



Escuela de  
Ingeniería y Arquitectura  
**Universidad Zaragoza**

Trabajo Fin de Máster

# Modelado y control de dispositivos electromecánicos

Autor

Edgar Ramírez Laboreo

Directores:

Carlos Sagüés Blázquez

Sergio Lorente Gil





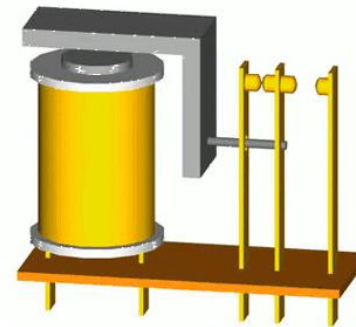
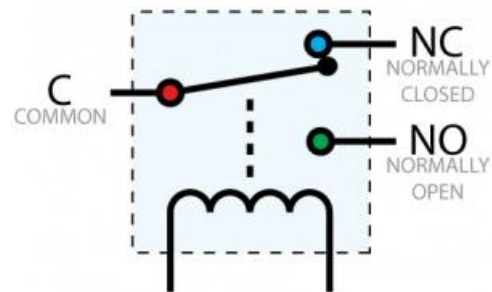
# 1. Introducción

## 1. Introducción

### 1.1. Motivación

Relé electromecánico:

*“Dispositivo electromecánico que, al ser estimulado por una corriente eléctrica débil, abre o cierra un circuito secundario que es capaz de soportar grandes niveles de tensión o permitir el paso de elevadas corrientes”*



# 1. Introducción

## 1.1. Motivación



**Relés  
electromecánicos**

**Dispositivos  
semiconductores**

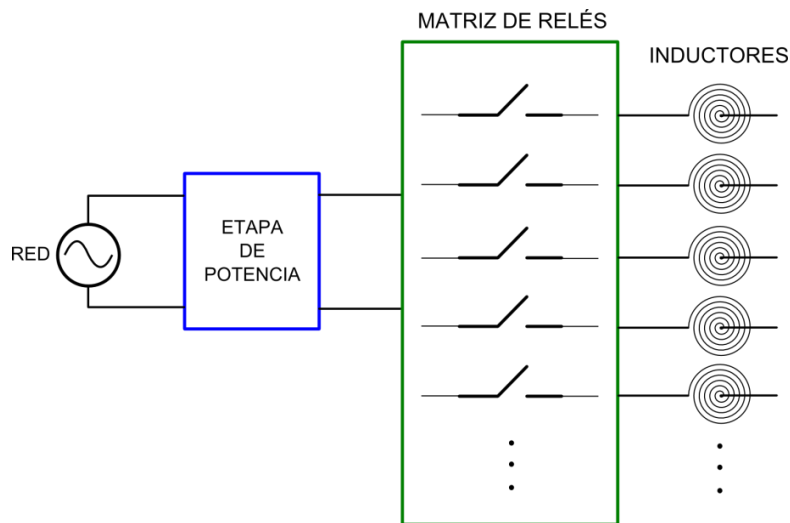
Pérdidas energéticas		
Direccionalidad de la corriente		
Polaridad de la tensión		
Aislamiento galvánico		
Coste		
Número de activaciones (vida útil)		
Ruido acústico		
Tiempo de operación		

# 1. Introducción

## 1.1. Motivación

Todas las cocinas de inducción del grupo BSH incluyen relés

En alguna de ellas se producen gran cantidad de conmutaciones



Hasta 48  
inductores

Conmutaciones  
cada 2 segundos





## 1. Introducción

### 1.2. Objetivos

Reducir los puntos débiles de los relés electromecánicos mediante técnicas de control

Tareas:

1. Revisión del estado del arte
2. Desarrollo de un modelo dinámico para relés electromecánicos
3. Validación experimental del modelo
4. Propuesta de estrategias de control y validación de las mismas

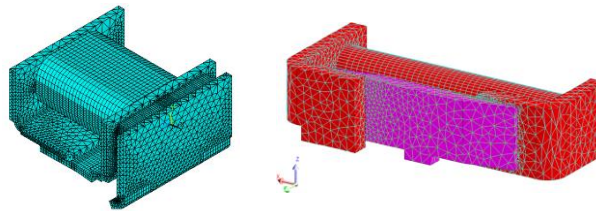
# 1. Introducción

## 1.3. Estado del arte

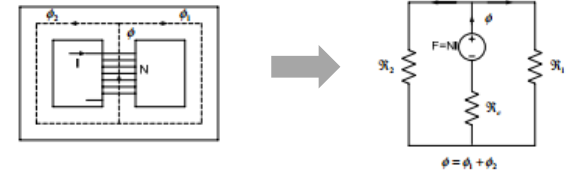
Modelado electromagnético



Elementos Finitos



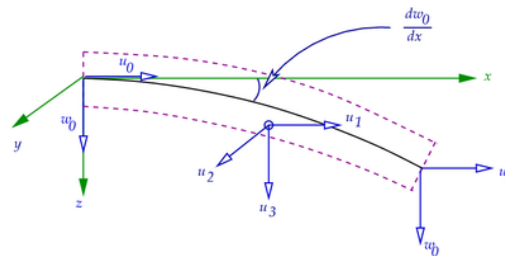
Circuito Magnético Equivalente



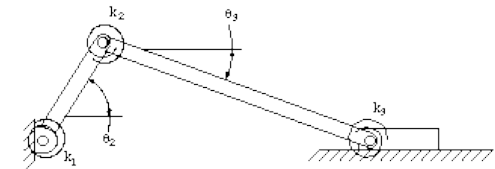
Modelado mecánico



Euler-Bernoulli



Mecanismos de sólido rígido



Y además... Fuerzas de contacto entre sólidos (rebotes)

## 1. Introducción

### 1.3. Estado del arte

Control del movimiento del mecanismo

Algunas propuestas:

- Control basado en reglas expertas
- Estimación no lineal de parámetros
- Control Fuzzy

Problema todavía sin solución:

- Dinámica rápida y no lineal
- Comportamiento estocástico
- Dependencia con la temperatura, desgaste...
- Dificultad para medir o estimar la variable a controlar (posición)





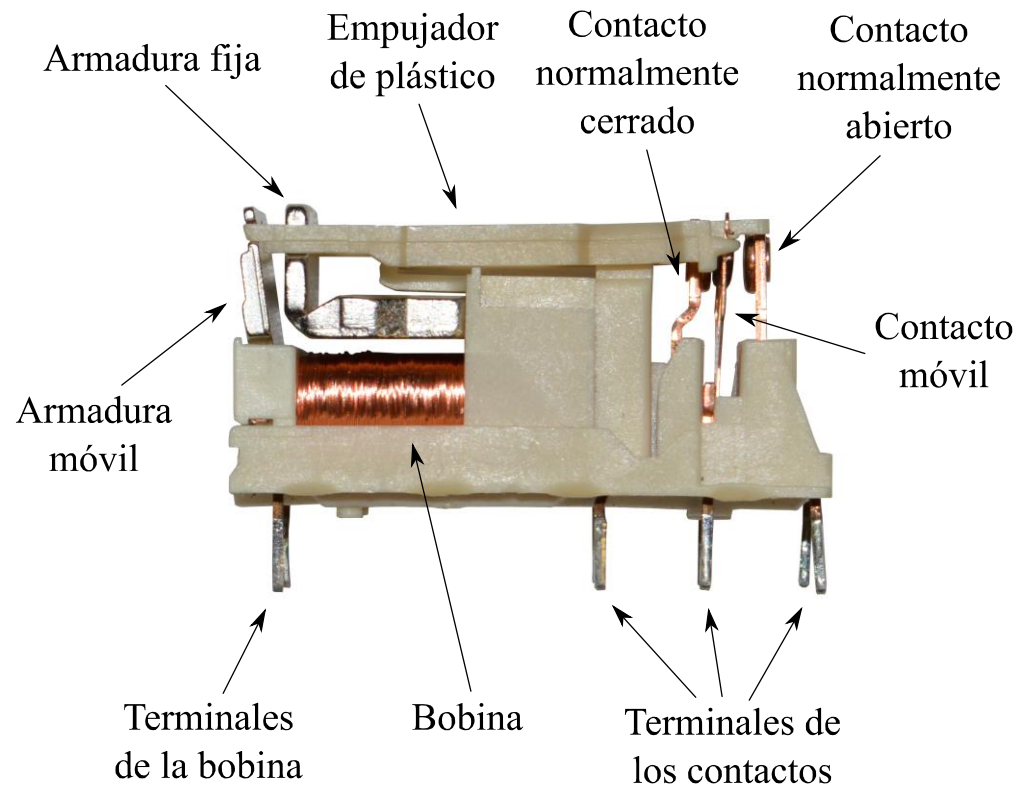
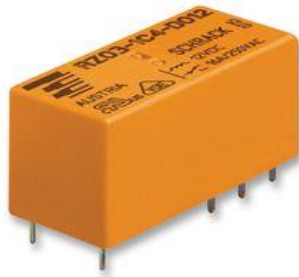


## 2. Modelado

## 2. Modelado

### 2.1. Descripción del sistema

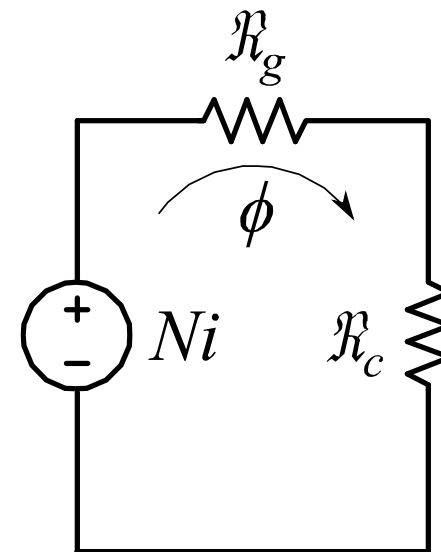
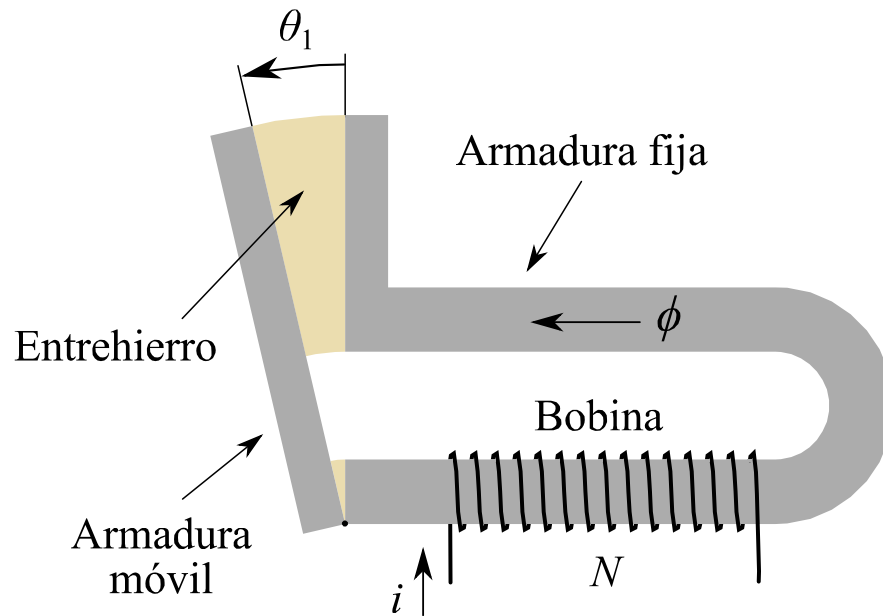
Relé RZ de Tyco Electronics



