

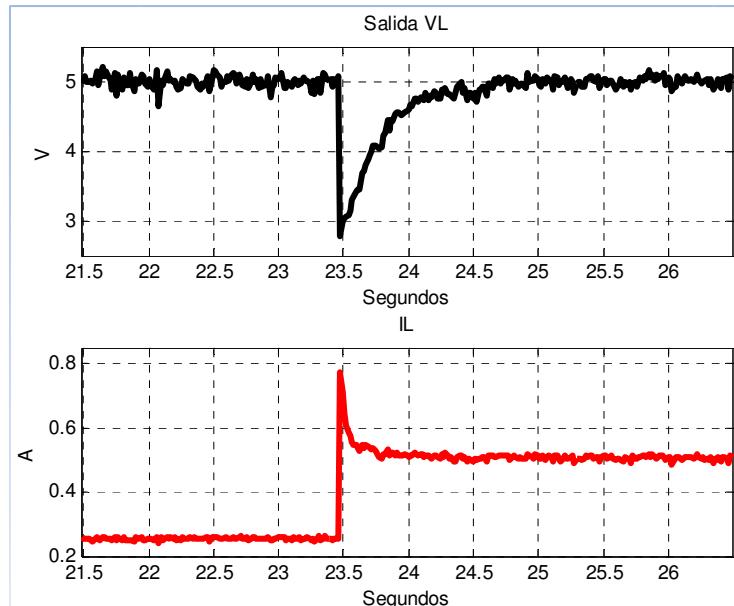


**Universidad**  
Zaragoza

1542

## Trabajo Fin de Grado

### Aplicaciones de Control Adaptativo en Ingeniería Eléctrica



Autor  
**Roberto Velázquez Millán**

Director/es  
**Carlos Sagüés Blázquez**

Escuela de Ingeniería y Arquitectura  
Universidad de Zaragoza  
2014

Alumno: Roberto Velázquez NIA: 327988	Memoria Trabajo de Fin de Grado	Página 1 de 37
	Aplicaciones de Control Adaptativo en Ingeniería Eléctrica	

# APLICACIONES DE CONTROL ADAPTATIVO EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

## RESUMEN

El control adaptativo es ampliamente utilizado en el mundo real como forma conseguir un funcionamiento óptimo en controles industriales. Este tipo de control toma mayor relevancia en casos donde el comportamiento dinámico del sistema a controlar cambia con el tiempo, de forma que el control debe adaptarse a ese cambio con el fin de mantener la especificación requerida.

En la industria la mayoría de los accionamientos son eléctricos (motores, electroválvulas, calentadores, etc...) cualquiera que sea el sistema a controlar. En este trabajo se pretende explorar el uso de control adaptativo en aplicaciones en Ingeniería Eléctrica. Se ha enfocado en el control de una Central Hidroeléctrica debido a que se dispone en laboratorio de una maqueta de este sistema donde poner en práctica los controles desarrollados.

Con la base de las asignaturas de Sistemas Automáticos e Ingeniería de Control, se estudia en distinta bibliografía los esquemas a utilizar para el control de la maqueta de Central Hidroeléctrica. Se tiene en cuenta que se va a utilizar control digital, es decir, el controlador es un dispositivo digital programable (en este caso un ordenador PC).

- Se obtiene un modelo dinámico de la maqueta de la Central Hidroeléctrica a controlar, este modelo es utilizado para el cálculo de los controles y para simulación.
- Se plantea un esquema de control en cascada, es sobre este esquema donde se aplica el control adaptativo.
- Se realiza el estudio y cálculo de diferentes controles adaptativos: Ziegler Nichols en bucle abierto, Método del Relé, Auto Sintonía mediante Algoritmo de Plackett y Predictor de Smith.
- Se realizan simulaciones de estos controles. Se posibilitan distintas opciones en simulación con el fin de poder comparar unos casos con otros y extraer conclusiones.
- Se aplican los controles desarrollados a la maqueta de la Central Hidroeléctrica. Al igual que en simulación, se dispone de opciones al aplicar el control con el fin de comparar unos casos con otros.
- Se obtienen conclusiones sobre los controles utilizados en la maqueta indicando ventajas e inconvenientes. Así mismo se argumenta sobre las posibilidades de implementación real de estos controles en instalaciones industriales reales.
- Se plantean posibles mejoras y formas de continuar el proyecto.

Alumno: Roberto Velázquez NIA: 327988	Memoria Trabajo de Fin de Grado	Página 2 de 37
	Aplicaciones de Control Adaptativo en Ingeniería Eléctrica	

## INDICE

<b>1 Introducción .....</b>	4
1.1 Antecedentes.....	4
1.2 Objetivos y alcance.....	5
1.3 Organización de la memoria.....	5
<b>2 Modelo Dinámico .....</b>	7
2.1 Modelo de Compuerta y Turbina-Generador .....	7
2.2 Esquema de control en cascada .....	8
2.3 Consideraciones sobre las simulaciones.....	10
<b>3 Ziegler-Nichols en bucle abierto.....</b>	11
3.1 Simulación del ensayo .....	11
3.2 Simulación del controlador.....	12
3.3 Implementación del ensayo .....	13
3.2 Implementación del controlador.....	14
<b>4 Método del Relé .....</b>	15
4.1 Simulación del ensayo .....	16
4.1.1 Sin saturación .....	17
4.1.2 Con saturación .....	17
4.2 Simulación del controlador.....	18
4.3 Implementación del ensayo .....	19
4.4 Implementación del controlador .....	20
<b>5 Algoritmo de Plackett.....</b>	21
5.1 Síntesis del controlador Dahlin.....	21
5.2 Auto Sintonía sin ensayo .....	23
5.2.1 Simulación .....	23
5.2.2 Implementación .....	24
5.3 Auto Sintonía con ensayo .....	24
5.3.1 Simulación .....	24
5.3.2 Implementación .....	26
<b>6 Predictor de Smith.....</b>	27
6.1 Simulación .....	27

Alumno: Roberto Velázquez NIA: 327988	Memoria Trabajo de Fin de Grado	Página 3 de 37
	Aplicaciones de Control Adaptativo en Ingeniería Eléctrica	

6.2 Implementación .....	29
<b>7 Conclusiones y posibles mejoras .....</b>	<b>31</b>
7.1 Conclusiones.....	31
7.1.1 Ziegler-Nichols .....	31
7.1.2 Método del Relé .....	31
7.1.3 Algoritmo de Plackett.....	32
7.1.4 Predictor de Smith .....	32
7.2 Posibles mejoras .....	32
<b>Anexo A1: Valores numéricos .....</b>	<b>35</b>
<b>Anexo A2: Contenido CD anexo .....</b>	<b>36</b>

Alumno: Roberto Velázquez NIA: 327988	Memoria Trabajo de Fin de Grado	Página 4 de 37
	Aplicaciones de Control Adaptativo en Ingeniería Eléctrica	

## 1 INTRODUCCIÓN

El Control Adaptativo se encuentra ampliamente desarrollado tanto en la Teoría de Control como su uso en aplicaciones industriales. Como puede consultarse en [1], se dispone hoy día incluso de controladores comerciales de diversos fabricantes que implementan Control Adaptativo en una instalación. En este trabajo se explora el uso de Control Adaptativo en Ingeniería Eléctrica centrándose en la aplicación del control de una Central Hidroeléctrica, ya que se dispone en laboratorio de una maqueta donde poner en práctica los controles diseñados. Se argumenta sobre las ventajas e inconvenientes de los controles aplicados, así como de la dificultad a la hora de una implementación real. A lo largo de este trabajo se profundiza en los conocimientos de Teoría de Control así como en las herramientas de simulación y análisis utilizadas.

### 1.1 Antecedentes

La práctica habitual para el cálculo de un controlador consiste en obtener previamente un modelo dinámico del sistema a controlar (planta). El controlador se testea previamente en simulación y se termina de sintonizar en la implementación real de la instalación. Los resultados obtenidos según este procedimiento son normalmente correctos. Sin embargo el resultado puede no ser suficientemente satisfactorio cuando la planta cambia con el tiempo. Como se describe en [2], un ejemplo de este caso es el control de un robot manipulador donde la masa del objeto a mover cambia con el tiempo.

Control Adaptativo significa que el control cambia con el tiempo adaptándose a las condiciones del sistema a controlar. Bien durante el funcionamiento normal del control, o bien durante un período de tiempo de ensayo se lleva a cabo una identificación de la planta. A partir de esta identificación es posible sintetizar el controlador óptimo a aplicar en ese momento, este concepto es denominado Auto Sintonía (Auto Tuning) del controlador. En [2] está desarrollada esta idea aplicando el conocido como Algoritmo de Plackett.

Como se describe en [2], otra forma de adaptar el controlador con el tiempo es la denominada Planificación de Ganancia. Este método consiste en la medida de ciertas variables de la planta a partir de las cuales se infiere cuál es el controlador óptimo a aplicar. Así, se dispone de varios controladores previamente calculados y se decide cuál se aplica en función de las medidas.

En el método de Control Adaptativo con Modelo de Referencia (Model-Reference Adaptive Control, MRAC) explicado en [2], se utiliza un esquema de control que hace que el sistema se comporte según una dinámica propuesta. Este método presenta mayores problemas de estabilidad que el de Auto Sintonía y se utiliza menos en la práctica.

El denominado Ajuste Empírico no se corresponde con el concepto de adaptación del control a medida que el sistema cambia. Sin embargo gracias a su facilidad de aplicación y los buenos resultados ofrecidos merece ser tenido en cuenta. Los métodos de ajuste empíricos más antiguos son los desarrollados por Ziegler-Nichols y son descritos en [3]. El Ajuste Empírico consiste en realizar un ensayo al sistema sin el controlador en funcionamiento. Con los datos obtenidos en este ensayo se calcula un controlador y se obtiene un modelo de la planta. En el transcurso del ensayo el sistema podría ir más

Alumno: Roberto Velázquez NIA: 327988	Memoria Trabajo de Fin de Grado	Página 5 de 37
	Aplicaciones de Control Adaptativo en Ingeniería Eléctrica	

allá de sus especificaciones máximas, siendo este el principal objeto de atención en la aplicación de un Ajuste Empírico.

En Control Adaptativo toma gran importancia el control digital, donde el control es realizado por un dispositivo digital programable. Hoy en día se dispone de numerosos dispositivos comerciales que pueden soportar la carga computacional necesaria en Control Adaptativo. En este trabajo se utiliza un ordenador PC donde se ha instalado una tarjeta de adquisición de datos para el control de la maqueta de Central Hidroeléctrica. La documentación de dicha tarjeta puede consultarse en [4].

## 1.2 Objetivos y alcance

Los objetivos que se proponen son:

- Estudiar en simulación estrategias de Control Adaptativo y Ajuste Empírico a aplicar en una maqueta de Central Hidroeléctrica.
- Implementar los distintos esquemas de control propuestos de forma digital.
- Realizar pruebas reales en laboratorio y comparar con las simulaciones.

Como banco de pruebas se dispone en laboratorio de una maqueta de Central Hidroeléctrica donde se puede aplicar control digital mediante un ordenador PC.

Para alcanzar los objetivos expuestos se llevan a cabo las siguientes tareas:

- Obtención de un modelo dinámico del sistema y planteamiento de un esquema de control en cascada. Este modelo permite el testeo en simulación de los controladores digitales propuestos, ya sean empíricos o auto sintonizados. Además sirve como referencia en algunas de las estrategias de control adaptativo.
- Desarrollo y simulación de distintas estrategias de Control Adaptativo y Ajuste Empírico:
  - Ziegler-Nichols en bucle abierto.
  - Método del Relé.
  - Algoritmo de Plackett.
  - Predictor de Smith.
- Puesta en práctica en la maqueta de la Central Hidroeléctrica de las estrategias de control propuestas. Comparación con los resultados previos en simulación y argumentación sobre la posibilidad de implementación en una instalación real.
- Se extraen conclusiones finales y se plantean posibles mejoras y continuaciones del trabajo.

## 1.3 Organización de la memoria

En el capítulo 2 se obtiene el modelo dinámico del sistema de Central Hidroeléctrica del que se dispone en la mencionada maqueta. Se plantea un esquema de control en cascada sobre el que aplicar las estrategias de control adaptativo propuestas, se justifica la elección de este esquema de control.

En el capítulo 3 se aplica el Ajuste Empírico de Ziegler-Nichols. Se realiza una introducción teórica, se explican y muestran las simulaciones llevadas a cabo, se muestra la puesta en práctica sobre la maqueta de Central Hidroeléctrica.

Alumno: Roberto Velázquez NIA: 327988	Memoria Trabajo de Fin de Grado	Página 6 de 37
	Aplicaciones de Control Adaptativo en Ingeniería Eléctrica	

El capítulo 4 se dedica a la aplicación del Ajuste Empírico del Método del Relé. Se introduce una descripción teórica, se realizan simulaciones y se aplica sobre la maqueta de Central Hidroeléctrica.

En el capítulo 5 se utiliza el Algoritmo de Plackett como estrategia de control adaptativo. Se introduce teóricamente, se realizan simulaciones y se lleva a cabo la implementación en la maqueta de Central Hidroeléctrica.

El capítulo 6 está dedicado al uso del Predictor de Smith. Se explica la teoría correspondiente a esta estrategia, se realizan simulaciones y se implementa en la maqueta de Central Hidroeléctrica.

En el capítulo 7 se obtienen conclusiones del trabajo realizado, se plantean posibles mejoras y formas de continuar el proyecto.

Los ficheros de código de simulación e implementación en la maqueta de Central Hidroeléctrica se encuentran en el CD anexo, en anexo 2 se describe el contenido de dicho CD.

## 2 MODELO DINÁMICO

### 2.1 Modelo de Compuerta y Turbina-Generador

La maqueta de Central Hidroeléctrica se compone un sistema de accionamiento que deja entrar caudal a la turbina (simulado mediante la tensión de salida de un potenciómetro), del grupo turbina-generador (simulado por dos motores de corriente continua idénticos acoplados, uno funcionando como motor y otro como generador), y de la carga de la línea eléctrica (simulado por bombillas). El objetivo es mantener la tensión de línea en el valor especificado por la consigna, independientemente de la carga. La Fig. 1 muestra el sistema en la maqueta de Central Hidroeléctrica.

