

UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

ESTRATEGIAS DE CONTROL AVANZADO PARA EL CONTROL DE UN  
MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA UTILIZANDO EL SISTEMA DE  
CONTROL DISTRIBUIDO DELTA V

MAXIMILIANO ESTEBAN BÁEZ PARRA

2006

Universidad de Chile  
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas  
Departamento de Ingeniería Eléctrica

**Estrategias de Control Avanzado  
para el Control de un Motor de Corriente Continua  
utilizando el Sistema de Control Distribuido DeltaV**

**Maximiliano Esteban Báez Parra**

2006



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

ESTRATEGIAS DE CONTROL AVANZADO PARA EL CONTROL DE UN  
MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA UTILIZANDO EL SISTEMA DE  
CONTROL DISTRIBUIDO DELTAV

MAXIMILIANO ESTEBAN BÁEZ PARRA

COMISIÓN EXAMINADORA	NOTA (n°)	CALIFICACIONES (Letras)	FIRMA
PROFESOR GUÍA: SRA. DORIS SÁEZ HUEICHAPAN	: .....	.....	.....
PROFESOR CO-GUÍA: SR. HÉCTOR AGUSTO ALEGRÍA	: .....	.....	.....
PROFESOR INTEGRANTE: SR. FERNANDO DE MAYO ISRAEL	: .....	.....	.....
NOTA FINAL EXAMEN DE TÍTULO	: .....	.....	.....

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA

SANTIAGO DE CHILE  
ABRIL 2006

RESUMEN DE LA MEMORIA  
PARA OPTAR AL TÍTULO  
DE INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA  
POR: MAXIMILIANO BÁEZ PARRA  
FECHA: 18 MAYO 2006  
PROF. GUÍA: SRA. DORIS SÁEZ HUEICHAPAN

**“ESTRATEGIAS DE CONTROL AVANZADO PARA EL CONTROL DE UN MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA UTILIZANDO EL SISTEMA DE CONTROL DISTRIBUIDO DELTAV”**

En el presente trabajo se muestran las ventajas de las estrategias de control avanzado, basadas en la teoría de control predictivo y lógica difusa, utilizando un sistema de control distribuido DeltaV. Estas ventajas se derivan de su aplicación al control regulatorio de un motor de corriente continua.

El diseño de las estrategias de control se realizó utilizando las herramientas del sistema de control DCS DeltaV: Control Studio, DeltaV Tune (para los controladores PI y difuso) y DeltaV Predict (para los controladores predictivos). En cada caso se definieron dos diferentes sintonizaciones para sus parámetros.

Se diseñaron tres pruebas de evaluación que permitieron observar las características de interés de cada una de las estrategias de control propuestas. En primer lugar se utilizó un estudio de la partida de la planta, para observar el tiempo de subida que requería cada estrategia para llevar la velocidad del motor a la referencia deseada, y también observar el tiempo de asentamiento para el cual la estrategia de control mantenía la variable controlada dentro de una banda entorno a la referencia deseada. La segunda prueba corresponde a cambios en la velocidad de referencia y la tercera analiza la variación en la carga manteniendo una velocidad constante. En estas dos últimas pruebas se cuantifica el comportamiento del error obtenido y el comportamiento de la acción de control aplicada, utilizando índices que indican los valores medios y desviación de ambas variables.

El estudio del comportamiento de las estrategias de control propuestos se realizó utilizando un modelo de la planta para observar el comportamiento de estas estrategias frente a las tres pruebas diseñadas. Posteriormente estas estrategias de control fueron implementadas en tiempo real para el motor C.C., utilizando las mismas tres pruebas diseñadas.

Los resultados obtenidos muestran que el esfuerzo de control utilizado es menor con el controlador predictivo y con el controlador difuso con respecto al controlador PI convencional. Sin embargo, con respecto al error no se observan grandes diferencias entre estas estrategias de control.

La posibilidad de predecir las respuestas futuras de la planta permite a los controladores predictivos obtener un mejor desempeño global, lo que fue observado en las pruebas por simulación y en tiempo real. Por otro lado el controlador difuso mostró el menor esfuerzo de control, principalmente debido a su formulación acotada de acción de control.

*A mi abuelo*

## Índice

<b>Calificaciones.....</b>	<b>ii</b>
<b>Resumen de la Memoria .....</b>	<b>iii</b>
<b>Dedicatoria .....</b>	<b>iv</b>
<b>Agradecimientos.....</b>	<b>v</b>
<b>I Introducción .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Motivación .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 Objetivos.....</b>	<b>2</b>
1.2.1 Objetivo General.....	2
1.2.2 Objetivos Específicos.....	2
<b>1.3 Metodología .....</b>	<b>2</b>
<b>1.4 Estructura del Trabajo.....</b>	<b>3</b>
<b>II Control Predictivo.....</b>	<b>4</b>
<b>2.1 Introducción .....</b>	<b>4</b>
<b>2.2 Estrategia de Control MPC “Model Predictive Control” .....</b>	<b>5</b>
<b>2.3 Estructura de un Controlador MPC.....</b>	<b>6</b>
<b>2.4 Modelos de Predicción.....</b>	<b>7</b>
<b>2.5 Control por Matriz Dinámica .....</b>	<b>8</b>
<b>2.6 Perturbaciones .....</b>	<b>11</b>
<b>2.7 Restricciones.....</b>	<b>12</b>
<b>III Control Difuso .....</b>	<b>13</b>
<b>3.1 Introducción .....</b>	<b>13</b>
<b>3.2 Conjunto Difuso .....</b>	<b>13</b>
<b>3.3 Operaciones Básicas con Conjuntos Difusos .....</b>	<b>14</b>
<b>3.4 Modelo Difuso Lingüístico .....</b>	<b>16</b>
3.4.1 Interfaz de Fusificación.....	16
3.4.2 Base de Conocimiento .....	16
3.4.3 Motor de Inferencia.....	17
3.4.4 Interfaz de Defusificación.....	18
<b>IV Sistema de Control Distribuido .....</b>	<b>19</b>
<b>4.1 Introducción .....</b>	<b>19</b>
<b>4.2 Sistema de Control DeltaV .....</b>	<b>22</b>
4.2.1 Hardware DeltaV .....	22
4.2.2 Software DeltaV.....	25

