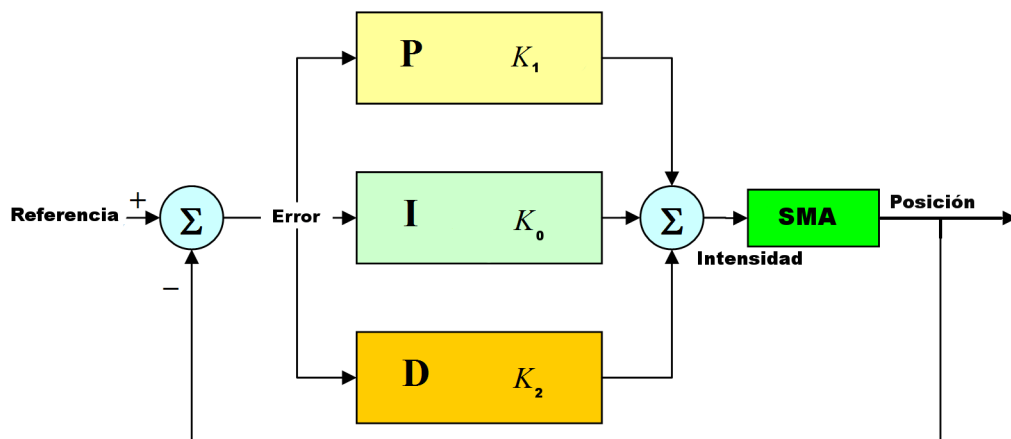


Figura 8.8: Esquema de control PID para la SMA alimentada en intensidad y realimentada en posición.

La alimentación de la SMA se realiza en intensidad, mientras que la variable que se está realimentando en todo momento es la posición o elongación de la

misma. Además, para incrementar la precisión en la lectura de la posición, se sugiere tomar medidas después del mecanismo de amplificación del movimiento (en el caso de que se utilice).

En el caso estudiado, se controló la SMA en posición, pero otras variables tales como velocidad, temperatura, etc. podrían ser también objeto de interés si la electrónica disponible permitiera medirlas con precisión y velocidad.

Conclusiones y trabajos futuros

El propósito final del trabajo comenzado en esta tesis es el diseño, construcción y control de un dispositivo de rehabilitación humana principalmente pensada para el miembro superior. El objetivo de esta tesis, es proponer una metodología de control para los actuadores no lineales, dentro del dispositivo final de compensación de movimiento. Los puntos que se han alcanzado se enumeran a continuación:

- Diseño y control del sistema de transmisión del par a la articulación dañada. Se desarrolló y planteó una metodología de control para un embrague magnetoreológico, que presenta una elevada histéresis debido a las no linealidades de dichos fluidos.
- Planteamiento de una metodología de control para actuadores basados en SMAs, que se utilizarán para el diseño de actuadores más ligeros para articulaciones que requieran menor par (principalmente los dedos).
- Caracterización de ciclos de histéresis mediante algoritmos evolutivos (Evolución Diferencial), los cuales tienen la enorme ventaja de no requerir un conocimiento exhaustivo del problema en sí.

9.1. Trabajos futuros

El trabajo aquí descrito, al formar parte de un proyecto mayor, no es sino el principio de unas metodologías a aplicar para el desarrollo del dispositivo de rehabilitación final. Es por este motivo por el cual, a continuación se plantean una serie de trabajos muy relacionados con los aquí presentados, y que a corto plazo serán los prioritarios a realizar.

- Diseño de unos dispositivos de enfriamiento para actuadores de tipo SMA. Para mejorar los algoritmos de control y aumentar la frecuencia de funcionamiento de los mismos, se plantean el uso de dispositivos de enfriamiento por convección forzada basados en microventiladores y sopladores como los que se observan en la Figura 9.1.

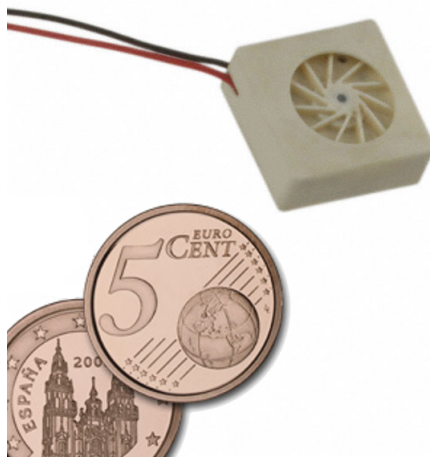


Figura 9.1: Microventilador. Modelo: SUNON® , UB393-500.

- Estudio del operador de histéresis **Prandtl-Ishlinskii** (PI), como técnica de control alternativa a las ya propuestas. Debido a la rapidez y simplicidad (operador lineal) de este algoritmo, se plantea como una técnica alternativa para aplicaciones en tiempo real. El esquema de control a implementar sería similar al que se observa en la Figura 9.2. Donde se plantea el uso

de un compensador de histéresis (operador inverso de Prandtl-Ishlinskii) para anular las no linealidades (Kuhnen, 2003).