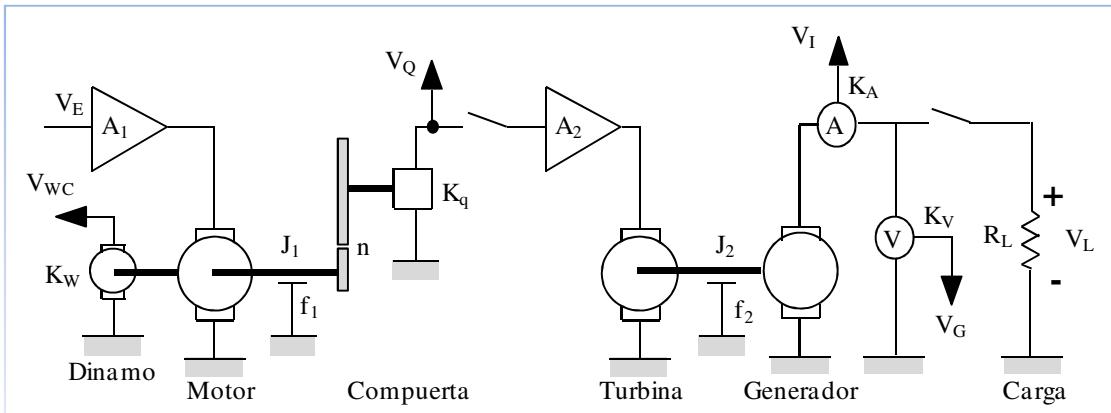


Fig. 1. Maqueta de Central Hidroeléctrica.

El subsistema de accionamiento de la compuerta consta de un amplificador de potencia, un motor de corriente continua controlado por inducido, y un reductor. Se mide la velocidad del motor, mediante una dinamo tacométrica. La compuerta se simula mediante un potenciómetro acoplado al eje lento del reductor, que proporciona la tensión  $V_Q$  proporcional al caudal de agua. Se tiene en cuenta la inductancia del inducido  $L_1$  con lo que se obtiene un sistema de orden 3. El tipo del sistema es uno, puede observarse un integrador en el ángulo girado por la compuerta. La Fig. 2 muestra el diagrama de bloques del subsistema de la compuerta.

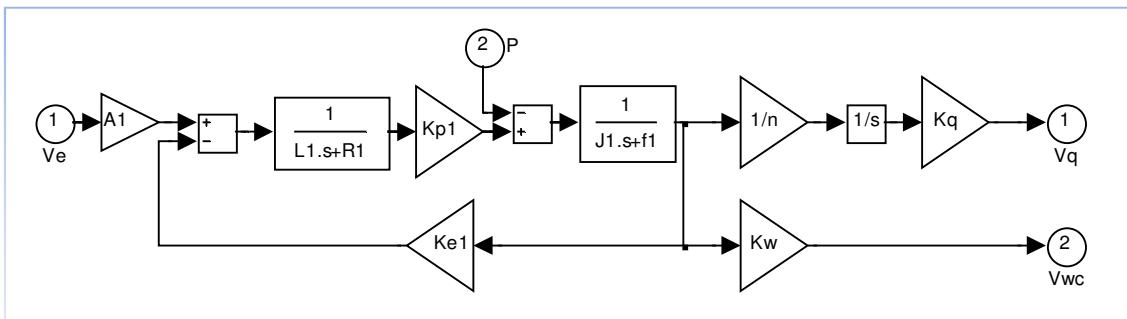


Fig. 2. Diagrama de bloques del subsistema de la compuerta.

La función de transferencia en continuo  $V_Q/V_E$  se expresa a continuación:

$$\frac{V_Q}{V_E}(s) = \frac{7167.7}{(s + 245.1831) \cdot (s + 61.533) \cdot s} \quad (1)$$

La turbina se simula mediante un motor de corriente continua accionado por la tensión  $V_Q$ , amplificada en un amplificador de potencia. La generación de tensión de la central se simula mediante un generador de corriente continua (que es un motor idéntico al anterior, trabajando como generador). La tensión e intensidad de la línea pueden medirse con un voltímetro y amperímetro. Se considera la la resistencia de inducido  $L_2$  en la turbina, obteniéndose un sistema de segundo orden. Para simular la carga de la línea eléctrica se dispone de varias bombillas que pueden conectarse mediante commutadores. Se incluye la resistencia de carga  $R_L$  en el modelo, tomándose para el modelo una carga de dos bombillas. La Fig. 3 muestra el diagrama de bloques del subsistema turbina-generador.

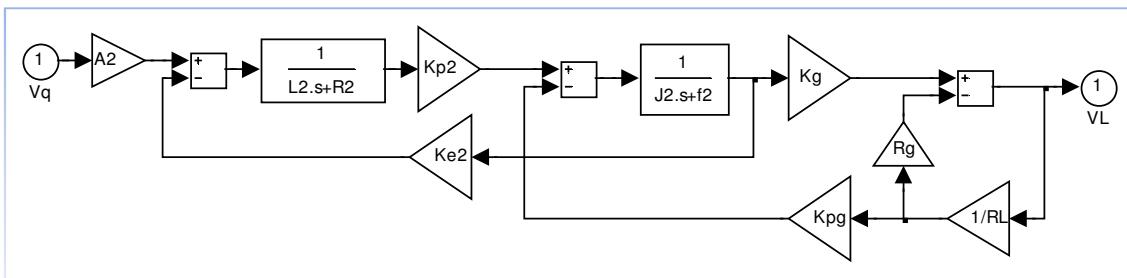


Fig. 3. Diagrama de bloques del subsistema de la turbina-generador.

La función de transferencia en continuo  $V_L/V_Q$  se expresa a continuación:

$$\frac{V_L}{V_Q}(s) = \frac{-1.4211 \cdot 10^{-14} \cdot (s - 1.2702 \cdot 10^{17})}{(s + 67.5525) \cdot (s + 12.5633)} \quad (2)$$

Donde puede apreciarse un sistema de segundo orden de dinámica sobreamortiguada. La ganancia estática es positiva y el cero a la derecha resta fase en alta frecuencia. Los valores numéricos tanto del subsistema de la compuerta como del subsistema turbina-generador pueden encontrarse en los anexos.

## 2.2 Esquema de control en cascada

Siendo  $V_{REF}$  la tensión de consigna a alcanzar en  $V_L$ , se toma la siguiente especificación para el bucle cerrado  $V_L/V_{REF}$ :

$$tr = 0.75 \text{ s}, S.O. = 0\% \quad (3)$$

Se adopta un esquema de control en cascada como puede verse en la Fig. 4. El esquema de control en cascada está descrito en [5].

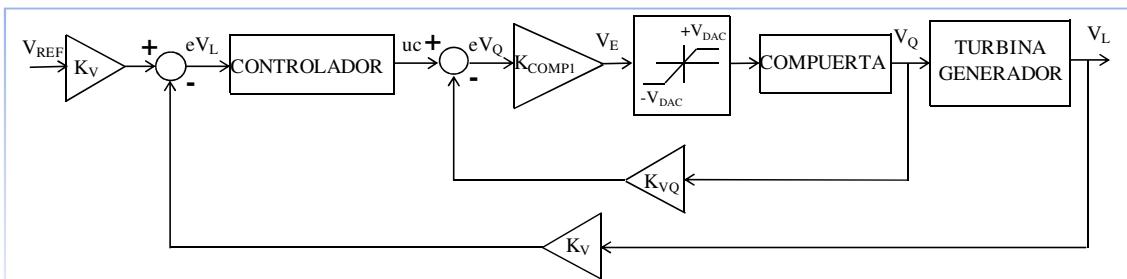


Fig. 4. Esquema de control en cascada.

Alumno: Roberto Velázquez NIA: 327988	Memoria Trabajo de Fin de Grado	Página 9 de 37
	Aplicaciones de Control Adaptativo en Ingeniería Eléctrica	

Se realimentan la tensión de salida  $V_L$  y la posición de la compuerta  $V_Q$ . Es más sencillo realimentar posición de la compuerta con  $V_Q$  que velocidad del motor de la compuerta con  $V_{WC}$ , como puede verse en el diagrama de bloques en el subsistema de la compuerta en Fig. 2. La constante del voltímetro  $K_V$  interviene en el cálculo de los controladores a lo largo de este proyecto.

En la acción aplicada a la compuerta  $V_E$  se tiene saturación en  $\pm V_{DAC}$  debido a la tensión máxima de salida del Conversor Digital a Analógico (DAC). La variable  $uc$  representa la acción de salida del controlador a sintetizar, es en este controlador donde se aplican las estrategias de Control Adaptativo o Ajuste Empírico.

La acción  $V_E$  aplicada a la compuerta es la única salida analógica físicamente utilizada. Puesto que el subsistema de la compuerta es de tipo 1, basta con un controlador proporcional  $K_{COMPI}$  para alcanzar error de posición cero en  $V_Q$ . Se toma un valor de  $K_{COMPI}$  con el que se consigue una dinámica críticamente amortiguada en el bucle cerrado  $V_Q/uc$ , con un tiempo de respuesta  $tr_{BI}$  aproximadamente cinco veces más rápido que  $tr$  en el bucle cerrado  $V_L/V_{REF}$ . Despreciando la dinámica del bucle cerrado  $V_Q/uc$  en la compuerta frente a la dinámica más lenta del bucle cerrado  $V_L/V_{REF}$ , se puede aplicar una reducción de orden manteniendo la ganancia estática  $Fbc_{BI}$  del bucle cerrado de la compuerta:

$$tr_{BI} = 0.1661 \text{ s}, Fbc_{BI} = 1 \quad (4)$$

La Fig. 5 muestra el lugar de las raíces de la compuerta y la ubicación de  $K_{COMPI}$  confirmando dinámica críticamente amortiguada. En [6] se estudia con detalle la dinámica de sistemas y la técnica del lugar de las raíces.

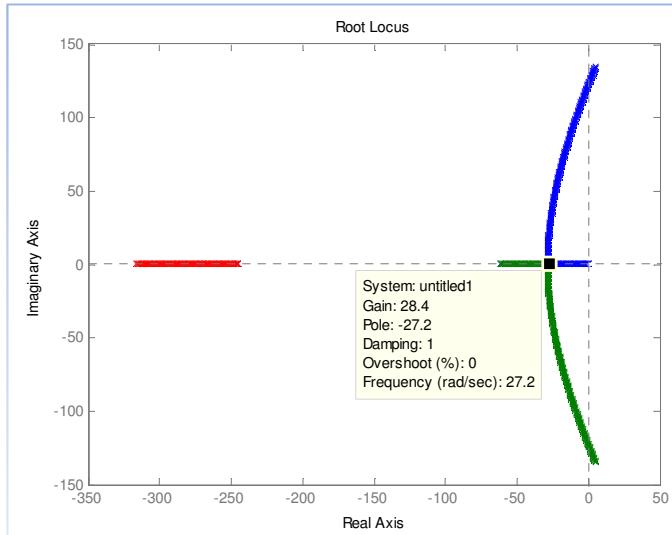


Fig. 5. Lugar de las raíces de la compuerta.

Tanto la acción  $uc$  como la  $V_E$  son resultado del control digital realizado en el ordenador PC, únicamente el controlador proporcional  $K_{COMPI}$  es calculado a priori utilizando el modelo de la compuerta. Debido a la sencillez del controlador proporcional  $K_{COMPI}$  no se ha considerado necesario la aplicación de Control Adaptativo o Ajuste Empírico al control de la posición de la compuerta. En [7] el control digital (o en tiempo discreto) es ampliamente estudiado.

Alumno: Roberto Velázquez NIA: 327988	Memoria Trabajo de Fin de Grado	Página 10 de 37
	Aplicaciones de Control Adaptativo en Ingeniería Eléctrica	

### 2.3 Consideraciones sobre las simulaciones

Se realizan en este trabajo simulaciones tratando de emular las condiciones que se encuentran en la maqueta de Central Hidroeléctrica donde se llevan a la práctica los controles. En cada simulación se configuran específicamente los parámetros relacionados con el objeto de simulación en cuestión. En general en todas las simulaciones es posible configurar los siguientes parámetros:

- Período de muestreo. Puesto que se trata de control en tiempo discreto aplicado desde el ordenador PC. Los controladores y los modelos de plantas utilizados son discretizados en el propio código de simulación.
- Porcentaje de ruido. Para simular el ruido en la medida que se tiene en la maqueta. Se aplica un ruido aleatorio que puede modificar en el porcentaje configurado la medida en un instante de la variable. Se aplica a las medidas de posición de compuerta  $V_Q$  y tensión de salida  $V_L$ . Puede introducirse un ruido del 0 %.
- Filtro. Se configura la frecuencia de cruce de un filtro realizado mediante un sistema de segundo orden de ganancia estática unidad. Este filtro se aplica a la medida de la tensión de salida  $V_L$ . Permite graficar la salida real ruidosa de  $V_L$  y esa misma señal filtrada. Además se configura si la medida de  $V_L$  filtrada es aplicada al control o por el contrario se aplica  $V_L$  no filtrada. No se aplica a la medida de posición de compuerta  $V_Q$ .

Además de anticipar el comportamiento del controlador calculado, la simulación permite comprobar que todo el código a aplicar en la puesta en práctica del control en la maqueta de Central Hidroeléctrica está correcto. Esto incluye código que no está específicamente relacionado con el controlador, como puede ser por ejemplo en las graficas de los resultados.

En la implementación del control en la maqueta de Central Hidroeléctrica se configuran distintos parámetros según la estrategia de control a aplicar. Período de muestreo y filtro se configuran de la misma manera que en simulación.

En las descripciones de los distintos esquemas de control desarrollados en este proyecto se mencionan los nombres de alguna de las variables utilizadas en el código de simulación e implementación en la maqueta. En los ficheros del CD anexo mencionados en anexo 2 se puede encontrar el código desarrollado.