<b>V</b>	<b>Aplicación al Control de un Motor de C.C.....</b>	<b>29</b>
5.1	Introducción .....	29
5.2	Descripción de la Planta .....	30
5.3	Modelo de la Planta .....	33
<b>VI</b>	<b>Estrategias de Control.....</b>	<b>34</b>
6.1	Definición de las estrategias de control.....	34
6.2	Descripción de Pruebas .....	35
6.2.1	Partida del Motor .....	35
6.2.2	Cambio en la Velocidad de Referencia .....	37
6.2.3	Variación en la Carga.....	37
6.3	Pruebas por Simulación .....	37
6.3.1	Partida del Motor .....	38
6.3.2	Cambio en la Velocidad de Referencia .....	44
6.3.3	Variación en la Carga.....	55
<b>VII</b>	<b>Implementación de Estrategias de Control .....</b>	<b>66</b>
7.1	Partida del Motor .....	67
7.1.1	Controlador PI.....	67
7.1.2	Controlador FLC.....	68
7.1.3	Controlador MPC.....	70
7.1.4	Análisis de Resultados .....	72
7.2	Cambio en la Velocidad de Referencia .....	73
7.2.1	Controlador PI1 .....	73
7.2.2	Controlador PI2.....	74
7.2.3	Controlador FLC1 .....	76
7.2.4	Controlador FLC2.....	78
7.2.5	Controlador MPC1 .....	79
7.2.6	Controlador MPC2.....	81
7.2.7	Análisis de Resultados .....	83
7.3	Variación en la Carga.....	84
7.3.1	Controlador PI1 .....	84
7.3.2	Controlador PI2.....	86
7.3.3	Controlador FLC1 .....	88
7.3.4	Controlador FLC2.....	89
7.3.5	Controlador MPC1 .....	91
7.3.6	Controlador MPC2.....	92
7.3.7	Análisis de Resultados .....	94
<b>VIII</b>	<b>Conclusiones.....</b>	<b>95</b>
<b>IX</b>	<b>Bibliografía.....</b>	<b>97</b>
<b>X</b>	<b>Anexos.....</b>	<b>99</b>
10.1	Obtención del Modelo ARX.....	99
10.2	Diseño de Estrategias en el Sistema de Control DeltaV .....	101
10.3	Diseño de Estrategias en Matlab-Simulink .....	104
10.4	Problemas encontrados .....	106

# I Introducción

## 1.1 Motivación

Los controladores convencionales, como los PID, han sido utilizados en la industria durante muchos años debido al buen desempeño que han mostrado controlando los procesos. Pero a medida que los procesos aumentan, tanto en tamaño y complejidad, estos controladores no mantienen un buen desempeño, especialmente cuando la exigencia en la calidad del proceso aumenta.

Los procesos con múltiples variables que interaccionan entre ellas, con retardos significativos, dinámicas complejas o cuando se requiere incluir aspectos económicos, han provocado la necesidad de utilizar nuevas estrategias que logren realizar un mejor control de éstos y permitan satisfacer las nuevas exigencias que se le plantean a los procesos actuales, como una mejor calidad, ahorro de energía, etc.

Es así como ha nacido la necesidad de utilizar nuevas técnicas de control, más avanzadas; aplicándose estrategias basadas en sistemas expertos y lógica difusa, que hacen uso de la experiencia de operación y del conocimiento cualitativo que se puede obtener del proceso, y estrategias basadas en control predictivo, que hacen uso de un modelo del proceso para predecir las acciones futuras para lograr una acción de control óptima.

En este trabajo, se desea diseñar estrategias de control avanzado basadas en la teoría de control predictivo y lógica difusa, que puedan aplicarse a procesos industriales, utilizando un sistema de control distribuido.

Como plataforma de prueba de estas estrategias de control avanzado se utiliza un motor de corriente continua, controlando su velocidad de giro a través del voltaje de armadura.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo General**

El objetivo principal de esta memoria consiste en mostrar las ventajas de las estrategias de control avanzado, basados en la teoría de control predictivo y lógica difusa, en procesos industriales utilizando un sistema de control distribuido.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

1. Diseñar estrategias de control avanzado basadas en lógica difusa y control predictivo.
2. Implementación de las estrategias de control avanzado en el sistema de control distribuido DeltaV para controlar la velocidad de un motor de corriente continua.
3. Obtener una comparación, a nivel regulatorio, entre las estrategias de control avanzado y un control convencional PI.

## **1.3 Metodología**

Para lograr los objetivos establecidos para este trabajo se realiza la siguiente metodología:

- 1º) Diseño de estrategias de control Difuso, Predictivo y PI, utilizando la herramienta *Control Studio* del software de control.
- 2º) Sintonización de las estrategias de control. Para las estrategias de control difuso y PI se utiliza la herramienta *DeltaV Tune* y para el control predictivo se utiliza *DeltaV Predict*.
- 3º) Simulación de las estrategias diseñadas, utilizando un modelo de la planta.
- 4º) Implementación de las estrategias de control en el controlador DeltaV.
- 5º) Análisis de resultados, para cada una de las pruebas realizadas.

## **1.4 Estructura del Trabajo**

El segundo capítulo entrega una descripción general de la estrategia de control predictivo y un análisis del tipo de control utilizado en esta memoria.

El tercer capítulo aborda los sistemas de control difuso lingüístico, sus componentes y modo de operar.

El cuarto capítulo comienza con una introducción sobre lo que es un sistema de control distribuido para luego continuar con la descripción del sistema de control utilizado, indicando los aspectos más generales de él y los utilizados durante el desarrollo de este trabajo.

En el quinto capítulo se especifica el proceso que se utiliza como plataforma de pruebas de las estrategias de control. Mostrando las partes que lo componen y lo que se desea controlar del proceso.

El sexto capítulo presenta las estrategias de control a utilizar, las pruebas que se realizarán a cada una de ellas y simulaciones que permiten observar el comportamiento de las estrategias antes de su implementación práctica en el sistema de control distribuido.

El séptimo capítulo muestra los resultados obtenidos al implementar las estrategias de control en el sistema de control. Se realiza un análisis por cada prueba analizando los resultados según la estrategia para luego realizar una comparación entre las estrategias diseñadas.

Por último, en el octavo capítulo se exponen las conclusiones obtenidas en este trabajo.

## II Control Predictivo

### 2.1 Introducción

El control predictivo basado en modelos (*Model Predictive Control*, MPC) se presenta actualmente como una atractiva herramienta de control que permite incorporar criterios operacionales a través de la utilización de una función objetivo y restricciones para el cálculo de las acciones de control.