## 2. Modelado

### 2.2. Modelo electromagnético

Modelado mediante circuito magnético equivalente



## 2. Modelado

### 2.2. Modelo electromagnético

Ecuación del circuito eléctrico

$$v = Ri + N \frac{d\phi}{dt}$$

Ecuación del circuito magnético equivalente

$$Ni = \phi \mathcal{R}$$

## 2. Modelado

### 2.2. Modelo electromagnético

Cálculo de la reluctancia

$$\mathcal{R} = \mathcal{R}_g + \mathcal{R}_c = \frac{r_g \theta_1}{\mu_0 A_g} + \frac{l_c}{c_1 A_c - c_2 |\phi|}$$

Saturación magnética (Froëlich):

$$B_c = \frac{c_1 H_c}{1 + c_2 |H_c|}$$

## 2. Modelado

### 2.2. Modelo electromagnético

Cálculo del par magnético

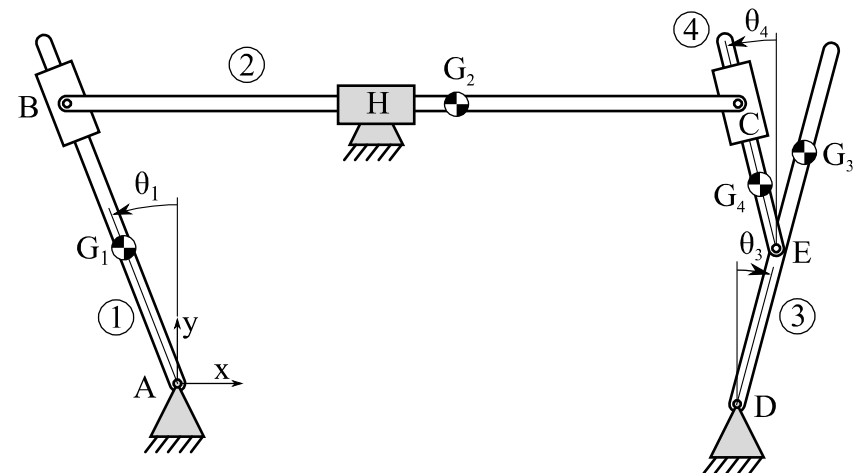
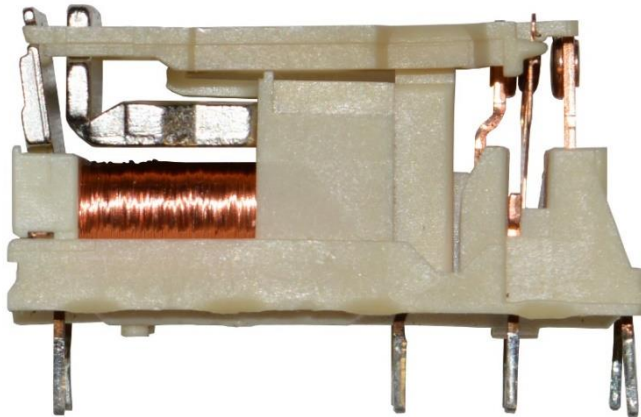
$$W_e = W_{em} + W_m + W_l$$

Trabajo eléctrico	Energía electromagnética	Trabajo mecánico	Pérdidas
----------------------	-----------------------------	---------------------	----------

$$\tau_{mag} = -\frac{1}{2} \phi^2 \frac{r_g}{\mu_0 A_g}$$

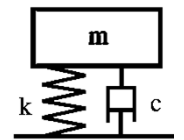
## 2. Modelado

### 2.3. Modelo mecánico



Acciones incluidas:

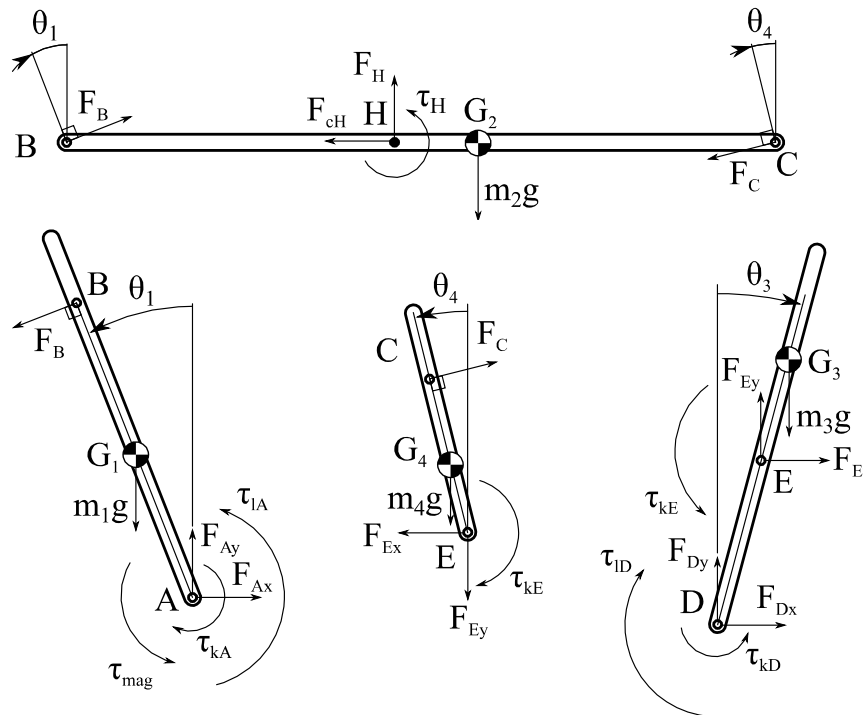
- Par magnético
- Pesos
- Fuerzas elásticas
- Fuerzas de rozamiento
- Límites articulares → Modelo Kelvin-Voigt