Alumno: Roberto Velázquez NIA: 327988	Memoria Trabajo de Fin de Grado	Página 11 de 37
	Aplicaciones de Control Adaptativo en Ingeniería Eléctrica	

### 3 ZIEGLER-NICHOLS EN BUCLE ABIERTO

Publicadas en 1942, las reglas de Ziegler-Nichols permiten la identificación de un sistema (planta) por medio de su respuesta transitoria a una entrada en escalón. La planta es equiparada a un sistema de primer orden con retraso puro. Por medio de reglas empíricas posibilita el cálculo a priori de un controlador PID estándar no interactivo, este controlador es mejorado por medio de simulación y pruebas en la implementación real (ajuste fino del controlador). El diseñador del control no aplica una especificación temporal como sucede en el cálculo de controlador cuando se dispone de modelo, sino que simplemente consigue con el ajuste fino un comportamiento suficientemente satisfactorio. La planta debe ser llevada por los medios que sean a su punto de operación, sobre el nivel de entrada presente en ese momento y en bucle abierto se aplica un pequeño escalón que provoca en la salida un pequeño cambio (entre el 5% y 10% del valor de la salida en el punto de operación). Se identifican una constante  $K$  que representa la ganancia estática, un tiempo  $T_0$  que representa el retraso puro y un tiempo  $T_P$  que representa el tiempo de propagación. En [3] se encuentra descrito al detalle el ensayo de Ziegler-Nichols en bucle abierto.

#### 3.1 Simulación del ensayo

Se realiza una simulación del ensayo de Ziegler-Nichols en bucle abierto aplicando las siguientes condiciones:

- Período de muestreo 0.015 segundos.
- Frecuencia de cruce del filtro de 5 Hz.
- Ruido en la medida del 2 %.
- Escalón en la acción  $uc$  de un 10 % de la referencia  $V_{REF}$  para  $V_L$ .
- Se realiza con una carga de dos bombillas.

Previamente el sistema es llevado próximo a su punto de operación, es decir,  $V_L$  cercana a  $V_{REF}$ . En este caso la mencionada aproximación se realiza en bucle abierto y aplicando pequeños escalones sucesivos en la acción  $uc$ . La Fig. 6 muestra la simulación del ensayo de Ziegler-Nichols en bucle abierto.

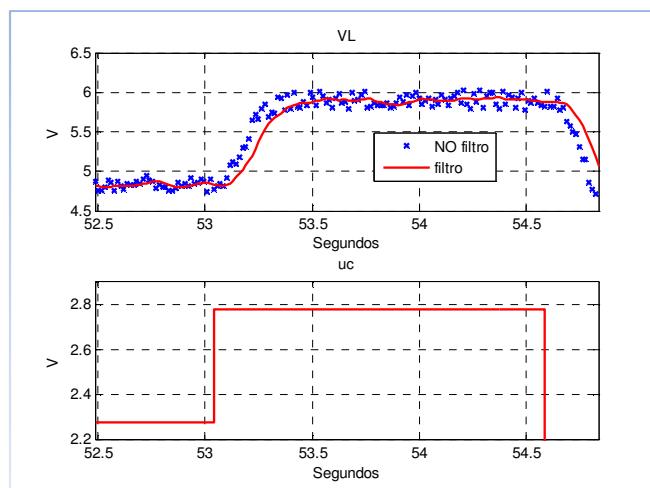


Fig. 6. Simulación del ensayo de Ziegler-Nichols en bucle abierto.

Alumno: Roberto Velázquez NIA: 327988	Memoria Trabajo de Fin de Grado	Página 12 de 37
	Aplicaciones de Control Adaptativo en Ingeniería Eléctrica	

Mediante código se analiza la respuesta transitoria obteniéndose los parámetros  $K$ ,  $T_0$  y  $T_P$  característicos del ensayo. Los tiempos  $T_0$  y  $T_P$  se obtienen a partir de los tiempos  $t_1$  y  $t_2$  en los que la respuesta alcanza el 28.3% (tiempo  $t_1$ ) y 63.2% (tiempo  $t_2$ ) del valor estacionario en la respuesta al escalón:

$$T_P = 1.5 \cdot (t_2 - t_1), T_0 = t_2 - T_P \quad (5)$$

Se procesan las muestras tomadas para la señal  $V_L$  no filtrada y filtrada:

$$V_L \text{ no filtrada: } K = 2.2739, T_0 = 0.0375 \text{ s}, T_P = 0.2025 \text{ s} \quad (6)$$

$$V_L \text{ filtrada: } K = 2.2099, T_0 = 0.12 \text{ s}, T_P = 0.135 \text{ s} \quad (7)$$

Los valores de (6) y (7) pueden cambiar en cada simulación ya que el ruido introducido es aleatorio.

### 3.2 Simulación del controlador

La resultados de (6) y (7) son utilizados para realizar una simulación de un controlador calculado mediante la estimación en bucle abierto de Ziegler-Nichols. Se utiliza  $K$  y  $T_P$  de la expresión filtrada (7), mientras el tiempo de retraso puro  $T_0$  se toma de la expresión sin filtrar (6).

En la simulación se aplica una rampa para alcanzar la tensión de referencia  $V_{REF}$ . Se utiliza un periodo de muestreo de 0.015 segundos, se introduce un ruido de 2 % y el filtro en 5 Hz no se aplica al control. Se simulan maniobras de cambio de carga  $R_L$  para comprobar la respuesta del controlador. Se conmuta entre dos, una y ninguna bombilla conectada.

La estimación en bucle abierto de Ziegler-Nichols resulta en un controlador PID estándar no interactivo en continuo cuya estructura es mostrada en la Fig. 7. Puede apreciarse el término proporcional  $K_P$ , el término integral  $T_I$  y el término derivativo  $T_D$ .

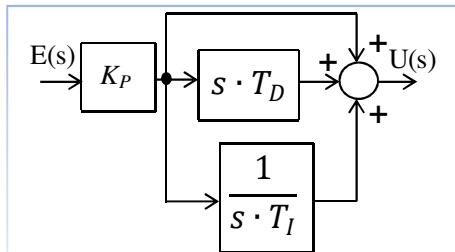


Fig. 7. Controlador PID estándar no interactivo en continuo.

Los términos  $K_P$ ,  $T_I$  y  $T_D$  se calculan de acuerdo a las reglas de Ziegler-Nichols para la estimación en bucle abierto. Se realiza un ajuste fino con una constante empírica  $KXzn$  de reducción en el término proporcional y en el derivativo. La constante del voltímetro  $K_V$  interviene en la formulación, se muestran los valores obtenidos en la simulación estudiada:

$$KXzn = 4 \quad (8)$$

$$K_P = \frac{1.2 \cdot T_P}{K \cdot T_0 \cdot K_V \cdot KXzn} = 0.9774 \quad (9)$$

$$T_I = 2 \cdot T_0 = 0.075 \text{ segundos} \quad (10)$$

$$T_D = \frac{T_0}{2 \cdot KXzn} = 0.1147 \text{ segundos} \quad (11)$$

Este controlador es pasado a discreto por el método *tustin* o aproximación trapezoidal obteniendo la función de transferencia en  $z$   $R(z) = U(z)/E(z)$ , siendo  $T_m$  el periodo de muestreo. En dicha función de

Alumno: Roberto Velázquez NIA: 327988	Memoria Trabajo de Fin de Grado	Página 13 de 37
	Aplicaciones de Control Adaptativo en Ingeniería Eléctrica	

transferencia intervienen los coeficientes  $K_1$ ,  $K_2$  y  $K_3$  que se obtienen analíticamente a partir de los  $K_P$ ,  $T_I$  y  $T_D$ :

$$R(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = \frac{K_1 + K_2 \cdot z^{-1} + K_3 \cdot z^{-2}}{(1 - z^{-1})} \quad (12)$$

$$K_1 = K_P \cdot \left(1 + \frac{T_m}{2 \cdot T_I} + \frac{T_D}{T_m}\right) \quad (13)$$

$$K_2 = -K_P \cdot \left(1 - \frac{T_m}{2 \cdot T_I} + \frac{2 \cdot T_D}{T_m}\right) \quad (14)$$

$$K_3 = \frac{K_P \cdot T_D}{T_m} \quad (15)$$

Realizando la transformada inversa sobre la expresión (12), esta queda formulada como ecuación en diferencias. Se aprecia la participación del error actual  $e_K$ . La expresión (16) podría ser utilizada directamente por un controlador digital:

$$u_K = u_{K-1} + K_1 \cdot e_K + K_2 \cdot e_{K-1} + K_3 \cdot e_{K-2} \quad (16)$$

La Fig. 8 muestra el resultado de la simulación del control Ziegler-Nichols.  $V_{Lf}$  es la salida  $V_L$  filtrada.

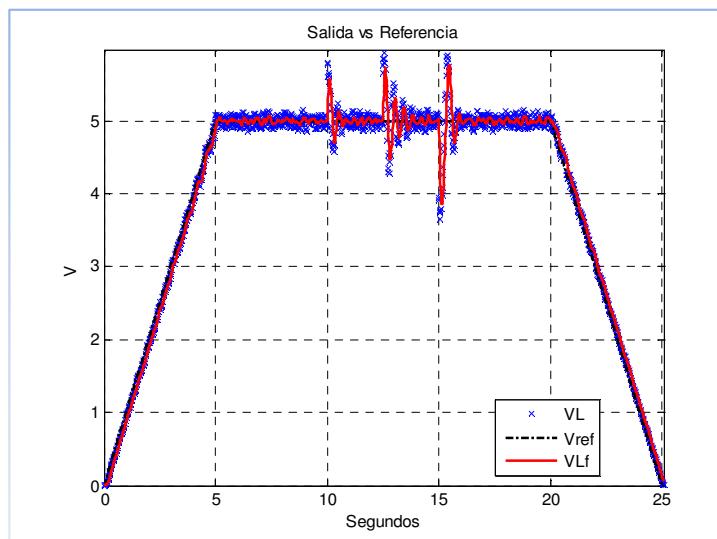


Fig. 8. Simulación del control Ziegler-Nichols.

### 3.3 Implementación del ensayo

Se lleva a cabo el ensayo de Ziegler-Nichols en la maqueta de la Central Hidroeléctrica. Se procede aplicando las mismas condiciones utilizadas en la simulación, no se introduce ningún ruido en la medida. Como en simulación, la aproximación al punto de operación se consigue aplicando pequeños escalones sucesivos. La Fig. 9 muestra el ensayo de Ziegler-Nichols en bucle abierto llevado a cabo en la maqueta de Central Hidroeléctrica.

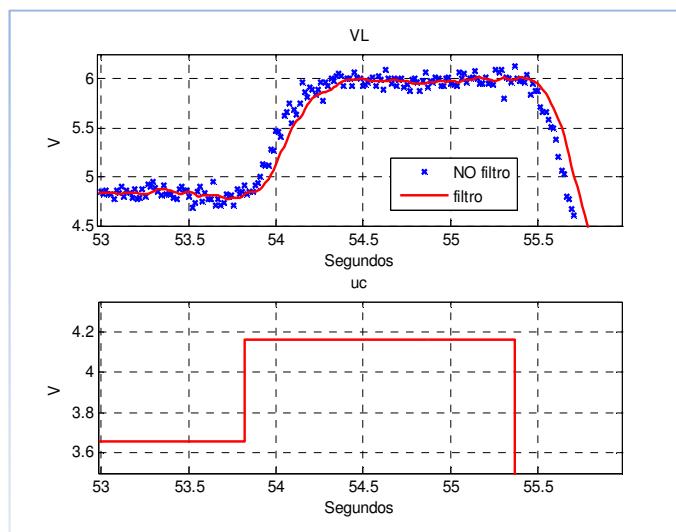


Fig. 9. Implementación del ensayo Ziegler-Nichols en bucle abierto.

Se obtienen los siguientes resultados con  $V_L$  no filtrada y filtrada:

$$V_L \text{ no filtrada: } K = 2.1094, T_0 = 0.1125 \text{ s}, T_P = 0.1575 \text{ s} \quad (17)$$

$$V_L \text{ filtrada: } K = 2.3309, T_0 = 0.12 \text{ s}, T_P = 0.18 \text{ s} \quad (18)$$

### 3.2 Implementación del controlador

Los resultados de (17) y (18) son utilizados en la implementación de un controlador calculado mediante la estimación en bucle abierto de Ziegler-Nichols. Se utiliza  $K$  y  $T_P$  de la expresión filtrada (18), mientras el tiempo de retraso puro  $T_0$  se toma de la expresión sin filtrar (17). Se aplican las mismas consideraciones que en simulación. Se realizan maniobras en la conexión de las bombillas que son reconocibles en la Fig. 10 por la corriente  $I_L$  consumida, con dos bombillas, una y ninguna.

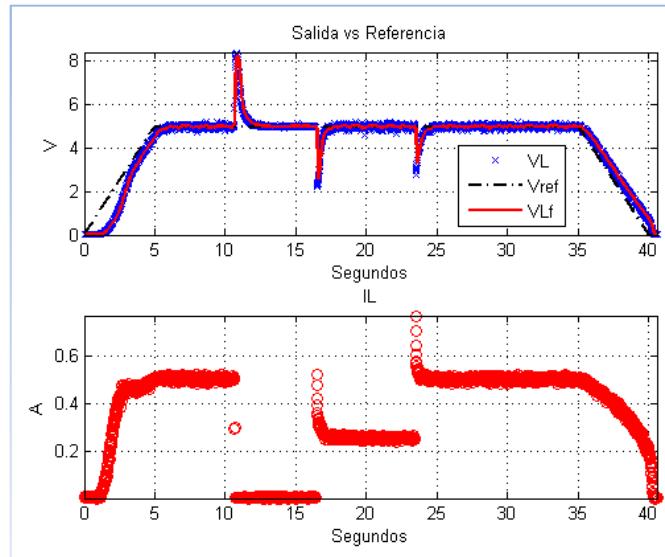


Fig. 10. Implementación del control Ziegler-Nichols.

Se puede comprobar un funcionamiento satisfactorio. Aplicando el filtro de 5 Hz al control se comprueba igualmente un funcionamiento correcto, no es así sin embargo aplicando un filtro de 0.5 Hz.