El término Control Predictivo no designa a una estrategia de control particular sino a un conjunto de métodos de control que hacen uso explícito de un modelo del proceso para obtener la señal de control optimizando una función objetivo. Estos métodos de control llevan a controladores que tienen básicamente la misma estructura y los mismos elementos, que corresponde a [6]:

- Uso explícito de un modelo para predecir la evolución del proceso en los instantes futuros.
- Optimización de una función objetivo.
- Utilización de un horizonte de control infinito y deslizante que implica el cálculo de la secuencia de control para todo el horizonte pero con la aplicación de la primera señal de la secuencia y la repetición de todo el proceso en el siguiente instante de muestreo.

Los distintos algoritmos de control predictivo difieren en el tipo de modelo utilizado para representar al proceso y a las perturbaciones y la función objetivo considerada.

El control predictivo presenta una serie de ventajas sobre otros métodos, entre las que se encuentran las siguientes:

- Se puede utilizar para controlar una gran variedad de procesos, desde procesos muy simples hasta procesos con dinámicas complejas como procesos con grandes tiempos muertos, procesos de fase no mínima, procesos inestables o procesos multivariables.
- Su carácter predictivo lo hace compensar intrínsecamente los tiempos muertos.
- Introduce un control anticipativo (*feedforward*) y de forma natural se compensan las perturbaciones medibles.
- Es muy útil cuando se conocen las referencias futuras, como ocurre en el caso de robótica o procesos por lotes.
- Permite tratar las restricciones de una forma sistemática y conceptualmente muy simple durante la fase de diseño.

## 2.2 Estrategia de Control MPC “Model Predictive Control”

La metodología de todos los controladores pertenecientes a la familia de control predictivo se caracteriza por la siguiente estrategia, representada en la figura 2.2.1 [6]:

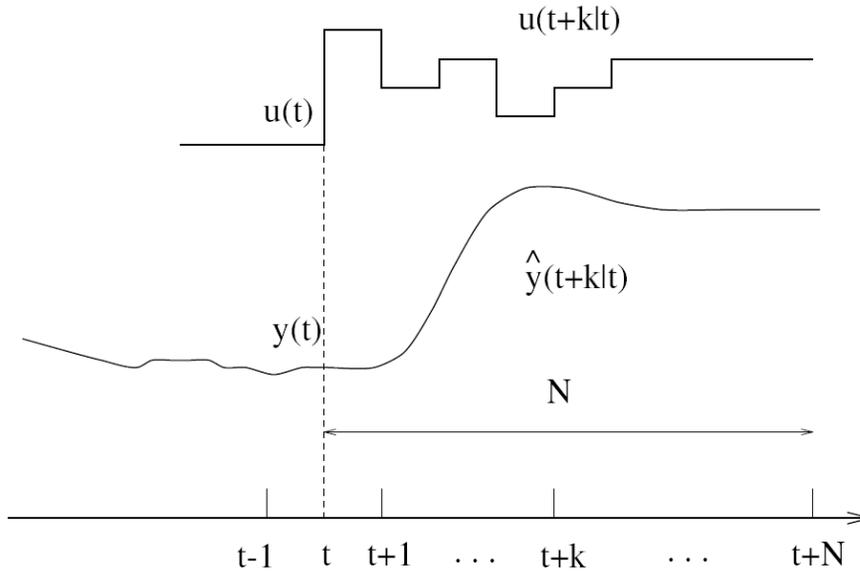


Figura 2.2.1: Estrategia Control Predictivo

- 1º) Las salidas futuras para un horizonte de predicción  $N$  se predicen cada instante  $t$  utilizando el modelo del proceso. Estas predicciones de la salida  $\hat{y}(t+k|t)$  para  $k=1, \dots, N$  dependen de los valores conocidos hasta el instante  $t$  (entradas y salidas pasadas) y además pueden depender de las señales de control futuras  $u(t+k|t)$ , para  $k=0, \dots, N-1$ , que han de ser calculadas y enviadas al sistema.
- 2º) La secuencia de señales de control futuras  $u(t+k|t)$  se calcula optimizando una función objetivo para mantener al proceso lo más cerca posible de la trayectoria de referencia dada. Este criterio toma normalmente la forma de una función cuadrática del error entre la salida predicha y la trayectoria de referencia deseada. En la mayor parte de los casos se incluye también el esfuerzo de control dentro de la función objetivo.
- 3º) La señal de control  $u(t|t)$  se envía al proceso mientras que el resto de las señales calculadas no se consideran, ya que en el instante siguiente de muestreo  $t+1$  se tienen los valores de todas las variables controladas hasta el instante  $t+1$  y variables manipuladas hasta  $t$ .

### 2.3 Estructura de un Controlador MPC

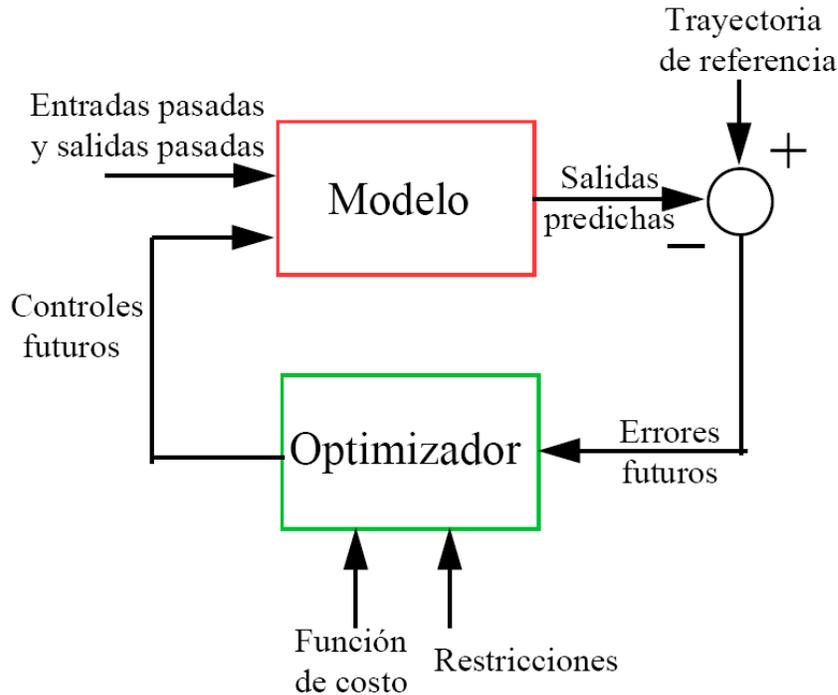


Figura 2.3.1: Estructura Básica de un MPC

La figura 2.3.1 muestra la estructura básica de las estrategias de control predictivo basado en modelos. Se usa un modelo para predecir la evolución de la salida del proceso a partir de las señales de entrada y salidas conocidas y de las acciones de control futuras. Estas acciones de control futuras se calculan con el optimizador, que considera una función de costo y las posibles restricciones [6][7][14][21].