## 2. Modelado

### 2.3. Modelo mecánico

Diagramas de sólido libre



Segunda ley de Newton

$$\sum F_x = m \cdot a_x$$

$$\sum F_y = m \cdot a_y$$

$$\sum \tau_z = I_{xy} \cdot \alpha_z$$



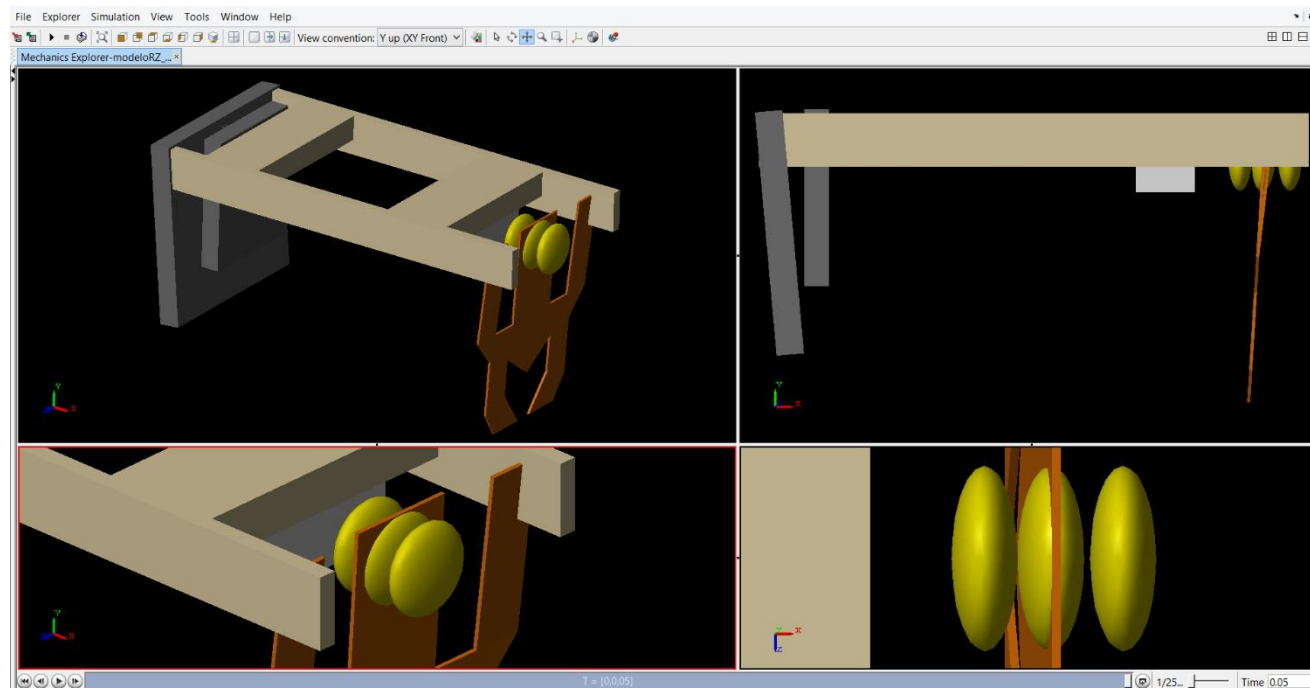


# 3. Validación experimental

## 3. Validación experimental

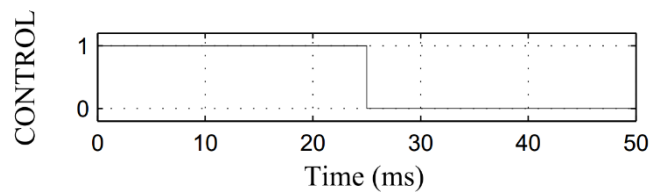
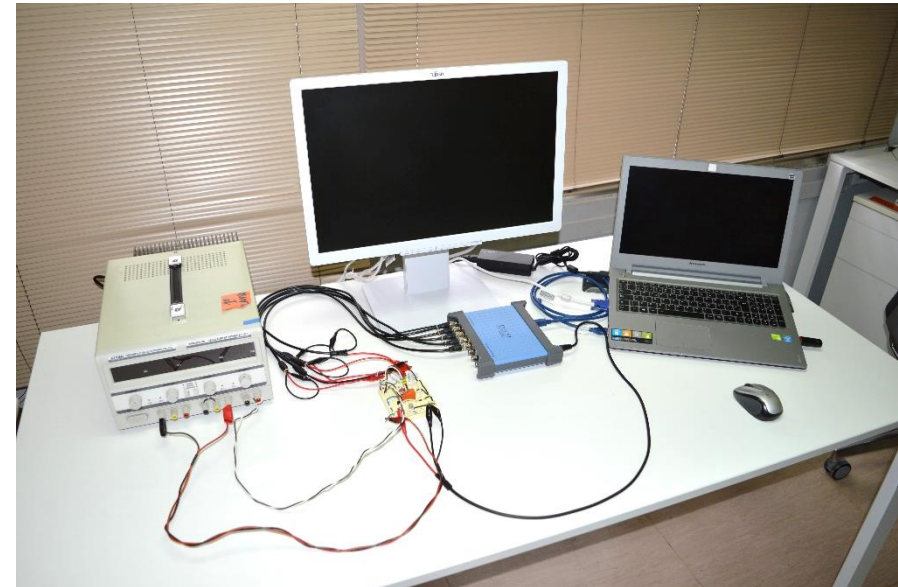
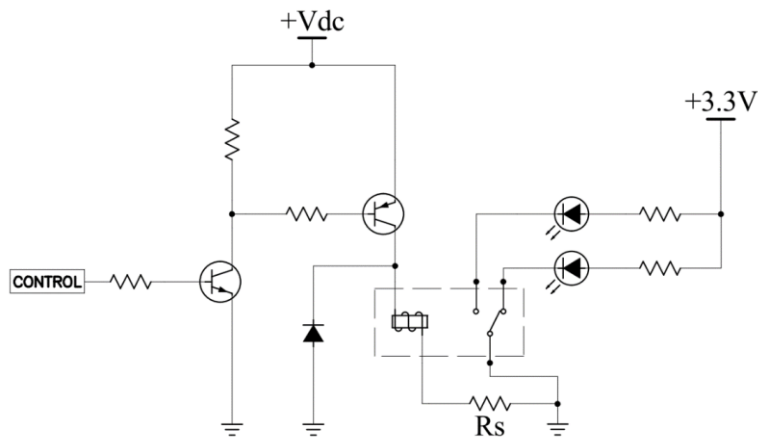
### 3.1. Implementación del modelo