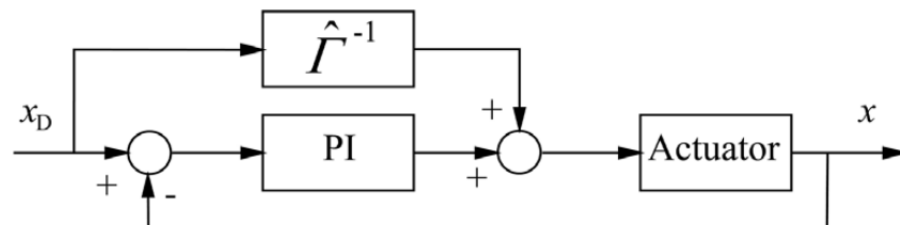


Figura 9.2: Estrategia de control híbrida mediante el uso del compensador de Prandtl-Ishlinskii.

- Implementación de los algoritmos de control en un dispositivo embebido (Figura 9.3). De forma paralela al desarrollo de este trabajo, se está diseñando una arquitectura de control para el dispositivo final. Éste está basado se basa en un microcontrolador dotado de una pantalla LCD, mediante la cual se deberán de controlar los actuadores aquí descritos, y es por ello por lo que se deberán de adoptar todos los algoritmos a una arquitectura de este tipo.
- Comprobación de los algoritmos de control sobre un fluido MR real, para verificar que las simulaciones presentadas a lo largo de esta tesis tiene una aplicación concreta, de modo que todas las estrategias de presentadas en este proyecto tengan su uso en un sistema altamente no lineal.

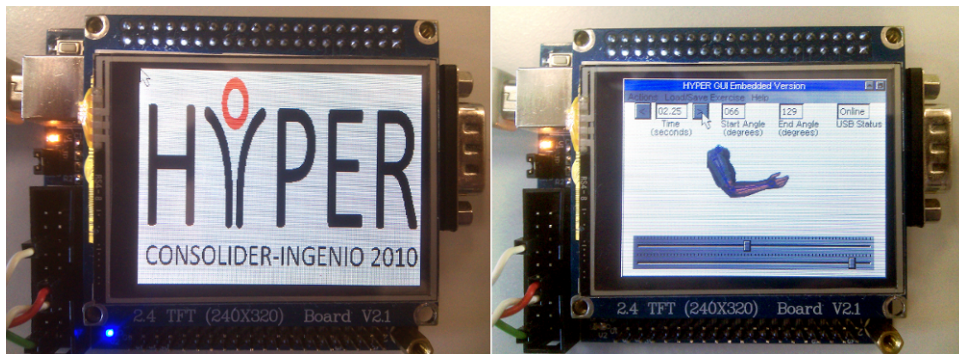


Figura 9.3: *Microcontrolador e interfaz de control del dispositivo de rehabilitación.*

Apéndice **A**

Código de identificación del modelo Bouc-Wen (m-file)

```
function [kx,kw,rho,sigma,n] =  
    identification(input,hyst1,hyst2,q)  
  
vectorkx = (hyst2-hyst1)/q;  
  
kx = mean(vectorkx);  
  
theta = hyst1-kx*input;
```

```
posicion = interp1(theta,1:length(theta),0);

xestrella = interp1(input,posicion);

posicion1 = randi(length(input)-2,1);
posicion2 = randi(length(input)-1,1);

while (input(posicion1) <= xestrella)

posicion1 = randi(length(input)-2,1);

end

while input(posicion2) <= input(posicion1)
    posicion2 = randi(length(input)-1,1);
end

derivadatheta = diff(theta)./diff(input);

a = interp1(derivadatheta,posicion);

n = log((derivadatheta(posicion2) - a)/
        (derivadatheta(posicion1) - a))/
    log(theta(posicion2)/theta(posicion1));
```

```
b = (a-derivada(theta(posicion2)))/(theta(posicion2)^n);
kw = (a/b)^(1/n);
rho = a/kw;

omega = theta/kw;

aleatorio3 = randi(length(omega)-1,1);

while (omega(aleatorio3) >= 0)
    aleatorio3 = randi(length(omega)-1,1);
end

derivadaomega = diff(omega)./diff(input);
sigma = (1/2)*((derivadaomega(aleatorio3)/rho-1)/
    (-omega(aleatorio3))^n+1);
```


Referencias

- Bouc, R. (1971). Modèle Mathématique d'hystérésis. *Acustica*, 21, 16–25.
- Bray, H. (1919). Elementary properties of the Stieltjes integral. *Annals of Mathematics*, 177–186.
- Chen, J., y Liao, W. (2006). A leg exoskeleton utilizing a magnetorheological actuator. En *ROBIO'06. IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 2006*. (pp. 824–829).
- Chen, J., y Liao, W. (2009). Design and testing of assistive knee brace with magnetorheological actuator. En *ROBIO 2008. IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics* (pp. 512–517).
- Ching, J., Beck, J., y Porter, K. (2006). Bayesian state and parameter estimation of uncertain dynamical systems. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 21(1), 81–96.
- Erlicher, S., y Point, N. (2004). Thermodynamic admissibility of Bouc-Wen type hysteresis models. *Comptes rendus Mécanique*, 332(1), 51–57.
- Ha, J., Fung, R., y Han, C. (2005). Optimization of an impact drive mechanism based on real-coded genetic algorithm. *Sensors and Actuators A: Physical*, 121(2), 488–493.