El modelo de proceso juega un papel decisivo en el controlador. El modelo elegido debe ser capaz de capturar la dinámica del proceso para predecir de forma precisa la evolución del sistema. Al mismo tiempo, debe ser suficientemente simple de implementar y entender. Las distintas metodologías del control predictivo difieren fundamentalmente en el tipo de modelo utilizado.

El optimizador es otra parte fundamental de la estructura, ya que permite obtener las acciones de control a aplicar. Si la función de costo es cuadrática, el modelo lineal y no existen restricciones, se puede obtener una solución explícita. Si este no es el caso se ha de acudir a un algoritmo numérico de optimización que requiere mayor capacidad de cálculo. El tamaño del problema resultante depende del número de variables, de los horizontes de control y predicción y del número de restricciones.

## 2.4 Modelos de Predicción

Hasta el momento se ha mostrado la forma genérica de un problema MPC. Como ya se mencionó, el tipo de modelo que se use para capturar la dinámica del proceso juega un papel importante en el controlador. A pesar de que el procedimiento general es prácticamente el mismo, los pasos necesarios para formular los algoritmos de control son ligeramente distintos según el modelo utilizado [6].

Dentro de los tipos de modelos que se utilizan en un MPC encontramos:

### 1. Modelo de Función de Transferencia

La formulación más conocida que usa este tipo de modelo es el Control Predictivo Generalizado (*Generalized Predictive Control*, GPC), el cual se ha convertido en uno de los métodos más populares tanto en el mundo industrial como en el académico.

### 2. Modelo de Convolución

Los modelos de convolución engloban los modelos de respuesta al impulso y respuesta al escalón, de gran éxito en la industria por ser muy intuitivos y permitir un procedimiento de identificación relativamente sencillo. Estos tipos de modelo han dado lugar a dos de los controladores más extendidos en la práctica: Control por Matriz Dinámica (*Dynamic Matrix Control*, DMC) y el Control Algorítmico Basado en Modelo (*Model Algorithmic Control*, MAC).

### 3. Modelo en el Espacio de Estados

Los modelos de espacio de estados o descripción interna se pueden usar también para formular el problema de control predictivo. Además, los principales resultados teóricos relacionados con la estabilidad provienen de este tipo de formulación, que puede ser utilizada tanto para problemas monovariantes como multivariantes.

De estos tres tipos mencionados utilizaremos el modelo de convolución, específicamente uno basado en DMC<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Se utilizará DMC debido a que el sistema de control distribuido empleado en este trabajo (DCS DeltaV) lo utiliza en su control predictivo. Esto se menciona en el capítulo IV.

## 2.5 Control por Matriz Dinámica

El controlador DMC ha tenido un gran éxito debido a su capacidad para tratar procesos multivariables. A continuación se presentará los fundamentos de un controlador DMC para el caso monovariante, ya que permitirá una mejor comprensión de él (sin perderse en la notación matemática que implica al trabajar en un caso multivariante) y permitirá una fácil asimilación con el proceso que se utilizará en esta memoria (que consiste en un proceso SISO) [2][6][25].

Para el controlador DMC se usa un modelo de respuesta al escalón para capturar la dinámica del proceso, mientras que la perturbación se considera constante a lo largo del horizonte. El procedimiento para obtener las predicciones se muestra a continuación.

Al usar el siguiente modelo de respuesta al escalón

$$y(t) = \sum_{i=1}^{\infty} g_i \cdot \Delta u(t-i)$$

Los valores predichos de la salida a lo largo del horizonte son:

$$\begin{aligned} \hat{y}(t+k/t) &= \sum_{i=1}^{\infty} g_i \cdot \Delta u(t+k-i) + \hat{n}(t+k/t) \\ &= \sum_{i=1}^k g_i \cdot \Delta u(t+k-i) + \sum_{i=k+1}^{\infty} g_i \cdot \Delta u(t+k-i) + \hat{n}(t+k/t) \end{aligned}$$

Como se considera que las perturbaciones son constantes en el futuro,

$$\hat{n}(t+k/t) = \hat{n}(t/t) = y_m(t) - \hat{y}(t/t)$$

Se puede escribir:

$$\hat{y}(t+k/t) = \sum_{i=1}^k g_i \cdot \Delta u(t+k-i) + \sum_{i=k+1}^{\infty} g_i \cdot \Delta u(t+k-i) + y_m(t) - \sum_{i=1}^{\infty} g_i \cdot \Delta u(t-i)$$

Es decir, la predicción viene dada por:

$$\hat{y}(t+k/t) = \sum_{i=1}^k g_i \cdot \Delta u(t+k-i) + f(t+k)$$

Donde  $f(t+k)$  es la respuesta libre del sistema, que como se sabe no depende de las acciones de control futuras, y viene dada por:

$$f(t+k) = y_m(t) + \sum_{i=1}^{\infty} (g_{k+i} - g_i) \cdot \Delta u(t-i)$$

Si el proceso es asintóticamente estable los coeficientes  $g_i$  de la respuesta al escalón tienden a valores constantes tras un cierto número  $N$  de periodos de muestreo<sup>2</sup>, por lo que se puede considerar que

$$g_{k+i} - g_i \approx 0, \quad i > N$$

Y por lo tanto se puede escribir la respuesta libre como

$$f(t+k) = y_m(t) + \sum_{i=1}^N (g_{k+i} - g_i) \cdot \Delta u(t-i)$$

Ahora se pueden calcular las predicciones a lo largo del horizonte de predicción ( $k = 1, \dots, p$ ), considerando  $m$  acciones de control (horizonte de control):

$$\begin{aligned} \hat{y}(t+1/t) &= g_1 \cdot \Delta u(t) + f(t+1) \\ \hat{y}(t+2/t) &= g_2 \cdot \Delta u(t) + g_1 \cdot \Delta u(t+1) + f(t+2) \\ &\vdots \\ \hat{y}(t+p/t) &= \sum_{i=p-m+1}^p g_i \cdot \Delta u(t+p-i) + f(t+p) \end{aligned}$$

Definiendo la matriz dinámica del sistema  $G$  como

$$G = \begin{bmatrix} g_1 & 0 & \cdots & 0 \\ g_2 & g_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_m & g_{m-1} & \cdots & g_1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_p & g_{p-1} & \cdots & g_{p-m+1} \end{bmatrix}$$

Se puede escribir la predicción como

$$\hat{y} = G \cdot \Delta u + f$$

Donde  $G$  está formada por  $m$  (horizonte de control) columnas de la respuesta al escalón del sistema deslizadas hacia abajo de forma apropiada,  $\hat{y}$  es un vector de dimensión  $p$  (horizonte de predicción) que contiene las predicciones,  $\Delta u$  tiene dimensión  $m$  y contiene los incrementos en las acciones de control y  $f$  es el vector de la respuesta libre.