Implementación en MATLAB Simulink - Simmechanics



### 3. Validación experimental

#### 3.2. Montaje experimental



Variables medidas:

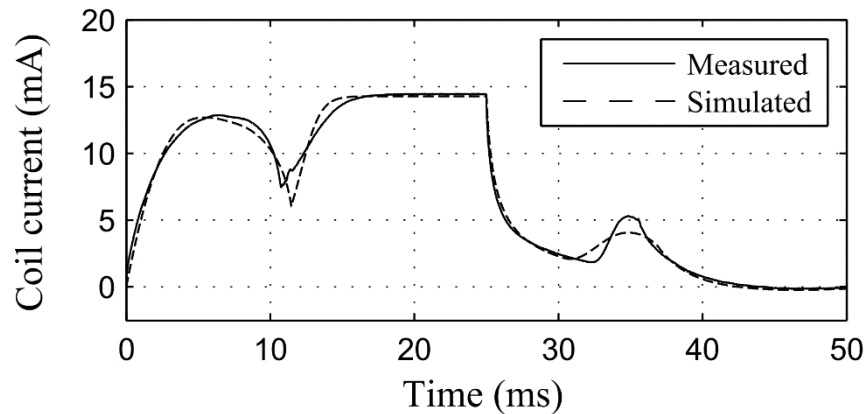
- Tensión
- Corriente
- Contactos (1/0)