Alumno: Roberto Velázquez NIA: 327988	Memoria Trabajo de Fin de Grado	Página 15 de 37
	Aplicaciones de Control Adaptativo en Ingeniería Eléctrica	

## 4 MÉTODO DEL RELÉ

El Método del Relé es una forma de Ajuste Empírico, es decir, se realiza un ensayo sobre la planta una vez ésta ha alcanzado su punto de funcionamiento. Permite caracterizar la ganancia y frecuencia a la que la planta se hace críticamente estable. La diferencia y ventaja sobre otro método de Ajuste Empírico conocido como Estimación en Bucle Cerrado es que en el Método del Relé la acción está siempre saturada por el relé, esto es más seguro cuando se intenta identificar la dinámica en una instalación real. En el Método del Relé se hace oscilar al sistema de una forma más controlada gracias a la saturación de la acción en el relé. El mencionado método se aplica en bucle cerrado y se asume que la acción aplicada por el relé es una onda cuadrada al 50 % y bipolar (normalmente con un nivel de continua). De esta aproximación puede obtenerse la expresión de la ganancia que llevaría a oscilar críticamente a la planta:

$$K_{RELE} = \frac{4 \cdot d}{H \cdot a \cdot \pi} \quad (19)$$

Donde  $d$  es la acción saturada del relé,  $a$  la amplitud de la oscilación en la salida del sistema y  $H$  la realimentación en la medida de la salida del sistema (la constante del voltímetro  $K_V$  en el caso de la maqueta de Central Hidroeléctrica). En este ensayo se deben medir la amplitud  $a$  y la frecuencia  $f_U$  de la oscilación, además de conocer la saturación  $d$  en el relé. Conociendo además la ganancia estática  $K$  del ensayo de Ziegler-Nichols en bucle abierto, existen expresiones empíricas que permiten caracterizar la planta como se haría en este último, es decir, calcular los  $T_0$  y  $T_P$  referidos en Ziegler-Nichols en bucle abierto. En [3] puede hallarse un estudio detallado del Método del Relé.

A partir del modelo dinámico obtenido en el capítulo 2, se puede calcular teóricamente la ganancia y frecuencia a la que el sistema se hace críticamente estable. Según el esquema de control en cascada en Fig. 4, se representa en Fig. 11 el lugar de las raíces del bucle abierto desde la acción de control  $uc$  en adelante. Como puede verse en Fig. 4, este bucle abierto contiene el bucle cerrado de control proporcional  $K_{COMPI}$  de la compuerta, el subsistema de la turbina-generador y la constante del voltímetro  $K_V$ .

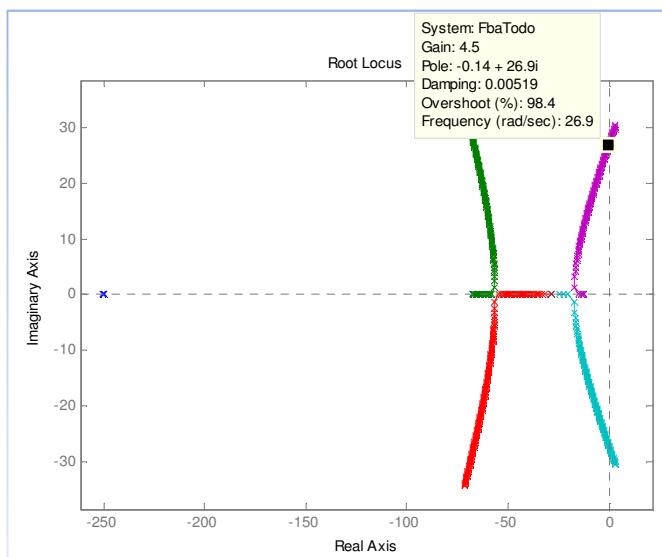


Fig. 11. Lugar de las raíces del sistema.

Alumno: Roberto Velázquez NIA: 327988	Memoria Trabajo de Fin de Grado	Página 16 de 37
	Aplicaciones de Control Adaptativo en Ingeniería Eléctrica	

Donde se aprecia que el sistema se hace críticamente estable con una  $K_{RELE} = 4.5$  a una pulsación  $w_U = 27 \text{ rad/s}$  ( $f_U = 4.3 \text{ Hz}$ ). En la Fig. 12 se representa en un diagrama de Bode el mencionado bucle abierto con una ganancia de 4.5, se observa efectivamente cómo en 4.3 Hz el Margen de Fase es cero. En [8] queda ampliamente explicado la representación e interpretación de los Diagramas de Bode.

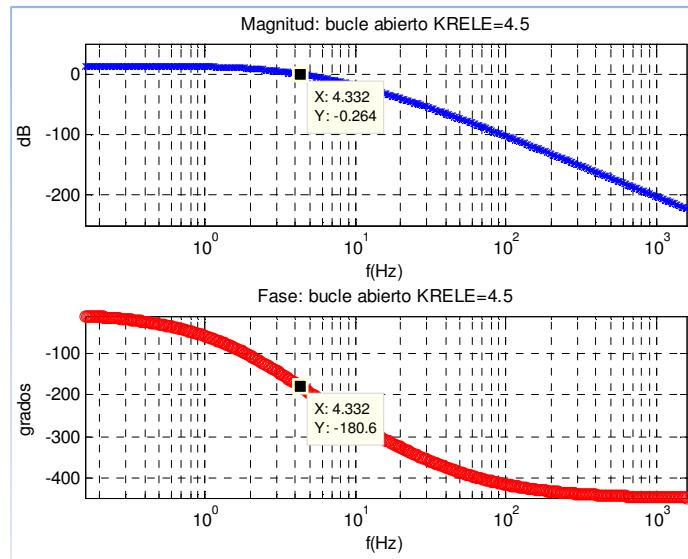


Fig. 12. Diagrama de Bode del sistema.

Los resultados a esperar en la simulación y puesta en práctica del ensayo del Método del Relé son:

$$\text{lugar de las raíces: } f_U = 4.3 \text{ Hz}, K_{RELE} = 4.5 \quad (20)$$

#### 4.1 Simulación del ensayo

El ensayo del Método del Relé se ha realizado de forma que se lleva el sistema a su punto de operación por medio de un controlador PID previamente calculado. Una vez en su punto de operación se sustituye el regulador PID por un relé donde se ha configurado la saturación  $d$  de la acción. Repitiendo el ensayo, se debe encontrar el valor de saturación  $d$  del relé que hace que la salida  $V_L$  oscile. Además, se debe incrementar la saturación  $d$  hasta causar en la acción de salida del relé  $uc$  una señal parecida a una onda cuadrada, ya que la expresión (19) está basada en la suposición de que la salida del relé  $uc$  puede aproximarse a su primer armónico. El controlador PID utilizado para llevar el sistema a consigna se calcula en discreto mediante el método conocido como Dahlin, en este trabajo esto es explicado en el capítulo 5.

Una vez retirado el PID y conectado el relé, la referencia  $V_{REF}$  alcanzada se sigue manteniendo. Como se puede ver en la Fig. 4, de esta forma se calcula el error  $eV_L$ :

$$eV_L = V_{REF} \cdot K_V - V_L \cdot K_V \quad (21)$$

En la primera muestra en la que se aplica el relé se añade un delta unitario a la referencia, esta es la forma teórica en la que un sistema críticamente estable empieza a oscilar.

Alumno: Roberto Velázquez NIA: 327988	Memoria Trabajo de Fin de Grado	Página 17 de 37
	Aplicaciones de Control Adaptativo en Ingeniería Eléctrica	

#### 4.1.1 Sin saturación

En la Fig. 4 se tiene una saturación  $\pm V_{DAC}$  en la acción  $V_E$  de entrada a la compuerta. Esta saturación  $\pm V_{DAC}$  limita la posición de la compuerta  $V_Q$ , que a su vez limita la tensión de salida  $V_L$ . Conviene hacer notar que ni la posición de la compuerta  $V_Q$  ni la tensión de salida  $V_L$  pueden ser negativas.

Se realiza una simulación eliminando la saturación  $\pm V_{DAC}$ , con el fin de comprobar que los resultados obtenidos se acercan a los obtenidos previamente con la técnica del lugar de las raíces en (20).

Las condiciones aplicadas a la simulación son:

- Periodo de muestreo 0.015 segundos.
- Frecuencia de cruce del filtro de 5 Hz. Permite identificar más fácilmente  $f_U$ .
- Ruido en la medida del 0 %. No se introduce ruido.
- Se realiza con una carga de dos bombillas.
- Saturación del relé  $d = 17$ . Se sube este valor hasta observar una onda cuadrada en  $uc$ .

Se obtiene la oscilación en la salida mostrada en la Fig. 13. En simulación, la salida  $V_L$  ha llegado a hacerse menor que cero.

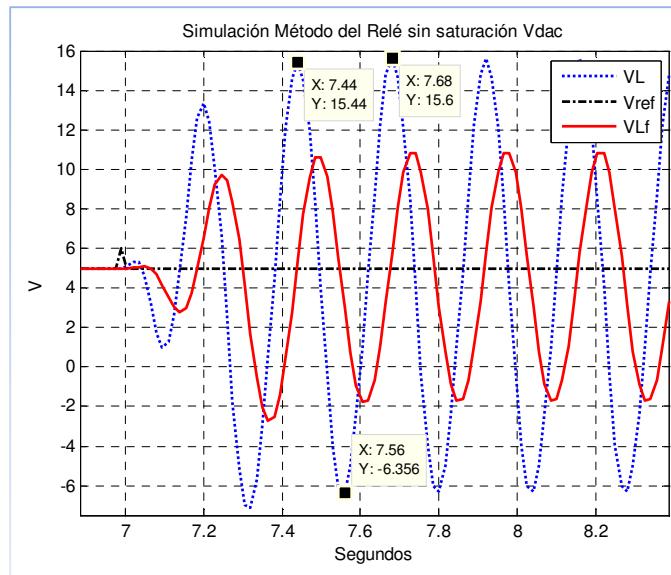


Fig. 13. Simulación del Método del Relé sin saturación.

En la Fig. 13 puede medirse la frecuencia de oscilación  $f_U$  y amplitud de oscilación  $a$ , utilizando (19) se obtiene la ganancia  $K_{RELE}$ :

$$NO \text{ saturación } \pm V_{DAC}: f_U = 4.16 \text{ Hz}, a = 10.9 \text{ V}, K_{RELE} = 3.97 \quad (22)$$

Los resultados son bastante similares a los obtenidos por la técnica del lugar de las raíces en (20), lo que da una idea de la exactitud del modelo utilizado en simulación

#### 4.1.2 Con saturación

Se realiza una simulación del Método del Relé teniendo en cuenta la saturación  $\pm V_{DAC}$  en la acción  $V_E$  de entrada a la compuerta. Esta saturación existe realmente en la maqueta de Central Hidroeléctrica. Los resultados obtenidos en esta simulación son los que se pueden esperar en la implementación del ensayo del Método del Relé en la mencionada maqueta.

Alumno: Roberto Velázquez NIA: 327988	Memoria Trabajo de Fin de Grado	Página 18 de 37
	Aplicaciones de Control Adaptativo en Ingeniería Eléctrica	

Las condiciones aplicadas a la simulación son:

- Idénticas a simulación sin saturación.
- Saturación del relé  $d = 3$ . Se sube este valor hasta observar una onda cuadrada en  $u_C$ .

La saturación en la acción  $V_E$  limita la oscilación de la posición de la compuerta  $V_Q$ , y ésta a la vez limita la de la salida  $V_L$ . Se observa que aunque se aumente la saturación  $d$  en el relé, la amplitud  $a$  de la oscilación en la salida  $V_L$  no se ve incrementada. La Fig. 14 muestra la oscilación de la salida  $V_L$ .

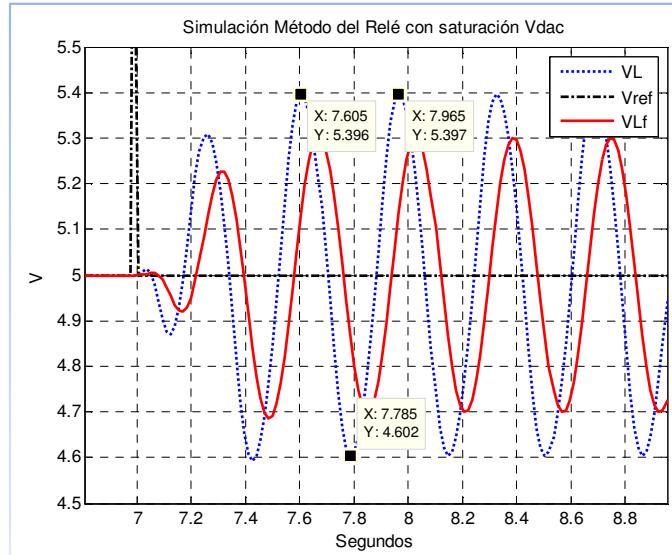


Fig. 14. Simulación del Método del Relé con saturación.

En la Fig. 14 puede medirse la frecuencia de oscilación  $f_U$  y amplitud de la oscilación  $a$ , utilizando (19) se obtiene la ganancia  $K_{RELE}$ . Los resultados son diferentes a los obtenidos sin saturación en (22):

$$\text{saturación } \pm V_{DAC}: f_U = 2.77 \text{ Hz}, a = 0.397 \text{ V}, K_{RELE} = 19.24 \quad (23)$$

## 4.2 Simulación del controlador

Se realiza una simulación utilizando los resultados del ensayo del Método del Relé sin saturación en  $\pm V_{DAC}$  obtenidos en (22). El controlador es un PID estándar no interactivo y las expresiones utilizadas para obtener el controlador a partir de (22) se pueden consultar en [3]. Para realizar el ajuste fino se aplica una reducción por cuatro del término proporcional y del derivativo mediante la constante  $KXbc$ :

$$KXbc = 4 \quad (24)$$

$$K_P = \frac{0.6 \cdot K_{RELE}}{KXbc} = 0.5957 \quad (25)$$

$$T_I = \frac{1}{f_U \cdot 2} = 0.12 \text{ segundos} \quad (26)$$

$$T_D = \frac{1}{f_U \cdot 8 \cdot KXbc} = 0.0075 \text{ segundos} \quad (27)$$

Este controlador es pasado a discreto por el método *tustin* o aproximación trapezoidal. Se utilizan las mismas expresiones mostradas en (12), (13), (14) y (15), resultando en la ecuación en diferencias de (16).