---

<sup>2</sup> Si el sistema no es asintóticamente estable, no existe tal valor  $N$  y  $f(t+k)$  no se puede calcular.

Las variables manipuladas se calculan de forma que minimicen la siguiente función objetivo cuadrática, que incluye el esfuerzo de control:

$$J = \sum_{j=1}^p |\hat{y}(t + j/t) - w(t + j)|^2 + \sum_{j=1}^m \lambda \cdot |\Delta u(t + j - 1)|^2$$

Donde  $w(t + j)$  representa la trayectoria de referencia deseada.

En el caso que no existan restricciones, la solución a la minimización de la función objetivo  $J = e \cdot e^T + \lambda \cdot \Delta u \cdot \Delta u^T$ , donde  $e$  es el vector de errores futuros a lo largo del horizonte, se puede obtener de forma analítica igualando a cero la derivada de  $J$ , entregando:

$$\Delta u = (G^T \cdot G + \lambda \cdot I)^{-1} \cdot G^T \cdot (w - f)$$

## 2.6 Perturbaciones

Muchos procesos se encuentran sometidos a perturbaciones externas provocadas por cambios en las variables que, en algunos casos, se pueden medir. Este es un escenario típico en procesos cuyas salidas se ven afectadas por variaciones en el régimen de carga. Este tipo de perturbaciones, también conocidas como perturbaciones en la carga, pueden ser abordadas mediante el uso de acción *feedforward* [6].

La idea es que si se conoce el efecto de estas perturbaciones en la salida del sistema entonces pueden ser incluidas en las predicciones. Esto permite que los controladores predictivos incluyan acción *feedforward*. Las perturbaciones medibles se pueden incluir fácilmente en las ecuaciones de predicción, ya que pueden ser tratadas como entradas al sistema.

Para sistemas lineales, el principio de superposición permite calcular las predicciones de la salida como la suma del efecto de ambas entradas: la variable manipulable y la perturbación medible. Por lo tanto, cualquiera que sea el controlador usado (GPC, DMC, etc.), la predicción viene dada por:

$$\hat{y} = \hat{y}_u + \hat{y}_d = G \cdot \Delta u + f + D \cdot \Delta d + f_d$$

Donde  $\hat{y}_d$  es la contribución de la perturbación medible a la salida del sistema,  $D$  es una matriz similar a  $G$  que contiene los coeficientes de la respuesta del sistema a un escalón en la perturbación,  $\Delta d$  es el vector de incrementos en la perturbación y  $f_d$  es la parte de la respuesta que no depende de la perturbación.

El término  $D \cdot \Delta d$  depende de las perturbaciones futuras. En algunos casos, cuando éstas están relacionadas con la carga, las perturbaciones futuras son conocidas o se pueden predecir usando tendencias u otros medios. Si éste es el caso, el término correspondiente a las perturbaciones futuras puede ser calculado. En la mayoría de los casos se considera que las futuras perturbaciones de carga van a ser constantes durante el horizonte e iguales al último valor medido (es decir,  $d(t+j) = d(t)$ ) y entonces  $\Delta d(t+j) = 0$  y el segundo término de esta ecuación desaparece.

Entonces, la predicción viene dada en la forma genérica de respuesta libre y forzada:

$$\hat{y} = G \cdot \Delta u + f'$$

Donde  $f'$  incluye el efecto de la respuesta libre debido a la variable manipulada y el efecto de la perturbación, que es parte de la nueva respuesta libre, ya que no depende de la secuencia de acciones de control y por tanto es una constante que no influye en la minimización. Esta ecuación es el único cambio que se debe hacer en la formulación del controlador para incluir el efecto de las perturbaciones medibles.

## 2.7 Restricciones

Hasta el momento sólo se ha visto el problema del MPC sin restricción alguna en los rangos posibles de operación de las señales utilizadas. Pero esto no es realista, ya que todos los procesos están sometidos a restricciones. Los actuadores tienen un rango limitado de operación y una velocidad de movimiento también limitado, como ocurre con las válvulas de control que están limitadas por la posición correspondiente a su cierre total o apertura total. También existen limitantes en las variables de proceso por razones constructivas o de seguridad, como en el caso de los niveles máximos en los estanques o la presión admisible en tuberías y depósitos.

La forma usual de tratar este problema es calcular la señal de control  $u(t)$  y aplicarla al proceso. Si  $u(t)$  viola las restricciones, se satura a su límite por el programa de control que vigila este aspecto o por el propio actuador que no puede dar mayor actuación que la máxima. El caso en que la violación se vaya a producir en los instantes de tiempo futuro  $u(t+1), \dots, u(t+N)$  ni siquiera se considera. Esta forma de operar no garantiza la optimalidad del problema cuando las restricciones son violadas, por lo que el principal objetivo del control predictivo, que es calcular la mejor señal de control posible optimizando un índice de funcionamiento, no se cumple.

El no considerar plenamente las restricciones en las variables manipuladas puede resultar en mayores valores de la función objetivo al saturar actuadores y por lo tanto peores resultados. El principal motivo para considerar restricciones consiste en que violar las restricciones de las variables controladas puede ser mucho más costoso y peligroso ya que esto puede originar daños en los equipos y pérdidas en la producción. Al contrario de lo que ocurre con las variables manipuladas, que en último extremo podemos saturar para mantenerlas dentro de los límites, las variables de proceso son fijadas por este y no podemos manipularlas a voluntad. Una de las ventajas del control predictivo es su capacidad de predicción y anticiparse a la violación de las restricciones [6][14].

Las restricciones que normalmente actúan en un proceso sobre las variables manipuladas, la velocidad de cambio de las variables manipuladas y las variables de proceso se pueden expresar como:

$$\begin{aligned}U_{\min} &\leq u(t) \leq U_{\max} & \forall t \\ \Delta U_{\min} &\leq u(t) - u(t-1) \leq \Delta U_{\max} & \forall t \\ Y(t)_{\min} &\leq y(t) \leq Y(t)_{\max} & \forall t\end{aligned}$$

El último conjunto de restricciones fuerza a las variables a seguir trayectorias dentro de bandas.

## III Control Difuso

### 3.1 Introducción

La Lógica Difusa (*Fuzzy Logic*) ha surgido como una herramienta importante para el control de subsistemas y procesos industriales complejos, así como también para la electrónica de entretenimiento y hogar, sistemas de diagnóstico y otros sistemas expertos.