- He, J., Koeneman, E., Schultz, R., Herring, D., Wanberg, J., Huang, H., y cols. (2005). RUPERT: A device for robotic upper extremity repetitive therapy. En *Engineering in Medicine and Biology Society, 2005. IEEE-EMBS 2005* (pp. 6844–6847).
- Hongsheng, H., Juan, W., Liang, C., Jiong, W., y Xuezheng, J. (2009). Design, control and test of a magnetorheological fluid fan clutch. En *Ical'09. IEEE International Conference on Automation and Logistics* (pp. 1248–1253).
- Ikhouane, F., y Rodellar, J. (2005). On the hysteretic Bouc-Wen model. Part I: Forced limit cycle characterization. *Nonlinear Dynamics*, 42(1), 63–78.
- Ikhouane, F., y Rodellar, J. (2007). *Systems with hysteresis: Analysis, Identification and Control using the Bouc-Wen Model*. Wiley-Interscience.
- Jolly, M., y Carlson, J. (1996). Controllable squeeze film damping using magnetorheological fluid. En *Actuator 96, 5th Int. Conf. on New Actuators*.
- Kirkpatrick, S., Gelatt, C., y Vecchi, M. (1983). Optimization by simulated annealing. *science*, 220(4598), 671.
- Klemas, V., y cols. (2002). Materiales Inteligentes Aleaciones metálicas y polímeros con memoria de forma; Smart materials. Metallic alloys and polymers with shape memory. *CES med*, 16(2), 9–19.
- Kuhnen, K. (2003). Modeling, Identification and Compensation of Complex Hysteretic Nonlinearities: A modified Prandtl-Ishlinskii Approach. *European Journal of Control*, 9(4), 407–418.
- Kuo, B., y Golnaraghi, F. (2002). *Automatic control systems*. John Wiley & Sons, Inc.
- Kyprianou, A., Worden, K., y Panet, M. (2001). Identification of hysteretic systems using the differential evolution algorithm. *Journal of Sound and Vibration*, 248(2), 289–314.

- Loh, C., y Chung, S. (1993). A three-stage identification approach for hysteretic systems. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 22(2), 129–150.
- Masri, S., Caffrey, J., Caughey, T., Smyth, A., y Chassiakos, A. (2004). Identification of the state equation in complex non-linear systems. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 39(7), 1111–1127.
- Nelder, J., y Mead, R. (1965). A simplex method for function minimization. *The computer journal*, 7(4), 308.
- Ni, Y., Ko, J., y Wong, C. (1998). Identification of non-linear hysteretic isolators from periodic vibration tests. *Journal of sound and vibration*, 217(4), 737–756.
- Ogata, K. (2001). *Modern control engineering*. Prentice Hall PTR.
- Phillips, R. (1969). *Engineering applications of fluids with a variable yield stress*. Tesis Doctoral no publicada, University of California, Berkeley.
- Pons, J. (2008). *Wearable Robots: Biomechatronic Exoskeletons*. Wiley Online Library.
- Price, K., Storn, R., y Lampinen, J. (2005). *Differential evolution: a practical approach to global optimization*. Springer Verlag.
- Qing, A. (2009). *Differential Evolution: fundamentals and applications in electrical engineering*. Wiley-IEEE Press.
- Rinnooy Kan, A., y Timmer, G. (1987). Stochastic global optimization methods part I: Clustering methods. *Mathematical Programming*, 39(1), 27–56.
- Sekhon, J., y Mebane, W. (1998). Genetic optimization using derivatives. *Political Analysis*, 7(1), 187.
- Sitio Web del proyecto HYPER. (2011, 14 de Octubre). Disponible en <http://www.iai.csic.es/hyper/index.htm>

- Spencer, B., Dyke, S., Sain, M., y Carlson, J. (1997). Phenomenological model for magnetorheological dampers. *Journal of engineering mechanics*, 123(3), 230–238.
- Sues, R., y Mau, S. (1988). Systems identification of degrading hysteretic restoring forces. *Journal of Engineering Mechanics*, 114, 833.
- Villoslada, A. (2010, Noviembre). *Proyecto Fin de Carrera: Diseño y aplicación de un actuador SMA en el control de manos robóticas*.
- Visintin, A. (1994). *Differential models of hysteresis*. Springer Verlag.
- Walker, D., Thoma, D., y Niemeyer, G. (2009). Variable impedance magnetorheological clutch actuator and telerobotic implementation. En *IROS 2009. International Conference on Intelligent Robots and Systems* (pp. 2885–2891).
- Weiss, K., Carlson, J., y Nixon, D. (1994). Viscoelastic properties of magneto- and electro-rheological fluids. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 5(6), 772.
- Wen, Y. (1976). Method for random vibration of hysteretic systems. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 102(2), 249–263.
- Xia, P. (2003). An inverse model of MR damper using optimal neural network and system identification. *Journal of Sound and Vibration*, 266(5), 1009–1023.