La Fig. 15 muestra el resultado de la simulación. Se aplica una rampa para alcanzar la tensión de referencia  $V_{REF}$ . El periodo de muestreo es de 0.015 segundos, se introduce un ruido de 2 % y el filtro en 5

Alumno: Roberto Velázquez NIA: 327988	Memoria Trabajo de Fin de Grado	Página 19 de 37
	Aplicaciones de Control Adaptativo en Ingeniería Eléctrica	

Hz no se aplica al control. Se simulan maniobras de cambio de carga  $R_L$  para testear la respuesta del controlador.

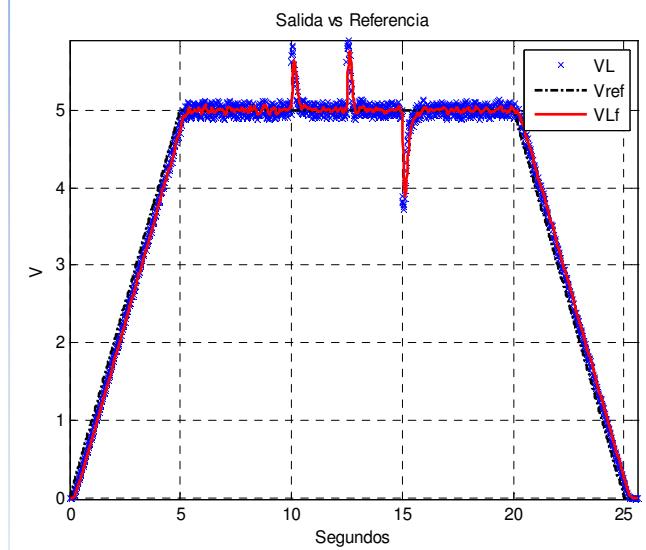


Fig. 15. Simulación del control Método del Relé, NO saturación  $\pm V_{DAC}$ .

Se realiza una simulación en idénticas condiciones pero aplicando el controlador calculado a partir de los resultados de la simulación con saturación en  $\pm V_{DAC}$  obtenidos en (23). Aunque finalmente alcanza consigna existe mucha sobre oscilación en la salida  $V_L$  con acciones  $V_E$  y  $V_Q$  que cambian bruscamente.

#### 4.3 Implementación del ensayo

En la implementación del ensayo del Método del Relé en la maqueta de Central Hidroeléctrica se aplican las siguientes condiciones:

- Idénticas a simulación con saturación. El ruido es el propio de las medidas de  $V_L$  y  $V_Q$ . Se utiliza un PID para alcanzar consigna, momento en el que se reemplaza por el relé.
- Saturación del relé  $d = 4$ . Se sube este valor hasta observar una onda cuadrada en  $uc$ .

El resultado del ensayo se muestra en la Fig. 16.

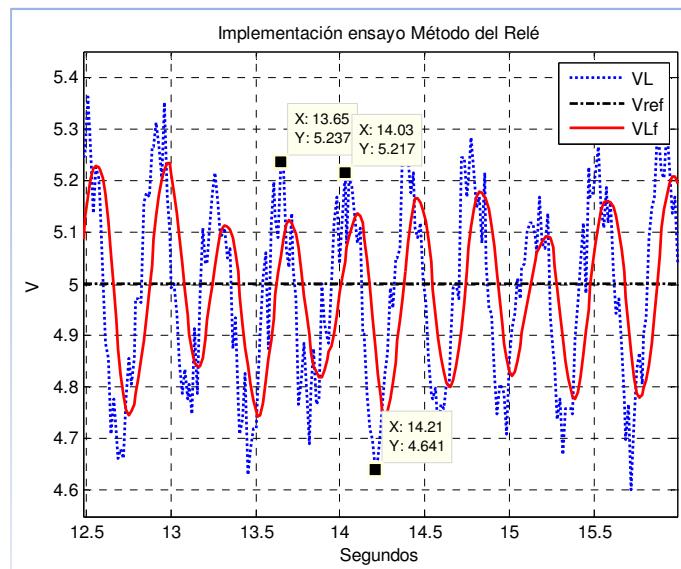


Fig. 16. Implementación ensayo Método del Relé.

Alumno: Roberto Velázquez NIA: 327988	Memoria Trabajo de Fin de Grado	Página 20 de 37
	Aplicaciones de Control Adaptativo en Ingeniería Eléctrica	

Las señales  $V_L$  y  $V_Q$  son notablemente ruidosas. Este ruido dificulta la identificación de la frecuencia  $f_U$  y de la amplitud  $a$  en la oscilación de  $V_L$ . Las medidas se toman analizando visualmente las gráficas registradas. En la Fig. 16 puede medirse la frecuencia de oscilación  $f_U$  y amplitud de la oscilación  $a$ , utilizando (19) se obtiene la ganancia  $K_{RELE}$ :

$$\text{implementación: } f_U = 2.63 \text{ Hz}, a = 0.298 \text{ V}, K_{RELE} = 34.1 \quad (28)$$

Los resultados son similares a los obtenidos en (23) en la simulación del ensayo con saturación  $\pm V_{DAC}$  en  $V_E$ . Esto indica una buena exactitud en el modelo utilizado en simulación.

#### 4.4 Implementación del controlador

Se implementa el controlador calculado a partir de los resultados de simulación sin saturación  $\pm V_{DAC}$  en (22), la obtención del controlador es idéntica a la descrita en simulación incluso en el ajuste fino. Se realizan maniobras en la conexión de las bombillas que son reconocibles en la Fig. 17 por la corriente  $I_L$  consumida, con dos bombillas, una y ninguna.

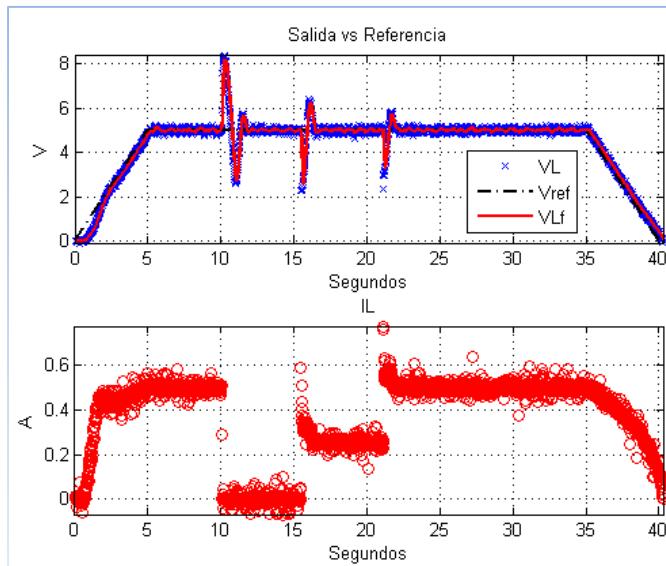


Fig. 17. Implementación del control M\"etodo del Rel\'e sin saturaci\'on  $\pm V_{DAC}$ .

Los resultados son satisfactorios aunque de inferiores prestaciones a los del control obtenido mediante el ensayo de Ziegler-Nichols en bucle abierto mostrado en Fig. 10.

De la misma manera se pone en práctica en la maqueta el controlador calculado a partir de los resultados de la implementación del ensayo del M\"etodo del Rel\'e obtenidos en (28). El comportamiento no es satisfactorio, aunque alcanza consigna la sobre oscilación es muy alta.

Alumno: Roberto Velázquez NIA: 327988	Memoria Trabajo de Fin de Grado	Página 21 de 37
	Aplicaciones de Control Adaptativo en Ingeniería Eléctrica	

## 5 ALGORITMO DE PLACKETT

Mediante el Algoritmo de Plackett se hace posible cumplir la máxima de Control Adaptativo de que el controlador debe adaptarse a las condiciones del sistema a controlar según éste cambia con el tiempo. Basado en un ajuste por mínimos cuadrados, el citado algoritmo realiza una estimación de la planta a controlar y desde dicha estimación se hace posible la síntesis de un controlador ajustado para esa planta estimada. Esto puede realizarse en tiempo de control en bucle cerrado de forma que el controlador es resintonizado continuamente. O bien por medio de un ensayo previo donde no se aplica ningún controlador, si no que la planta está en bucle abierto aunque cercana al punto de operación dentro de una tolerancia. En este capítulo se estudian ambas formas en simulación e implementación en la maqueta de Central Hidroeléctrica. En [2] puede encontrarse una descripción detallada del Algoritmo de Plackett.

### 5.1 Síntesis del controlador Dahlin

Como se estudió en el capítulo 2, el bucle cerrado  $V_Q/uc$  de la compuerta puede ser aproximado a su ganancia estática  $Fbc_{BI}$  (4) aplicando una reducción de orden ya que la dinámica del bucle cerrado  $V_L/V_{REF}$  es dominante. De esta manera toda la cadena directa en Fig. 4 de  $uc$  en adelante es modelada como un sistema de segundo orden. Esta planta discretizada por los métodos *Zero Order Hold* o *Matcheo* resulta en una expresión en  $z$  como:

$$G(z) = \frac{b_1 \cdot z + b_2}{z^2 - a_1 \cdot z - a_2} \quad (29)$$

Se propone una dinámica a obtener para la función de transferencia en bucle cerrado  $V_L/V_{REF}$  que cumpla las especificaciones de (3):

$$F(z) = \frac{V_L}{V_{REF}}(z) = \frac{1 - e^{-T_m/\tau}}{z - e^{-T_m/\tau}} \quad (30)$$

Donde  $T_m$  es el periodo de muestreo. Este control permite utilizar un muestreo más lento que el usado en los Ajustes Empíricos de Ziegler-Nichols y Método del Relé, en estos métodos es conveniente un muestreo más rápido para reconstruir correctamente la señal registrada en el ensayo. En este proyecto se utiliza para el controlador Dahlin un  $T_m$  de 0.03 segundos. Debe hacerse notar que la  $F(z)$  propuesta debe tener la misma diferencia entre número de polos  $n$  y número de ceros  $m$  que la  $G(z)$  de la que se dispone:

$$(n - m)_{G(z)} = (n - m)_{F(z)} \quad (31)$$

Ante una entrada en escalón, la función de transferencia en  $z$  expresada en (31) resulta en una salida  $V_L(z)$  con una dinámica de primer orden y error de posición cero. Donde  $\tau$  guarda relación con el tiempo de respuesta  $tr$  especificado en (3):

$$\tau = tr/3 \quad (32)$$

Realizando operaciones se obtiene la expresión del controlador  $R(z)$  en función del bucle cerrado propuesto  $F(z)$  y de la planta en discreto de la que se dispone  $G(z)$ . Segundo Fig. 4,  $K_V$  es la constante del voltímetro,  $E(z)$  el error de entrada al controlador  $e_{VL}$ ,  $U(z)$  la acción de salida del controlador  $uc$ :

$$R(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = \frac{F(z)}{K_V \cdot G(z) \cdot (1 - F(z))} \quad (33)$$

Alumno: Roberto Velázquez NIA: 327988	Memoria Trabajo de Fin de Grado	Página 22 de 37
	Aplicaciones de Control Adaptativo en Ingeniería Eléctrica	

La expresión (33) puede ser formulada como ecuación en diferencias. Resulta en la expresión de un regulador PID estándar no interactivo pasado a discreto mediante aproximación trapezoidal o *tustin*, del mismo tipo que la formulada en (16):

$$u_K = u_{K-1} + \frac{1 - e^{-T_m/\tau}}{K_V \cdot (b_1 + b_2)} \cdot e_K - a_1 \cdot \frac{1 - e^{-T_m/\tau}}{K_V \cdot (b_1 + b_2)} \cdot e_{K-1} - a_2 \cdot \frac{1 - e^{-T_m/\tau}}{K_V \cdot (b_1 + b_2)} \cdot e_{K-2} \quad (34)$$

Supuesto que los coeficientes  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b_1$  y  $b_2$  puedan ser estimados, la formulación (34) permite la síntesis del controlador por parte del dispositivo de control digital utilizado. La estimación de la planta (estimación de los coeficientes  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b_1$  y  $b_2$ ) es resultado de la aplicación del Algoritmo de Plackett. Iteración a iteración, El citado algoritmo utiliza como entrada un vector  $x$  contenido las salidas y acciones previas y por otra parte la salida actual  $y_K$ :

$$x = (y_{K-1} \ y_{K-2} \ u_{K-1} \ u_{K-2})^T \quad (35)$$

$$y_K \quad (36)$$

Donde el superíndice  $T$  indica traspuesta. El Algoritmo de Plackett entrega su resultado en un vector  $\theta$  que contiene los coeficientes de la planta estimados:

$$\theta = (a_1 \ a_2 \ b_1 \ b_2)^T \quad (37)$$

Los coeficientes estimados en (37) son utilizados en (34) en la síntesis del controlador logrando así la denominada Auto Sintonía. Para un óptimo funcionamiento del Algoritmo de Plackett la entrada  $u$  debe ser rica en componentes de frecuencia, inconveniente que se estudia más adelante.

Se realiza la implementación de un controlador Dahlin sin utilizar Auto Sintonía, el controlador es calculado e inicializado según modelo y en ningún momento es resintonizado. Para el modelo  $G(z)$  de planta en discreto se toma la cadena directa que puede apreciarse en Fig. 4 desde  $uc$  hasta  $V_L$ . La dinámica del bucle cerrado de la compuerta es despreciada y se tiene en cuenta únicamente su ganancia estática  $Fbc_{BI}$  (4). Se discretiza por *Zero Order Hold* con un periodo de muestreo  $T_m$  de 0.03 segundos:

$$G(z) = \frac{0.3986 \cdot z + 0.1813}{z^2 - 0.8178 \cdot z + 0.0904} \quad (38)$$

El regulador  $R(z)$  obtenido según la expresión analítica (33) resulta en :

$$R(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = \frac{0.39 - 0.319 \cdot z^{-1} + 0.0353 \cdot z^{-2}}{(1 - z^{-1})} \quad (39)$$

La Fig. 18 muestra el resultado de la simulación.