A diferencia de la lógica Booleana, la lógica difusa es básicamente una lógica multivaluada que permite valores intermedios para poder definir evaluaciones como sí/no, verdadero/falso, alto/bajo, etc., por lo que se considera un número infinito de grados de valor entre verdadero y falso. La lógica difusa define grados de relación y grados de verdad de algo, algunas cosas pueden ser parcialmente verdaderas y parcialmente falsas simultáneamente [3][8][15][23].

En esencia un controlador lógico difuso, contiene un algoritmo que es capaz de convertir una estrategia de control lingüística en una estrategia de control automático. Con la lógica difusa se pueden diseñar aplicaciones para que las máquinas respondan con mayor inteligencia a la imprecisión y a las condiciones del mundo exterior, con lo que se busca imitar el comportamiento humano. La creación de un sistema de control con lógica difusa es forjar un sistema experto, en donde el comportamiento del sistema va a estar basado totalmente en el conocimiento del experto o de la persona que aporta sus conocimientos empíricos para el funcionamiento de ésta. Los conocimientos del experto permiten diseñar la estrategia de control basado en lógica difusa, sin conocer ningún modelo del sistema a controlar.

### 3.2 Conjunto Difuso

Un conjunto difuso puede ser visto como una generalización del conjunto binario que toma sólo los valores 0 ó 1. En la lógica binaria la transferencia de un estado a otro es instantánea, es decir, un elemento pertenece a un estado o no. En cambio en la lógica difusa la transición puede ser gradual, es decir, un elemento puede tener parcial relación en múltiples estado [3][23][23].

Para un conjunto difuso  $A = \{(x, u_A(x)) / x \in X\}$ , se tiene que el elemento  $x$  pertenece al conjunto  $A$  con un grado de pertenencia  $u_A(x)$ , que puede variar entre 0 y 1. Por lo tanto, una variable puede ser caracterizada por diferentes valores lingüísticos, cada uno de los cuales representa un conjunto difuso.

Por ejemplo, la velocidad puede ser caracterizada por valores lingüísticos como “Bajo”, “Medio” y “Alto”, que representan “una velocidad menor que 40 Km/h”, “una velocidad cercana a 55 Km/h” y “una velocidad sobre 70 Km/h” respectivamente. Estos términos se asocian a conjuntos difusos con funciones de pertenencia como las mostradas en la siguiente figura.

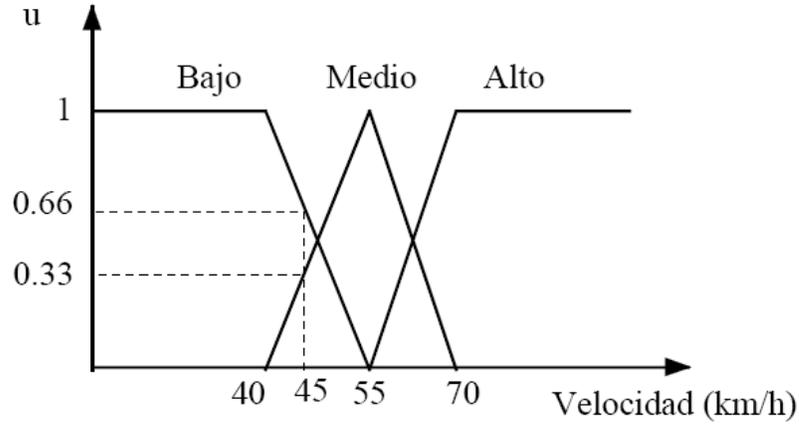


Figura 3.2.1: Funciones de Pertenencia

Por lo tanto, si la velocidad es 45 Km/h, existen grados de pertenencia 0.66, 0.33 y 0 a los conjuntos difusos “Bajo”, “Medio” y “Alto” respectivamente.

La conexión de conjuntos difusos hace posible expresar reglas de tipo “if... then...”, conteniendo condiciones (premisas) y acciones (consecuencias), y se representan de la forma:

$$if \langle condiciones \rangle then \langle acciones \rangle$$

### 3.3 Operaciones Básicas con Conjuntos Difusos

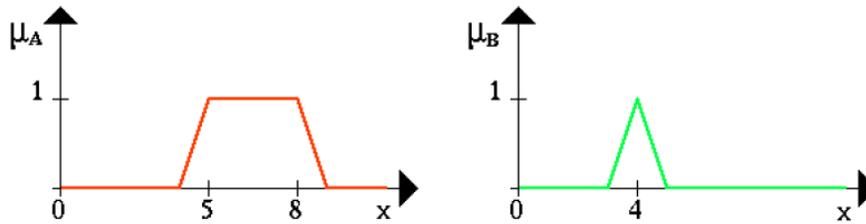


Figura 3.3.1: Funciones de Pertenencia para Conjuntos Difusos A y B

Dados dos conjuntos difusos A y B en el mismo universo X, con funciones de pertenencia  $\mu_A$  y  $\mu_B$  respectivamente, se pueden definir las siguientes operaciones básicas [4][23]:

a) **Unión:** La función de pertenencia de la unión de A y B se define como:

$$\mu_{A \cup B} = \max\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}$$

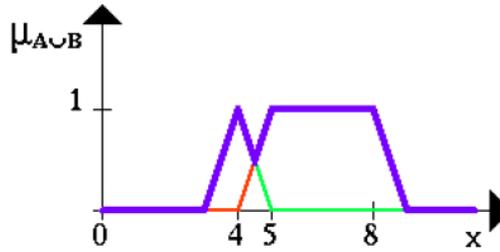


Figura 3.3.2: Unión

b) **Intersección:** La función de pertenencia de la intersección de A y B es:

$$\mu_{A \cap B} = \min\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}$$

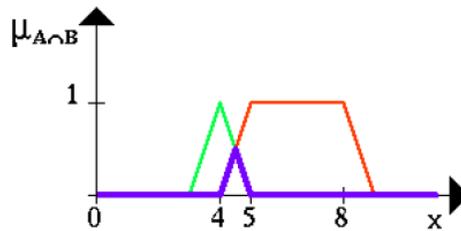


Figura 3.3.3: Intersección

c) **Complemento:** La función de pertenencia del complemento de A y B se define como:

$$\mu_{\bar{A}} = 1 - \mu_A(x)$$

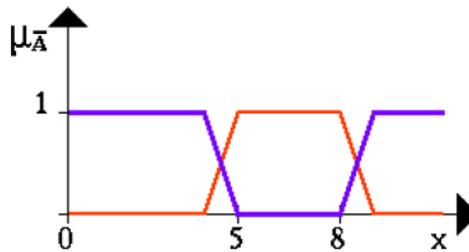


Figura 3.3.4: Complemento

### 3.4 Modelo Difuso Lingüístico

Los modelos difusos lingüísticos se basan en un conjunto de reglas heurísticas donde las variables lingüísticas de las entradas y salidas se representan por conjuntos difusos [3][4][8][15].