### 3. Validación experimental

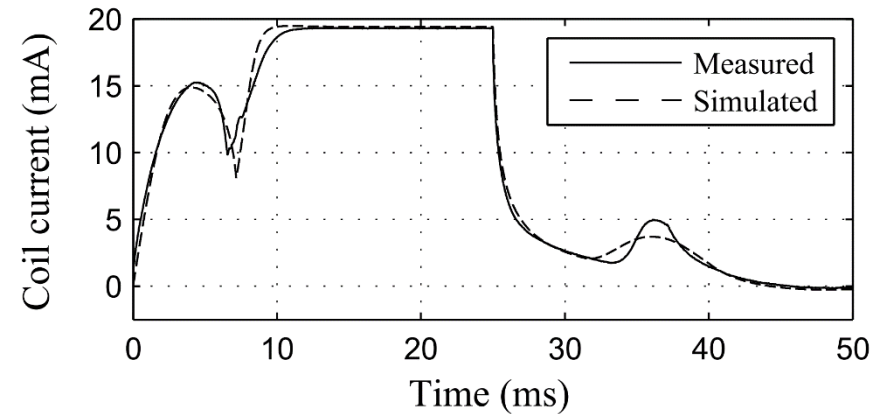
#### 3.3. Resultados

Corriente por la bobina

Alimentación 24 V



Alimentación 30 V

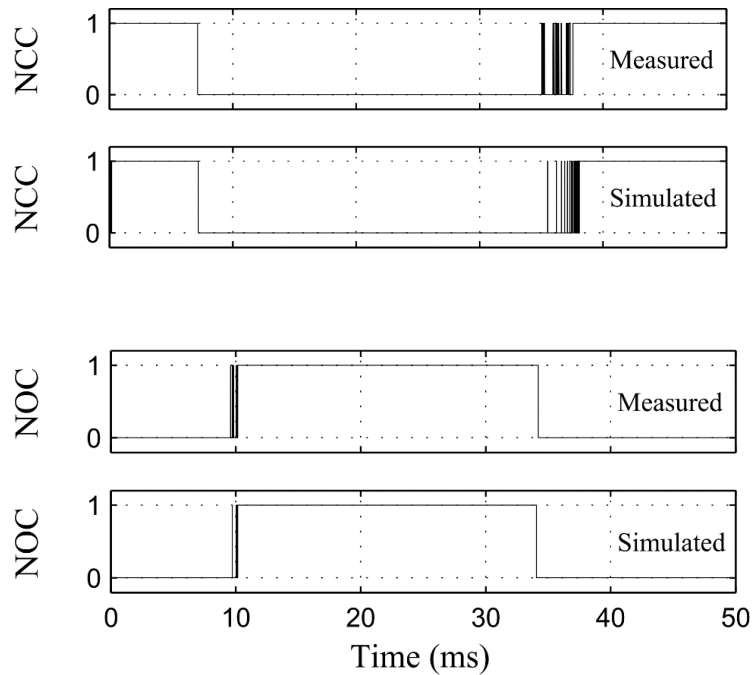


### 3. Validación experimental

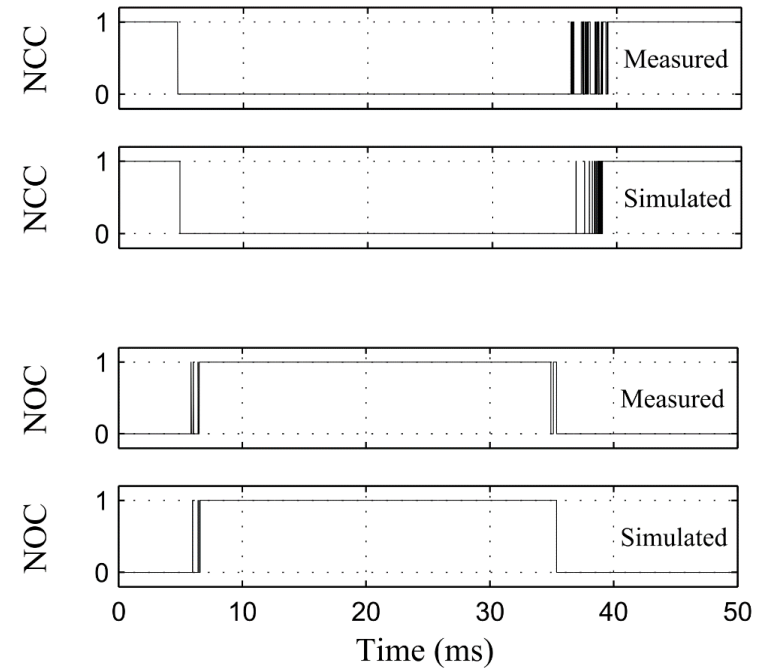
#### 3.3. Resultados

Contactos

Alimentación 24 V



Alimentación 30 V





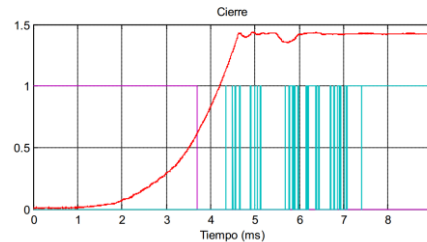
# 4. Control

## 4. Control

### 4.1. Formulación del problema

Reducir rebotes, ruido, tiempo de conmutación → Control del movimiento

- Dificultad para medir la posición (frecuencia, precisión, acceso al punto de medida)



- Dificultad para realizar estimaciones
- Dificultad para controlar incluso teniendo una medida perfecta (analizado en simulación)

→ Controlar la posición no es el único camino para conseguir los objetivos fijados

## 4. Control

### 4.1. Formulación del problema

Problema de optimización dinámica

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{u}(t)} \quad & J = \phi(\mathbf{x}(t_f)), \\ \text{sujeto a:} \quad & \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{F}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)) + \mathbf{d}(t), \quad \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0, \\ & \mathbf{S}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)) \leq \mathbf{0}, \quad \mathbf{T}(\mathbf{x}(t_f)) \leq \mathbf{0}, \end{aligned}$$

Funcionamiento repetitivo



Posibilidad de medir variables

B. Srinivasan, D. Bonvin, E. Visser, and S. Palanki, “Dynamic optimization of batch processes: Ii. role of measurements in handling uncertainty,” *Comput. Chem. Eng.*, vol. 27, no. 1, pp. 27–44, 2003.



**Método Run-to-Run**



## 4. Control

### 4.1. Formulación del problema

Métodos Run to Run

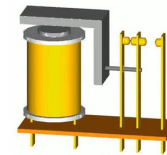
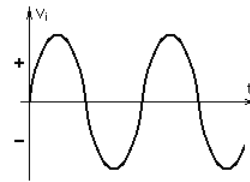
*Variables de decisión*  
iniciales



Construcción de las  
entradas del sistema



Ejecución y registro de  
salidas del sistema



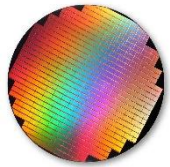
Cálculo de nuevas  
*variables de decisión*

Valoración de la  
ejecución  
*Variables de valoración*



## 4. Control

### 4.2. Control R2R en relés - Particularidades



Fabricación  
silicio



Repetición cíclica de un proceso



Administración de  
medicamentos



Industria  
química



Dispositivos  
electromecánicos



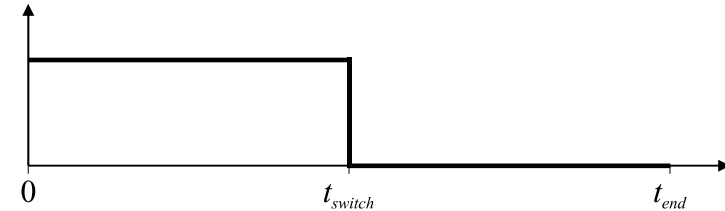
Repetición cíclica de dos procesos:  
Cierre y Apertura

## 4. Control

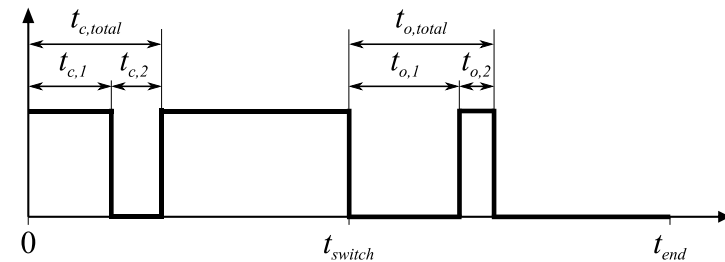
### 4.3. Selección de entradas y salidas