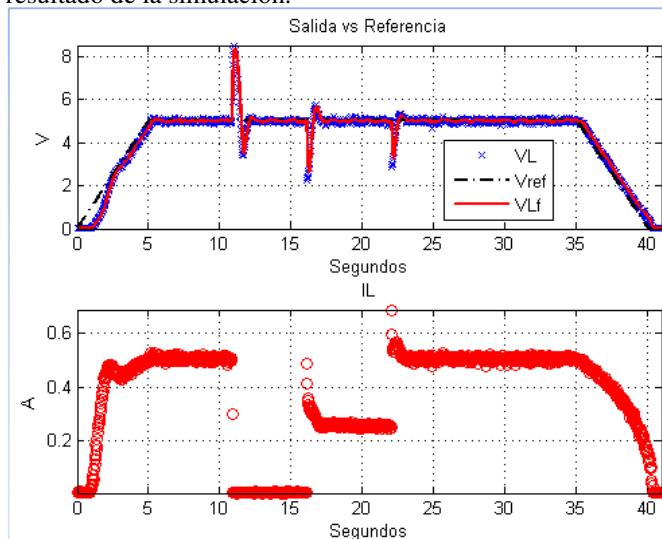


Fig. 18. Implementación del control Dahlin.

Alumno: Roberto Velázquez NIA: 327988	Memoria Trabajo de Fin de Grado	Página 23 de 37
	Aplicaciones de Control Adaptativo en Ingeniería Eléctrica	

## 5.2 Auto Sintonía sin ensayo

El concepto fundamental es que no se realiza ningún tipo de ensayo para sintonizar el controlador, en cambio toda la Auto Sintonía se realiza en bucle cerrado con el controlador trabajando. Mediante el descrito Algoritmo de Plackett se consigue una estimación de la planta iteración a iteración. Se establecen ciertos criterios para controlar que esa estimación no es incorrecta o al menos no ofrece resultados sin sentido. En cada iteración en la que los criterios son cumplidos se resintoniza el controlador. Para una óptima estimación de la planta por el Algoritmo de Plackett sería necesario que la acción aplicada tuviera alto contenido en componentes de frecuencia, desafortunadamente esta no es la situación en el control de una Central Hidroeléctrica donde se fija una referencia constante que no cambia.

El controlador Dahlin es inicializado según modelo, de forma que al empezar el control se tiene un controlador ya calculado y operativo.

Utilizando el modelo y previamente a la simulación o al control, se calculan la ganancia estática de la planta para una carga desde cero bombillas a cinco bombillas. Una de las condiciones a cumplir para permitir resintonizar el controlador es que la ganancia estática de la planta estimada debe encontrarse dentro de ese rango de valores, de esta forma se controla que la estimación no es incoherente.

La segunda condición aplicada para permitir resintonía del controlador es que la ganancia estática de la planta estimada está variando muy lentamente. Este criterio se considera cumplido si la derivada media respecto al tiempo de la ganancia estática estimada en las últimas  $qndKdt$  muestras, se encuentra dentro de un porcentaje  $qporenU$  de la media de ganancias estáticas previamente calculadas desde cero a cinco bombillas. Es decir, se realiza una validación de la dinámica de la ganancia estática de la planta estimada.

### 5.2.1 Simulación

En Fig. 19 se muestra el resultado de una simulación de Auto Sintonía sin ensayo con las condiciones:

- Período de muestreo 0.03 segundos.
- Frecuencia de cruce del filtro de 5 Hz. No se aplica al control.
- Ruido en la medida del 2 %.
- Porcentaje  $qporenU$  para no resintonizar controlador de 0.5 %.
- Número de muestras  $qndKdt$  para cálculo de la derivada media de la ganancia estática de 8.

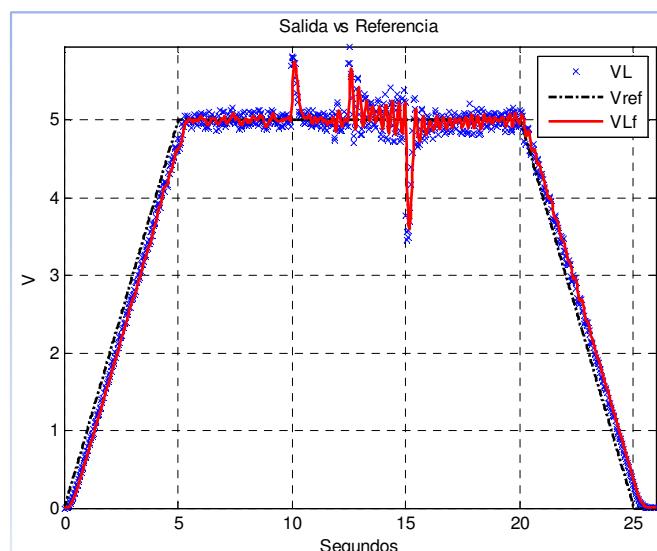


Fig. 19. Simulación Auto Sintonía sin ensayo.

Alumno: Roberto Velázquez NIA: 327988	Memoria Trabajo de Fin de Grado	Página 24 de 37
	Aplicaciones de Control Adaptativo en Ingeniería Eléctrica	

Se simulan cambios de carga para comprobar el comportamiento del control. El resultado de la simulación puede cambiar puesto que el ruido introducido es aleatorio. Se observa una considerable sobre oscilación e incluso inestabilidad. No se obtienen mejores resultados variando ninguna de las condiciones aplicadas a la simulación.

### 5.2.2 Implementación

Se implementa el control Auto Sintonía sin ensayo en la maqueta de Central Hidroeléctrica. Las condiciones aplicadas son las mismas que en simulación excepto por el ruido propio de las medidas. El resultado no es satisfactorio en absoluto. El sistema es incluso inestable aunque se mantiene oscilando alrededor de consigna.

### 5.3 Auto Sintonía con ensayo

Como se ha dicho, el Algoritmo de Plackett ofrece su mejor rendimiento cuando la entrada a la planta tiene elevadas componentes en frecuencia. Este no es el caso en la maqueta de Central Hidroeléctrica, ya que cuando la salida alcanza consigna en su punto de operación la acción  $uc$  permanece estable. De esa forma la identificación de los coeficientes en  $\theta$  (37) no es la óptima.

Para solventar este problema se propone en este capítulo la realización de un ensayo parecido a la característica de la que disponen algunos controladores industriales conocida como “press the button to tune”. Consiste en llevar la planta a consigna por medio de un controlador calculado mediante modelo (al igual que en el ensayo del Método del Relé) y una vez en el punto de operación sustituir el controlador por una acción  $uc$  con elevadas componentes en frecuencia. De esta forma la acción  $uc$  es aplicada en bucle abierto llevando la salida de la planta por encima y por debajo de consigna, siempre dentro de unos límites tolerables en la aplicación.

De ese modo, una vez alcanzada consigna se memoriza la acción  $uc$  que ya ha alcanzado el permanente en la variable  $ucipuc$ . A partir de ese momento se suma al valor  $ucipuc$  una señal cuadrada de amplitud  $qapuc$  y de frecuencia  $qfpuc$ , este es el valor aplicado en la acción  $uc$ . La amplitud  $qapuc$  debe ser lo bastante pequeña para no llevar la salida de la planta  $V_L$  fuera de los límites tolerables. La duración del ensayo es de un número de periodos  $qnpu$  de frecuencia  $qfpuc$ . Durante este tiempo, la componente continua es retirada de la acción  $uc$  y de la salida  $V_L$  en lo que respecta a la entrada que procesa el Algoritmo de Plackett, consiguiendo de esta forma una óptima estimación de la planta en los coeficientes en  $\theta$  (37). Durante el ensayo, un controlador PID estándar no interactivo discretizado por  $tustin$  es resintonizado con los mismos criterios que en el apartado de Auto Sintonía sin ensayo, referidos a la ganancia estática de la planta estimada y su dinámica. El mencionado controlador es resintonizado pero no se aplica, puesto que el ensayo es en bucle abierto. Terminado el tiempo de ensayo, se deja de aplicar la acción  $uc$  con señal cuadrada superpuesta y se pasa a utilizar en bucle cerrado el controlador sintonizado hasta la última muestra del ensayo. Desde ese momento en adelante se utiliza el controlador sintetizado no permitiendo más resintonizaciones.

#### 5.3.1 Simulación

Se realiza una simulación de control con Auto Sintonía con ensayo con las siguientes condiciones:

Alumno: Roberto Velázquez NIA: 327988	Memoria Trabajo de Fin de Grado	Página 25 de 37
	Aplicaciones de Control Adaptativo en Ingeniería Eléctrica	

- Periodo de muestreo 0.03 segundos. Controlador Dahlin inicializado previamente al ensayo.
- Frecuencia de cruce del filtro de 5 Hz. Si se aplica filtro al control, puesto que con filtro es apreciable una mejor convergencia en los coeficientes del vector  $\theta$  (37).
- Ruido en la medida del 2 %.
- $qporcenU$  de 0.5 %,  $qndKdt$  de 8. Condiciones como en Auto Sintonía sin ensayo.
- $qapuc$  de 0.125 V. Puesto que la ganancia estática de la planta es aproximadamente dos, la salida  $V_L$  es llevada aproximadamente 0.5 V respecto a la referencia  $V_{REF}$  representando esto un error del 5 % con una  $V_{REF}$  de 5 V. Este porcentaje de error sería tolerable de forma no permanente en una instalación eléctrica según normativa [9].
- $qfpuc$  de 0.25 Hz y  $qnpu$ c de 15.

El resultado de la simulación se muestra en la Fig. 20, terminado el ensayo se muestra un tiempo de control simulando cambios en la carga.

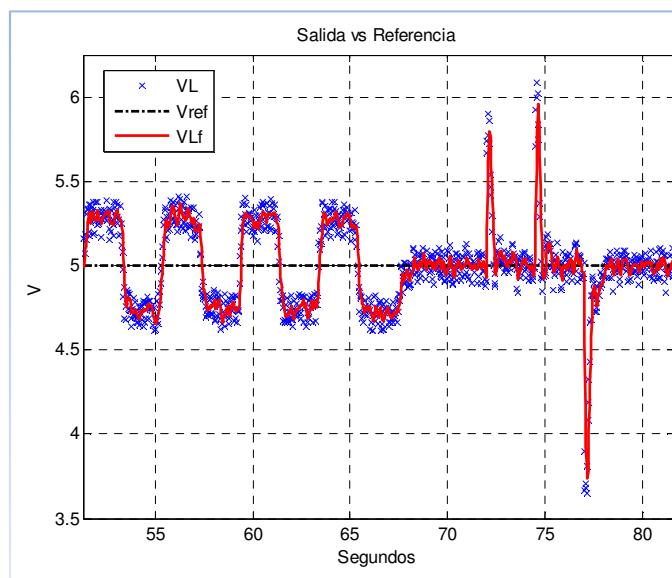


Fig. 20. Simulación Auto Sintonía con ensayo, salida  $V_L$ .

La Fig. 21 muestra la evolución de los coeficientes del vector  $\theta$  (37).

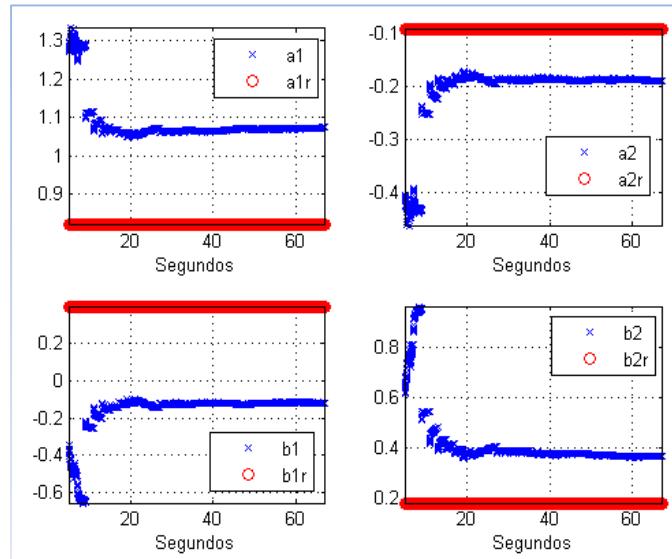


Fig. 21. Simulación Auto Sintonía con ensayo, coeficientes de  $\theta$ .

Puede apreciarse la convergencia de los coeficientes hacia valores estables. Las gráficas denotadas como  $r$  representadas en rojo representan los coeficientes del modelo de la planta y hacia los que debería converger. El controlador sintetizado siempre cumple los criterios especificados en  $qporcenU$  y  $qndKdt$  referidos a la dinámica de la ganancia estática de la planta estimada, además del rango correcto de ésta.

### 5.3.2 Implementación

Se implementa el control Auto Sintonía con ensayo en la maqueta de Central Hidroeléctrica. Las condiciones aplicadas son las mismas que en simulación. En la síntesis del controlador, se aplica una constante empírica de reducción de valor  $KXat = 0.15$  en los términos del error  $e_K$ ,  $e_{K-1}$  y  $e_{K-2}$  de la ecuación (34). La Fig. 22 muestra los ciclos finales del ensayo y el tiempo de control posterior.

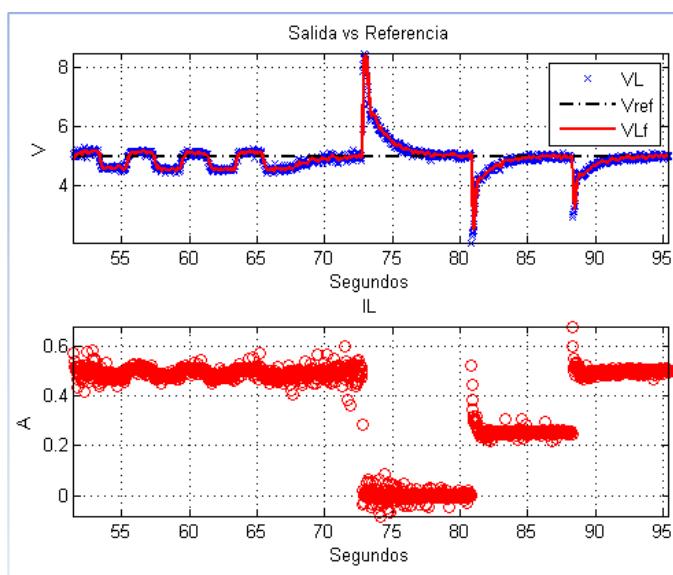


Fig. 22. Implementación Auto Sintonía con ensayo, salida  $V_L$  e  $I_L$ .

La Fig. 23 muestra la evolución de los coeficientes del vector  $\theta$  (37). Se aplican las mismas consideraciones que en simulación.