Este tipo de modelo difuso se caracteriza por los siguientes componentes: interfaz de fusificación, base de conocimiento, motor de inferencia e interfaz de defusificación.

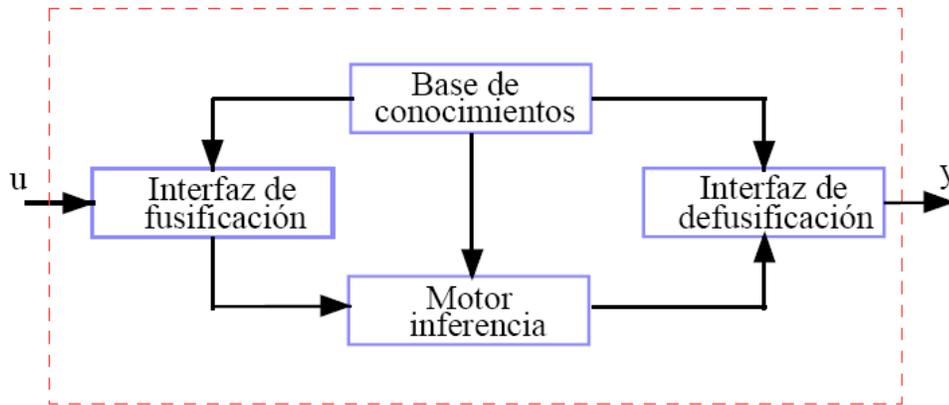


Figura 3.4.1: Componentes de un Modelo Difuso Lingüístico

#### 3.4.1 Interfaz de Fusificación

Este componente es el encargado de transformar las variables de entrada del modelo ( $u$ ) en variables difusas. Para esta interfaz se deben tener definidos los rangos de variación de las variables de entrada y los conjuntos difusos asociados con sus respectivas funciones de pertenencia.

#### 3.4.2 Base de Conocimiento

Contiene las reglas lingüísticas del control y la información referente a las funciones de pertenencia de los conjuntos difusos.

Las reglas lingüísticas, tienen típicamente la siguiente forma:

$$\text{Si } u_1 \text{ es } A \text{ y } u_2 \text{ es } B \text{ entonces } z \text{ es } C$$

donde  $A$ ,  $B$  y  $C$  son los conjuntos difusos de las variables de entrada  $u_1$  y  $u_2$ , y de la variable de salida  $z$  respectivamente.

### 3.4.3 Motor de Inferencia

Componente encargado de calcular las variables de salida a partir de las variables de entrada, mediante las reglas del controlador y la inferencia difusa, entregando conjuntos difusos de salida.

Por ejemplo, dada una base de conocimiento con  $n$  reglas del tipo:

Si  $u_1$  es  $A_i$  y  $u_2$  es  $B_i$  entonces  $z$  es  $C_i$

la secuencia de cálculos que realiza el motor de inferencia incluye:

- Determinar el grado de cumplimiento  $W_i$  de cada regla a partir de los grados de pertenencia de las variables de entrada obtenidos en la etapa de fusificación, es decir,

$$W_i = \min(u_{A_i}, u_{B_i})$$

debido a que las premisas de las reglas están unidos por operadores AND, definidos como la intersección de conjuntos difusos.

- Para cada regla se tiene una consecuencia “ $z$  es  $C$ ”, que tiene asociado una función de pertenencia  $u_{C_i}$ . Por lo tanto, se tiene un conjunto de salida  $C'_i$ , cuya función de pertenencia es:

$$u_{C'_i} = \min(W_i, u_{C_i})$$

- Para evaluar el conjunto total de reglas, se unen los conjuntos difusos  $C'_i$  resultantes de cada regla, generándose un conjunto de salida con la función de pertenencia:

$$u_C = \min(u_{C'_i}) \quad i = 1, \dots, n$$

De esta forma, se obtiene una salida difusa del controlador, con una función de pertenencia  $u_C$ .

### 3.4.4 Interfaz de Defusificación

Este componente entrega las salidas discretas y determinísticas a partir de los conjuntos difusos  $C'$  obtenidos como resultado de la inferencia.

Existen diferentes métodos de defusificación, dentro de los cuales se tienen:

- **Método del Máximo:** la salida corresponde al valor para el cual la función de pertenencia  $u_{C'}$  alcanza su máximo.
- **Media del Máximo:** la salida es el promedio entre los elementos del conjunto  $C'$  que tienen un grado de pertenencia máximo.
- **Centro de Área:** genera como salida el valor correspondiente al centro de gravedad de la función de pertenencia del conjunto de salida  $C'$ .

## IV Sistema de Control Distribuido

### 4.1 Introducción

El concepto de control distribuido se basa en una vista estructural del total de una planta. Esta perspectiva, que se tiene de la planta, se muestra a través de niveles jerárquicos, pasando desde el nivel inferior correspondiente al de medición y control de los procesos hasta los niveles mayores donde se realizan las tareas administrativas [13].

A partir de este concepto, un Sistema de Control Distribuido (*Distributed Control System*, DCS) se puede considerar como una pirámide jerárquica de 5 pisos o niveles, donde cada nivel posee características y funciones específicas.



Figura 4.1.1: Pirámide Jerárquica para un DCS

La ventaja de tener este sistema en forma piramidal, permite que cada nivel pueda acceder tanto a los datos que corresponden a su función específica como a los correspondientes de los niveles inferiores a él.

Como se mencionó, cada nivel corresponde a una función específica dentro planta, lo que ha permitido dividir estas funciones tal como se muestra a continuación:

#### **Nivel 1: Medición y Control del Proceso.**

Este nivel corresponde a la base de la pirámide y es donde se encuentran los instrumentos de medición y los dispositivos de control.

Éste es el encargado de realizar la medición de las variables y del control del proceso. Puede funcionar en forma independiente de los otros niveles, lo que permite que su labor se realice a pesar de la existencia de errores en la comunicación con los niveles superiores, asegurando así la operabilidad del proceso.

## **Nivel 2: Supervisión del Proceso**

Nivel en el cual un operador monitorea y controla el proceso a través de una consola o estación de trabajo que le permite tener una vista general de la planta o del proceso, más la posibilidad de obtener información más detallada de un área pequeña que necesite atención.