Entradas – Variables de decisión

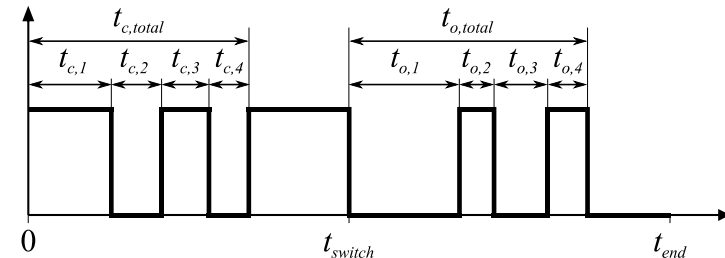
Señal convencional



Señal de activación A



Señal de activación B

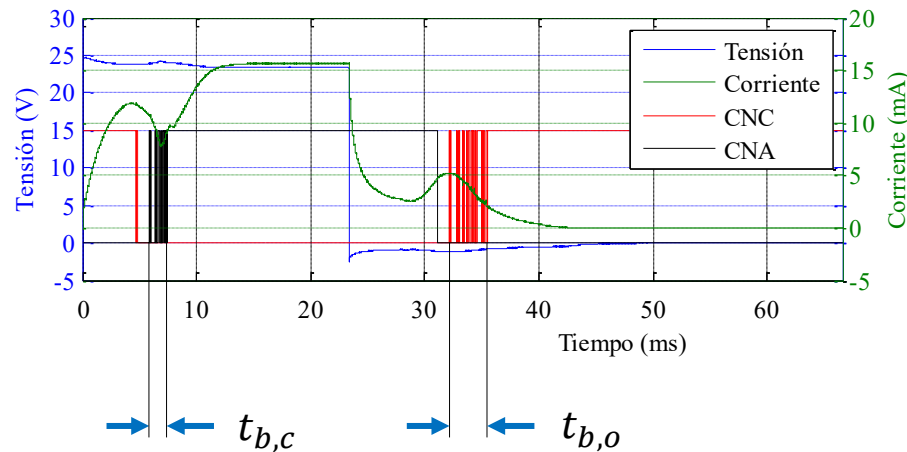


## 4. Control

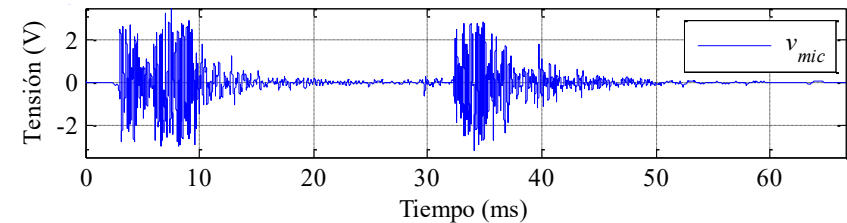
### 4.3. Selección de entradas y salidas

Salidas – Variables de valoración

Tiempo de rebotes



Ruido (micrófono)



$$\rho_c = \int_0^{t_{switch}} v_{mic}^2 dt \quad \rho_o = \int_{t_{switch}}^{t_{end}} v_{mic}^2 dt$$

## 4. Control

### 4.4. Método R2R

Búsqueda de versatilidad

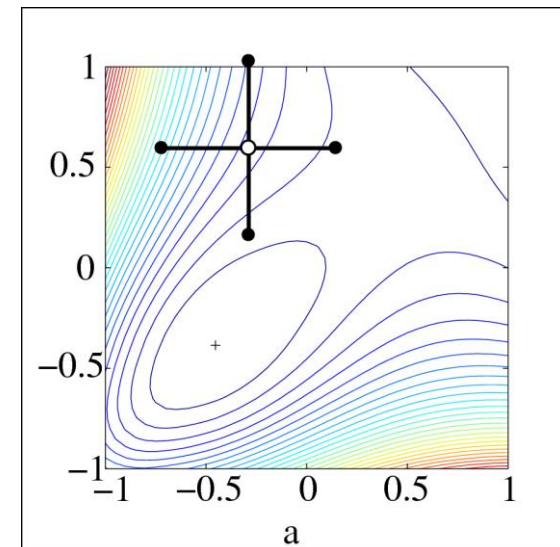
- Distintos modelos de relé



- Tensión de alimentación variable
- Distintos circuitos de protección
- Distintas ondas de activación
- Distintos objetivos → Rebotes, ruido, rapidez...



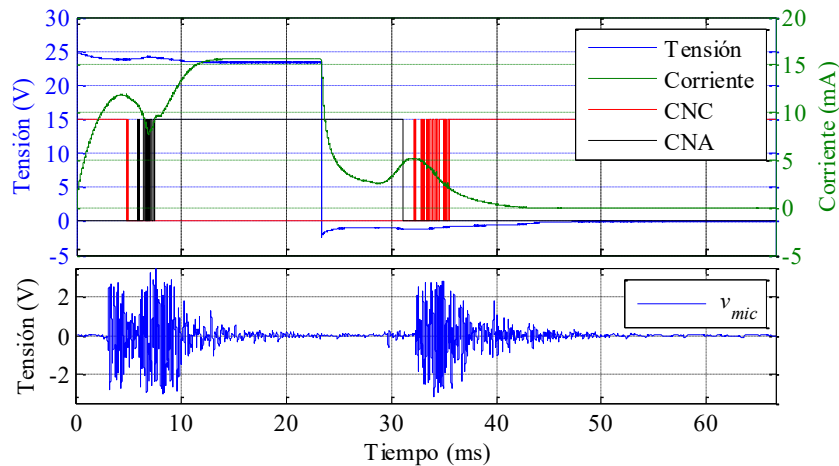
Método R2R no basado en modelo  
Búsqueda directa – *Pattern Search*



## 4. Control

### 4.5. Aplicación sobre el relé RZ

Activación convencional



Reducción 95% de  $t_{b,c}$

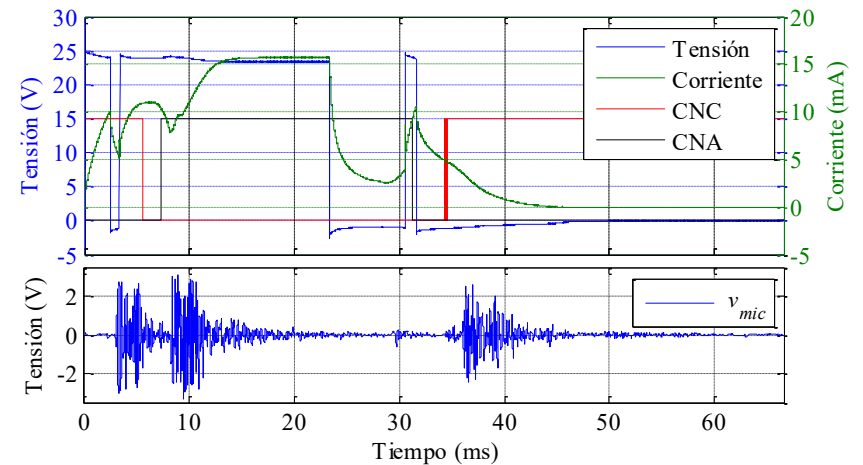
Reducción 91% de  $t_{b,o}$

Búsqueda directa - Ejemplo

Entrada: Señal de activación A

Objetivo: Minimizar rebotes ( $t_{b,c}$ ,  $t_{b,o}$ )