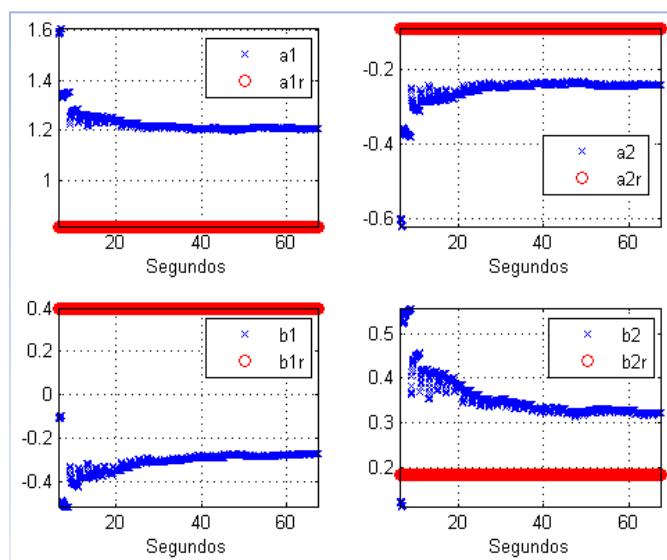


Fig. 23. Implementación Auto Sintonía con ensayo, coeficientes de  $\theta$ .

Alumno: Roberto Velázquez NIA: 327988	Memoria Trabajo de Fin de Grado	Página 27 de 37
	Aplicaciones de Control Adaptativo en Ingeniería Eléctrica	

## 6 PREDICTOR DE SMITH

Algunos de los sistemas a controlar en ingeniería presentan un retraso puro en su respuesta que hace que el controlador aplicado no resulte en el comportamiento esperado. El Predictor de Smith es una técnica a utilizar en esos casos que resuelve en gran medida el problema. Mediante esta técnica el control se realiza con la salida predicha del sistema. Para calcular la mencionada salida predicha se hace necesario un modelo de planta en discreto y la aplicación de control digital, circunstancias que también se dan en el Control Adaptativo. El Predictor de Smith puede encontrarse estudiado y desarrollado en [2].

El enunciado del Predictor de Smith consiste en que ante el problema de control de una planta de la que se dispone de su modelo en discreto  $G(z)$  y se conoce su retraso puro de  $n$  periodos de muestreo, se puede plantear un esquema de control como el de la Fig. 24.

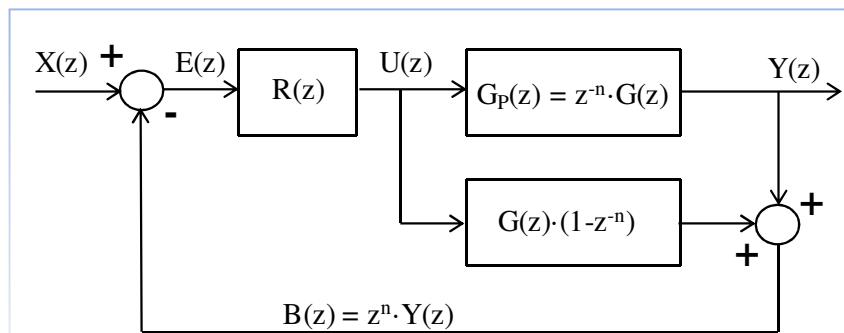


Fig. 24. Esquema de control con Predictor de Smith.

Donde  $G_p(z)$  representa la planta con su retraso puro incorporado. En el Predictor de Smith el control se realiza con la salida predicha  $B(z) = z^n \cdot Y(z)$ . Realizando operaciones y siempre con  $G(z)$  y  $n$  bien modeladas, el esquema de Fig. 24 queda expresado como puede apreciarse en Fig. 25.

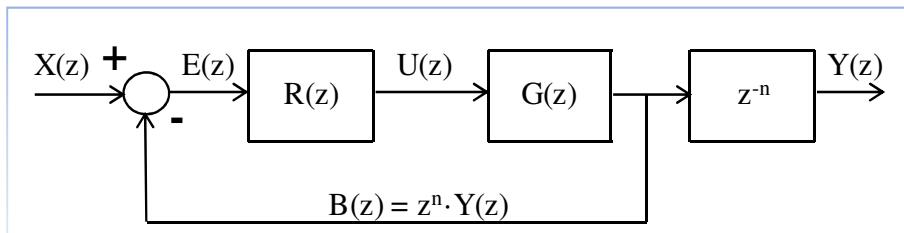


Fig. 25. Desarrollo del esquema de control con Predictor de Smith.

Donde el regulador  $R(z)$  se calcula por los métodos habituales conocido el modelo  $G(z)$ .

### 6.1 Simulación

El sistema de maqueta de Central Hidroléctrica del que se dispone no tiene un retraso puro significativo como para justificar la aplicación de un Predictor de Smith. Por ello se modela un retraso puro de  $n_{retP}$  periodos de muestreo en la acción  $uc$ , resultando en la acción retrasada  $xuc$ . La Fig. 26 representa el esquema de control de la maqueta de Central Hidroeléctrica con Predictor de Smith donde se utiliza el mencionado retraso. El correcto funcionamiento de un Predictor de Smith requiere disponer de un buen modelo de la planta  $G(z)$  además de conocer con exactitud el retraso puro de ésta. El retraso conocido aplicado en el Predictor de Smith se modela en  $n_{retPS}$  número de periodos de muestreo. El funcionamiento en teoría perfecto del Predictor de Smith se da cuando  $n_{retP} = n_{retPS}$ . Sin embargo, el

ingeniero de control puede no conocer con exactitud el retraso puro de la planta. Así, configurando  $nretp \neq nretpS$  se simula un funcionamiento no totalmente correcto del Predictor de Smith, algo que sucede en una instalación real.

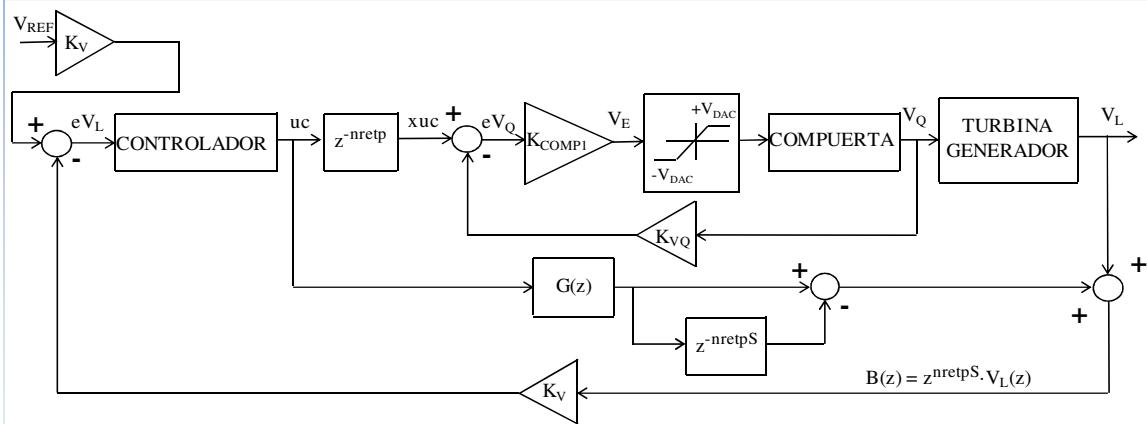


Fig. 26. Esquema de control en cascada con Predictor de Smith.

Se utiliza el controlador obtenido del ensayo de Ziegler-Nichols en bucle abierto en las expresiones (6) y (7), donde  $K$  y  $T_P$  se obtienen con  $V_L$  filtrada (7) y  $T_0$  con  $V_L$  no filtrada (6). La planta en continuo  $G(s)$  se obtiene considerando una dinámica de segundo orden críticamente amortiguada de ganancia  $K$  y tiempo de respuesta  $3 \cdot T_P$ . El modelo de planta  $G(s)$  obtenido en continuo es:

$$G(s) = \frac{305.3727}{(s + 11.7284)^2} \quad (40)$$

Discretizando  $G(s)$  mediante los métodos *Zero Order Hold* o *Matcheo* se obtiene la planta en discreto  $G(z)$ , siendo ésta una expresión del mismo tipo que la formulada en (29). El método de *Matcheo* es por su sencillez el más factible a implementar en un controlador digital, según *Matcheo* se obtiene:

$$G(z) = \frac{0.0289 \cdot z + 0.0289}{z^2 - 1.6774 \cdot z + 0.7034} \quad (41)$$

La discretización por *Matcheo* puede ser desarrollada para al final obtener la expresión analítica que utiliza el controlador digital. En efecto, en una planta en continuo  $G(s)$  donde se considera dinámica críticamente amortiguada  $\xi = 1$ ,  $w_n$  es la frecuencia natural y  $K$  la ganancia estática:

$$G(s) = \frac{K \cdot w_n^2}{s^2 + 2 \cdot \xi \cdot w_n \cdot s + w_n^2} = \frac{K \cdot w_n^2}{(s + \xi \cdot w_n)^2} \quad (42)$$

Conocido el periodo de muestreo  $T_m$ , los polos continuos  $-\xi \cdot w_n$  son pasados a discreto. Se sitúan tantos ceros en discreto en el infinito como la diferencia entre polos y ceros en continuo menos uno.  $K_Z$  es una constante en la expresión en  $z$ :

$$G(z) = \frac{K_Z \cdot (z + 1)}{(z - e^{-\xi \cdot w_n \cdot T_m})^2} \quad (43)$$

Puesto que el sistema es de tipo cero (no hay polos en el origen), pueden igualarse las ganancias estáticas despejando la constante  $K_Z$ :

$$K_Z = \frac{K \cdot (1 - e^{-\xi \cdot w_n \cdot T_m})^2}{2} \quad (44)$$

Alumno: Roberto Velázquez NIA: 327988	Memoria Trabajo de Fin de Grado	Página 29 de 37
	Aplicaciones de Control Adaptativo en Ingeniería Eléctrica	

Desarrollando (43) y (44) se obtiene la expresión analítica de  $G(z)$  discretizada por *Matcheo* utilizada en el controlador digital:

$$G(z) = \frac{K_Z \cdot z + K_Z}{z^2 - 2 \cdot e^{-\xi \cdot w_n \cdot T_m} \cdot z + e^{-2 \cdot \xi \cdot w_n \cdot T_m}} \quad (45)$$

Con el fin de comprobar si existen diferencias significativas, se realiza una simulación discretizando la planta mediante *Zero Order Hold*. No se encuentran diferencias de mención.

Las condiciones aplicadas a la simulación son las siguientes:

- Período de muestreo 0.015 segundos. Ruido de 2 %. Filtro de 5 Hz, no se aplica al control.
- Retraso  $nretp$  en la acción  $uc$  de 0.75 s.
- Retraso  $nretpS$  en el Predictor de Smith de 0.75 s.

Se simulan varios cambios en la carga para comprobar la respuesta del controlador. La Fig. 27 muestra los resultados de la simulación.

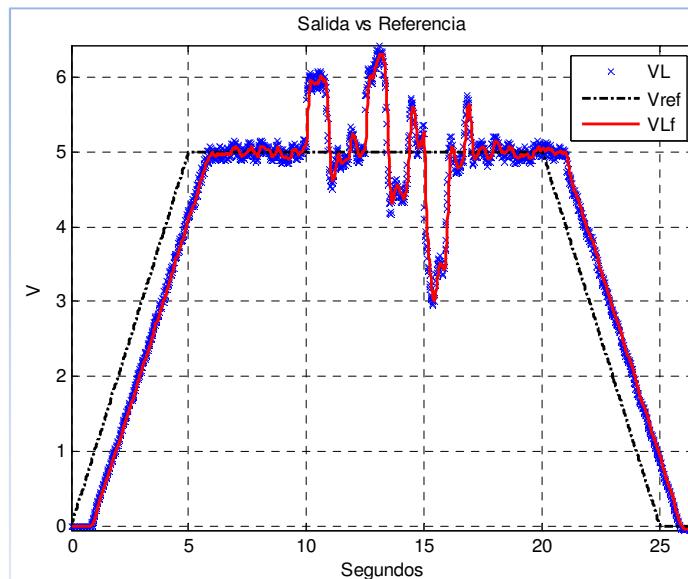


Fig. 27. Simulación Predictor de Smith.

Una simulación con  $nretp \neq nretpS$  resulta en un comportamiento no satisfactorio, se profundiza sobre esto en la implementación en la maqueta.

## 6.2 Implementación

Se pone en práctica el Predictor de Smith en la maqueta de Central Hidroeléctrica. Se utiliza el controlador obtenido en el ensayo Ziegler-Nichols en bucle abierto según los resultados en (17) y (18), donde  $K$  y  $T_P$  se obtienen con  $V_L$  filtrada (18) y  $T_0$  con  $V_L$  no filtrada (17). Se aplican las mismas consideraciones en cuanto al modelado de la planta que en simulación, así como las mismas condiciones de simulación excepto en lo concerniente al ruido en la medida.

Alumno: Roberto Velázquez NIA: 327988	Memoria Trabajo de Fin de Grado	Página 30 de 37
	Aplicaciones de Control Adaptativo en Ingeniería Eléctrica	

La Fig. 28 muestra el resultado de la implementación con los retrasos bien modelados  $nretP = nretPS = 0.75$  segundos.

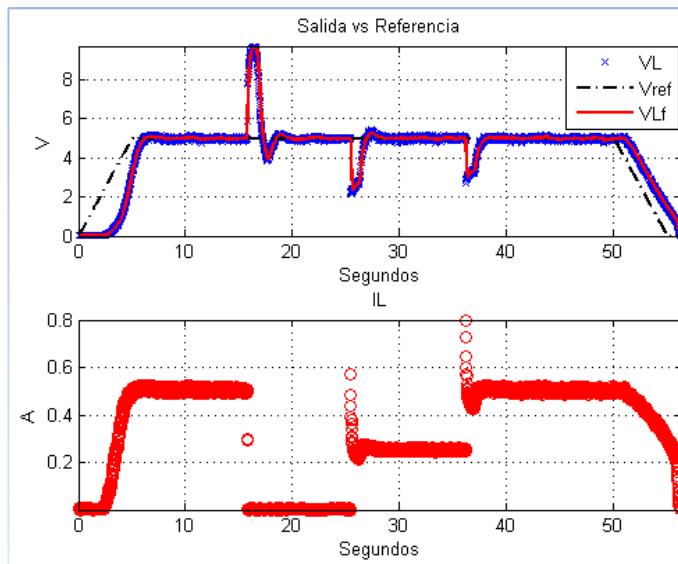


Fig. 28. Implementación Predictor de Smith, retrasos bien modelados.

En Fig. 29 y tratando de reproducir una situación real, se modelan incorrectamente los retrasos de forma que  $nretP = 0.75$  segundos y  $nretPS = 1$  segundos. Puede apreciarse un peor comportamiento. Se puede comprobar que modelando todavía más incorrectamente el retraso ( $nretP = 0.75$  segundos y  $nretPS = 1.25$  segundos) el comportamiento es claramente peor llegándose incluso a inestabilidad.

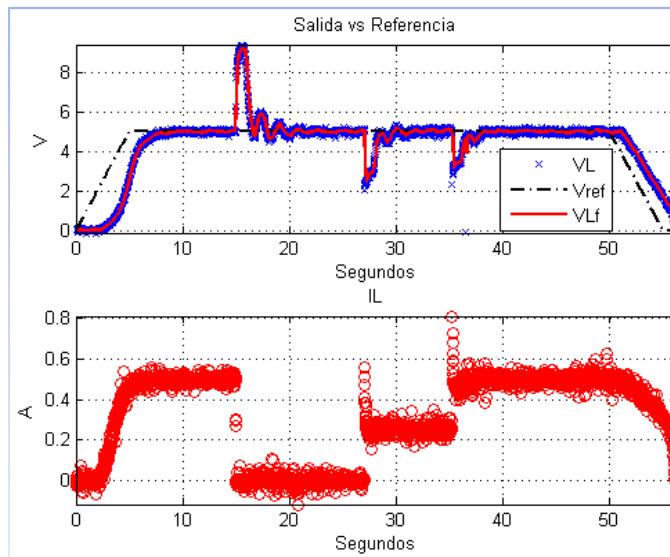


Fig. 29. Implementación Predictor de Smith, retrasos mal modelados.

Alumno: Roberto Velázquez NIA: 327988	Memoria Trabajo de Fin de Grado	Página 31 de 37
	Aplicaciones de Control Adaptativo en Ingeniería Eléctrica	

## 7 CONCLUSIONES Y POSIBLES MEJORAS

### 7.1 Conclusiones

En este trabajo se ha pretendido estudiar varias estrategias de Control Adaptativo y Ajuste Empírico con la finalidad de estudiar las prestaciones de una aplicación real en una maqueta de Central Hidroeléctrica. Además del estudio teórico necesario, se han realizado simulaciones como paso previo a la implementación de los controles en una maqueta de Central Hidroeléctrica de la que se dispone. El control aplicado a la maqueta ha sido control digital (o en tiempo discreto) por medio de un ordenador PC. La mencionada puesta en práctica en la maqueta de Central Hidroeléctrica es la que da idea de la posibilidad de implementación en una instalación real. En efecto, en una instalación real el ingeniero de control se enfrenta a problemas que no aparecen en la mera simulación. Estos problemas podrían ser el modelado inexacto del sistema, el ruido en las medidas, la saturación de la acción, retrasos en la aplicación de la acción, etc...

#### 7.1.1 Ziegler-Nichols

En la aplicación del método de Ajuste Empírico de Ziegler-Nichols se ha concluido lo siguiente:

- Ensayo en bucle abierto en el punto de operación. Se debe alcanzar ese punto por los medios que sean (bien aplicando un controlador calculado con modelo, o bien por aproximación manual en pequeños pasos).
- Puesto que el ensayo es en bucle abierto, el ingeniero de control debe verificar que la salida del sistema no sobrepasa los límites tolerables.
- Se necesita un muestreo rápido para la reconstrucción correcta de la salida registrada durante el ensayo, lo que implica mayor carga computacional. Esto puede ser relevante en casos en que el dispositivo de control digital sea de capacidad limitada, o no permita la representación en números reales.
- Debido al ruido en la medida, el uso de filtro digital de paso bajo es de notable ayuda para el procesamiento de los datos registrados durante el ensayo.
- El ensayo permite obtener un modelo bastante correcto de la planta considerando una dinámica de segundo orden críticamente amortiguada.
- Tras el ajuste fino, el controlador obtenido ha sido el que mejor resultado ha ofrecido en la implementación en la maqueta.

#### 7.1.2 Método del Relé

En la aplicación del método de Ajuste Empírico del Método del Relé se han alcanzado las siguientes conclusiones:

- Se deben tener en cuenta las mismas consideraciones que para el ajuste de Ziegler-Nichols, en lo concerniente a ensayo en bucle abierto, periodo de muestreo y filtrado de la salida ruidosa.

Alumno: Roberto Velázquez NIA: 327988	Memoria Trabajo de Fin de Grado	Página 32 de 37
	Aplicaciones de Control Adaptativo en Ingeniería Eléctrica	

- La saturación de la acción de salida  $V_E$  en la compuerta no permite la realización correcta de este ensayo. Los resultados recogidos del mencionado ensayo no son correctos y en consecuencia el controlador calculado no funciona correctamente.
- El controlador calculado de forma teórica en simulación sin tener en cuenta la saturación de la salida ofrece unos resultados correctos, aunque peores que el controlador Ziegler-Nichols.

### 7.1.3 Algoritmo de Plackett

La aplicación del método de Control Adaptativo del Algoritmo de Plackett concluye como sigue:

- Se utiliza la síntesis del controlador Dahlin. Esto permite un periodo de muestreo más lento. Sería de utilidad en controladores digitales de capacidad limitada.
- La Auto Sintonía sin ensayo no resulta satisfactoria en ningún caso.
- La Auto Sintonía con ensayo requiere realizar un ensayo en bucle abierto como en los casos de Ajuste Empírico. El operador o ingeniero de control debe asegurarse de que durante ese ensayo no se superan los límites tolerables de la aplicación.
- En Auto Sintonía con ensayo se consigue una estimación bastante correcta de la planta. El uso del filtro en la medida resulta en un mejor resultado en la estimación.
- El controlador obtenido mediante Auto Sintonía con ensayo ofrece unos resultados satisfactorios tras el ajuste fino, inferiores en cualquier caso al de Ziegler-Nichols.

### 7.1.4 Predictor de Smith

Tras la implementación de un esquema de control utilizando el Predictor de Smith en la maqueta de Central Hidroeléctrica se puede concluir lo siguiente:

- Es necesario un modelo de la planta en discreto y del retraso experimentado. Hay una mayor carga computacional en el dispositivo de control digital.
- Se logran buenos resultados incluso con el retraso no perfectamente modelado.

## 7.2 Posibles mejoras

Se describen a continuación algunas mejoras que podrían llevarse a la práctica en caso de continuación del trabajo.

- Estudiar qué procedimientos propios del procesado digital de la señal podrían aplicarse para eliminar el ruido en las medidas sin introducir retardos. En este trabajo se ha comprobado cómo un simple sistema de segundo orden críticamente amortiguado actuando como filtro paso bajo causa mejora en la identificación de la planta. El tratamiento digital de la señal se estudia ampliamente en [10].
- En Algoritmo de Plackett con y sin ensayo puede plantearse el uso de un modelo de la planta distinto al propuesto en (13). Este modelo es conocido como ARMA (Auto-Regressive Moving Average). Pueden plantearse otros estudiando las consecuencias que ello implique en bucle cerrado a plantear y en el controlador a sintetizar.
- A partir del controlador resintonizado en el Algoritmo de Plackett con ensayo, pueden obtenerse las constantes características proporcional, derivativa e integral, de ese mismo controlador expresado en

Alumno: Roberto Velázquez NIA: 327988	Memoria Trabajo de Fin de Grado	Página 33 de 37
	Aplicaciones de Control Adaptativo en Ingeniería Eléctrica	

continuo como PID estándar no interactivo. De esta forma podría aplicarse un mejor ajuste fino, reduciendo por ejemplo únicamente el término derivativo. Requeriría mayor carga computacional.

- En el Algoritmo de Plackett con ensayo se elimina la componente continua de la salida  $V_L$  que procesa el citado algoritmo. En este trabajo esto se lleva a cabo memorizando un valor previo de salida  $V_L$  y sustrayendo este valor memorizado de la salida leída, podría realizarse con mayor rigor aplicando un filtro digital de paso alto como técnica de procesado de señal.

Alumno: Roberto Velázquez NIA: 327988	Memoria Trabajo de Fin de Grado	Página 34 de 37
	Aplicaciones de Control Adaptativo en Ingeniería Eléctrica	

## REFERENCIAS

- [1] K. Astrom, T. Hagglund, *Control PID avanzado*, Prentice Hall, 2009.
- [2] K. Dutton, S. Thompson, B. Barraclough *The art of control engineering*, Prentice Hall, 1997.
- [3] F. Rodríguez Rubio, M. J. López Sánchez, *Control adaptativo y robusto*, Universidad de Sevilla, 1996.
- [4] “PCI-9112\_Datasheet\_en\_1”, revisión de Abril de 2012, [www.adlinktech.com](http://www.adlinktech.com).
- [5] R.C. Dorf, R.H. Bishop, *Sistemas de control moderno*, Prentice Hall, 2005.
- [6] P. H. Lewis, C. Yang, *Sistemas de control en ingeniería*, Prentice Hall, 1999.
- [7] K. Ogata, *Discrete-time control systems*, Prentice Hall, 1987.
- [8] K. Ogata, *Ingeniería de control moderna*, Prentice Hall, 2003.
- [9] Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión. Real Decreto 842/2002.
- [10] A.V. Oppenheim, A.S. Willsky, *Señales y sistemas*, 2º Edición, Prentice hall, 1998.

Alumno: Roberto Velázquez NIA: 327988	Memoria Trabajo de Fin de Grado	Página 35 de 37
	Aplicaciones de Control Adaptativo en Ingeniería Eléctrica	

## ANEXO A1: VALORES NUMÉRICOS

Los valores numéricos del subsistema de la compuerta (ver Fig. 2) son:

$A_I = 1$ , ganancia del amplificador.

$R_I = 14.2 \Omega$ , Resistencia de inducido del motor.

$L_I = 0.047 \text{ H}$ , inductancia de inducido del motor.

$K_{PI} = 0.026 \text{ N}\cdot\text{m/A}$ , constante de par del motor.

$K_{el} = 0.0265 \text{ V}/\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ , constante eléctrica del motor.

$n = 125$ , relación de reducción.

$f_I = 4.91 \cdot 10^6 \text{ Kg}\cdot\text{m}^2$ , fricción viscosa en el eje del motor.

$J_I = 1.07 \cdot 10^{-6} \text{ Kg}\cdot\text{m}^2$ , inercia total en el eje del motor.

$K_w = 2.34 \cdot 10^{-2} \text{ V}/\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ , constante de la dinamo tacometrífica.

$Kq = 1.733 \text{ V}/\text{rad}$ , constante del potenciómetro que simula la compueta

$K_{VQ} = 1$ , constante del voltímetro de posición compueta.

Los valores numéricos del subsistema de turbina-generador (ver Fig. 3) son:

$A_2 = 3.3$ , ganancia del amplificador.

$R_2 = 3.67 \Omega$ , Resistencia de inducido del motor.

$L_2 = 0.047 \text{ H}$ , inductancia de inducido del motor.

$K_{P2} = 0.0731 \text{ N}\cdot\text{m/A}$ , constante de par del motor.

$K_{e2} = 0.0741 \text{ V}/\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ , constante eléctrica del motor.

$f_2 = 4.9 \cdot 10^{-5} \text{ Kg}\cdot\text{m}^2$ , fricción viscosa en el eje turbina.

$K_g = 0.0731 \text{ V}/\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ , constante eléctrica del generador.

$K_{Pg} = 0.0741 \text{ N}\cdot\text{m/A}$ , constante de par del generador.

$R_g = 3.67 \Omega$ , resistencia interna del generador.

$K_V = 0.5$ , constante del voltímetro de línea.

$K_a = 1 \text{ V/A}$ , constante del amperímetro.

$R_L = 15 \Omega$ , carga correspondiente a dos bombillas en paralelo, se considera una bombilla como  $30 \Omega$ .

Otros valores numéricos:

$V_{DAC} = 10 \text{ V}$ , Saturación  $\pm V_{DAC}$  en la acción  $V_E$ .

$V_{REF} = 5 \text{ V}$ , tensión de referencia (consigna a alcanzar).

Alumno: Roberto Velázquez NIA: 327988	Memoria Trabajo de Fin de Grado	Página 36 de 37
	Aplicaciones de Control Adaptativo en Ingeniería Eléctrica	

## ANEXO A2: CONTENIDO CD ANEXO

En este trabajo se ha utilizado el software *Matlab* en un ordenador PC donde se ha instalado una tarjeta de adquisición de datos. Se describe aquí el contenido de los distintos ficheros desarrollados.

- “mc\_def.m”: Definiciones de los valores numéricos.
- “mc\_comp2.mdl” y “mc\_tg2RI.mdl”: Modelos *Simulink* de la compuerta y de la turbina-generador.
- “simuZNBA.m” y “maqZNBA.m”: Ensayo de Ziegler-Nichols en bucle abierto. Simulación e implementación en maqueta.
- “simuZNrele.m” y “maqZNrele.m”: Ensayo del Método del Relé. Simulación e implementación en maqueta.
- “simuSauto.m” y “maqSauto.m”: Controles Dahlin, Ziegler-Nichols o Método del Relé. Con y sin Auto Sintonía sin ensayo mediante Algoritmo de Plackett. Simulación e implementación en maqueta.
- “simuTauto.m” y “maqTauto.m”: Control Auto Sintonía con ensayo mediante Algoritmo de Plackett. El controlador puede ser inicializado por Dahlin, Ziegler-Nichols o Método del Relé. Simulación e implementación en maqueta.
- “simusmith.m” y “maqsmith.m”: Esquema de control con Predictor de Smith. Permite utilizar un controlador Dahlin, Ziegler-Nichols o Método del Relé. Permite obtener la planta en discreto por *Matcheo*. Simulación e implementación en maqueta.