Activación óptima




## 4. Control

### 4.5. Aplicación sobre el relé RZ

Tabla resumen de resultados

		Minimización de rebotes		Minimización del ruido	
		Cierre $t_{b,c}$ (ms)	Apertura $t_{b,o}$ (ms)	Cierre $\rho_c$ (mV <sup>2</sup> s)	Apertura $\rho_o$ (mV <sup>2</sup> s)
<b>Activación</b>					
Convencional		1,456	3,295	$1,635 \cdot 10^{-2}$	$1,088 \cdot 10^{-2}$
Señal A		0,073	0,295	$1,046 \cdot 10^{-2}$	$0,208 \cdot 10^{-2}$
Reducción		<b>94,99 %</b>	<b>91,04 %</b>	<b>33,47 %</b>	<b>80,11 %</b>
Convencional		1,513	3,329	$1,629 \cdot 10^{-2}$	$1,035 \cdot 10^{-2}$
Señal B		0,064	0,108	$0,893 \cdot 10^{-2}$	$0,066 \cdot 10^{-2}$
Reducción		<b>95,79 %</b>	<b>96,75 %</b>	<b>45,18 %</b>	<b>93,63 %</b>

 Buena reducción del ruido

Mayor reducción de rebotes que de ruido

Mejores resultados con la señal de activación B


## 4. Control

### 4.6. Versatilidad de la propuesta


El algoritmo funciona con distintos costes, señales de activación, condiciones de operación...

Aplicación sobre otros modelos de relé

Relé Tyco PBH

	Minimización de rebotes		Minimización del ruido	
	Cierre $t_{b,c}$ (ms)	Apertura $t_{b,o}$ (ms)	Cierre $\rho_c$ (mV <sup>2</sup> s)	Apertura $\rho_o$ (mV <sup>2</sup> s)
Activación				
Convencional	1,943	9,388	$5,276 \cdot 10^{-3}$	$5,926 \cdot 10^{-3}$
Señal A	0,328	0,485	$0,931 \cdot 10^{-3}$	$0,138 \cdot 10^{-3}$
Reducción	<b>83,09 %</b>	<b>94,83 %</b>	<b>82,36 %</b>	<b>97,66 %</b>
Convencional	2,101	8,740	$6,675 \cdot 10^{-3}$	$8,877 \cdot 10^{-3}$
Señal B	0,221	0,126	$1,468 \cdot 10^{-3}$	$0,358 \cdot 10^{-3}$
Reducción	<b>89,47 %</b>	<b>98,56 %</b>	<b>78,00 %</b>	<b>95,97 %</b>

Relé Tyco T9

	Minimización de rebotes		Minimización del ruido	
	Cierre $t_{b,c}$ (ms)	Apertura $t_{b,o}$ (ms)	Cierre $\rho_c$ (mV <sup>2</sup> s)	Apertura $\rho_o$ (mV <sup>2</sup> s)
Activación				
Convencional	0,1681	8,267	$7,878 \cdot 10^{-3}$	$1,163 \cdot 10^{-2}$
Señal A	0,0000	0,667	$5,289 \cdot 10^{-3}$	$0,455 \cdot 10^{-2}$
Reducción	<b>100 %</b>	<b>91,93 %</b>	<b>32,86 %</b>	<b>60,88 %</b>
Convencional	0,1719	8,016	$7,535 \cdot 10^{-3}$	$1,211 \cdot 10^{-2}$
Señal B	0,0000	2,190	$5,414 \cdot 10^{-3}$	$0,394 \cdot 10^{-2}$
Reducción	<b>100 %</b>	<b>72,68 %</b>	<b>28,15 %</b>	<b>67,46 %</b>





# 5. Conclusiones y líneas futuras



## 5. Conclusiones y líneas futuras

### 5.1. Conclusiones - Modelado

- Circuito magnético equivalente con saturación → Bajo coste computacional y buena precisión
- Mecanismo con 2 GdL → Mayor precisión que 1 GdL
- Coste computacional bajo → Optimización de controladores  
→ Análisis de sensibilidad
- Modelo completamente parametrizado → Dependencia con temperatura  
→ Comportamientos estocásticos

## 5. Conclusiones y líneas futuras

### 5.1. Conclusiones - Control

- Nueva aplicación de los métodos Run-to-Run
- Estrategia eficaz y versátil:
  - Distintos modelos de relé
  - Tensión de alimentación variable
  - Distintos circuitos de protección
  - Distintas señales de activación
  - Búsqueda de distintos objetivos → Rebotes, ruido...
- Aprovecha el funcionamiento repetitivo del relé
- Óptimos diferentes para rebotes y ruido → No se pueden minimizar simultáneamente



## 5. Conclusiones y líneas futuras

### 5.2. Méritos

- Artículo científico sobre modelado y control de relés electromecánicos



E. Ramirez-Laboreo, C. Sagues, and S. Llorente, “A new model of electromechanical relays for predicting the motion and electromagnetic dynamics,” in *2015 Ind. Applicat. Soc. Annu. Meet.* IEEE, to appear.

- Dirección de dos Trabajos Fin de Grado

Juan Anzola “Técnicas de sensorización para caracterización y control de dispositivos electromecánicos”

Saúl Nogueras “Modelado, análisis y control de electroválvula de seguridad de encimera de gas”

- Solicitud de patente

“Online optimization of the activation signal of electromechanical relays”

- Y además...

- Artículo científico de modelado térmico
- 12 Comunicados de invención relacionados con hornos eléctricos



## 5. Conclusiones y líneas futuras

### 5.3. Líneas futuras

Línea de investigación de largo recorrido:

- Análisis de métodos Run-to-Run alternativos
- Diseño y aplicación de nuevas señales de activación
- Propuesta de variables de valoración adicionales (Tiempo de conmutación, Desgaste)
- Optimización del diseño de relés electromecánicos
- Análisis estadístico del comportamiento
- Modelado y control de otros dispositivos electromecánicos



Gracias por vuestra atención

**This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License. To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/> or send a letter to Creative Commons, PO Box 1866, Mountain View, CA 94042, USA.**