El operador puede monitorear varios procesos y operaciones presentes en el DCS desde su consola. La comunicación con el nivel 1 le permite al operador realizar ajustes en el control del proceso o realizar un control manual cuando ocurren fallas o perturbaciones<sup>3</sup>.

En este nivel se tiene acceso a datos históricos de los procesos y a sus gráficos correspondientes, lo que permite al operador realizar la supervisión diaria de cada uno de los procesos presente en la planta.

## **Nivel 3: Manejo del Proceso**

Este nivel también corresponde a un nivel de supervisión, pero se diferencia del nivel 2, ya que es aquí donde los ingenieros desarrollan e instalan el software que dirige las operaciones del sistema de control, en otras palabras, en este nivel se realizan las tareas de configuración. La comunicación con el sistema de control se realiza a través de un terminal remoto o desde estaciones de trabajo.

## **Nivel 4: Manejo de la Planta**

Nivel de carácter más administrativo. Se observan informes que permitan un mejor desempeño del punto de vista administrativo, como un informe de costos. También es aquí donde se planifican los programas de producción de la planta.

## **Nivel 5: Manejo Corporativo**

Es aquí donde es necesario observar todos los niveles, se utilizan tanto la información del proceso como de producción para apoyar la planificación financiera y poder realizar decisiones corporativas.

Pero no sólo ésta pirámide de jerarquía caracteriza a un DCS, sino que también una distribución funcional (que esta fuertemente ligada a los niveles de la pirámide) y una distribución geográfica.

La distribución funcional consiste en la existencia de subsistemas para cada nivel de la pirámide, los cuales cumplen las funciones específicas acorde al nivel que pertenecen. Es así como existe un subsistema que se preocupa de la parte de la interfaz con el operador, otro subsistema que se encarga del procesamiento de los algoritmos de control (procesadores de control) y un subsistema que administra las señales de entrada y salida, entre otros.

La distribución geográfica se debe a que es usual que las salas de operación se encuentren alejadas del proceso, los procesadores de control en una sala cercana a la sala de operación o de las interfaces al operador y que los módulos de entrada y salida se ubiquen cerca del proceso; esta

---

<sup>3</sup> Esto depende de la configuración del sistema, pues un operador puede tener acceso (permiso) para cambiar los set-point de algunos lazos de control, pero puede que no tenga acceso para alterar el control del proceso.

distribución geográfica a su vez permite identificar los bloques funcionales antes mencionados, tales como interfaz con operarios, procesadores de control, proceso, etc.

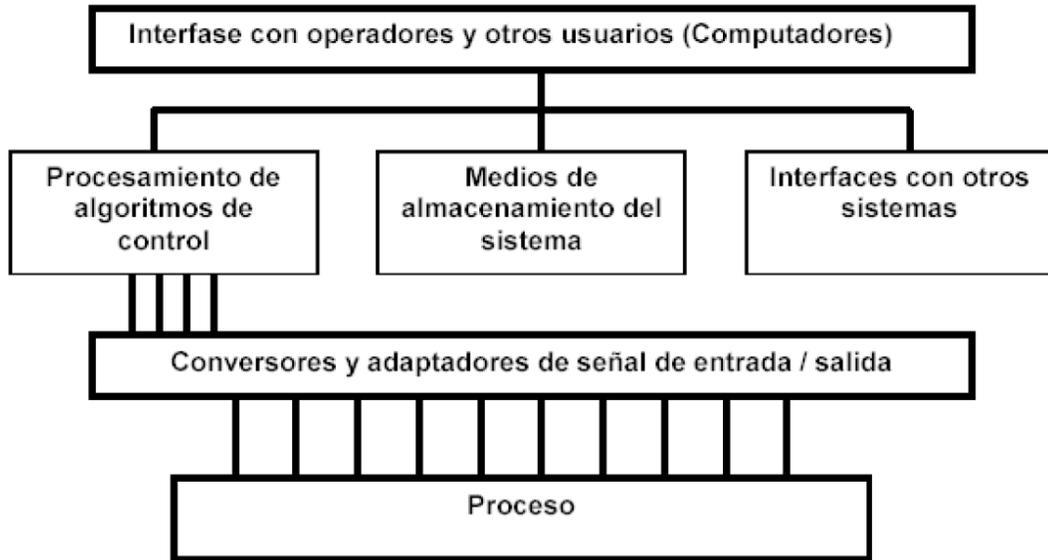


Figura 4.1.2: Distribución Geográfica/Arquitectura de un Sistema de Control

Un DCS utiliza una red de comunicación que permite interconectar sensores, controladores, terminales de operación y actuadores; lo que permite que esta distribución geográfica sea posible.

Englobando todo lo anterior, se puede decir que un DCS consiste en una estructura jerárquica tanto a nivel funcional como a nivel geográfica, complementando ambos niveles. Es así como se puede identificar claramente el nivel 1 de la pirámide (Medición y Control de Proceso) a nivel geográfico, que en el caso de diagrama de la figura 4.1.2 corresponderían a: Procesamiento de Algoritmos de Control, Convertidores y Adaptadores de señal de Entrada/Salida y Proceso (donde se encuentran los sensores de medición y los actuadores).

## 4.2 Sistema de Control DeltaV

En este trabajo se utiliza el sistema de control distribuido DeltaV, de la empresa *Emerson Process Management*.

El sistema de control DeltaV se divide en dos componentes: el hardware y el software.

### 4.2.1 Hardware DeltaV



Figura 4.2.1: Controlador DeltaV y módulos I/O

El sistema de control DeltaV está constituido, en su forma básica, por [12][13]:

- Una Red de Control, que proporciona la comunicación entre los controladores y las *Workstations*.
- Una Workstation (*Professional PLUS*), destinada a proporcionar la interface gráfica al usuario del proceso.
- Un Controlador DeltaV, que es el encargado de realizar el control y administrar las comunicaciones entre los subsistemas y la red de control.
- Un subsistema de Entradas/Salidas, cuya función es proporcionar la comunicación desde y hacia los dispositivos de terreno.
- Una sistema de alimentación para el Sistema DeltaV. (*System Power Supply*)
- Una fuente de alimentación, destinada a alimentar a los dispositivos de terreno conectados al DeltaV. (*Power Supply*).
- Un Identificador del Sistema (*System Identifier*)<sup>4</sup>, entrega una identificación única al sistema DeltaV y permite realizar cambios en el sistema.

---

<sup>4</sup> Llave que se conecta en el puerto paralelo de la *Professional PLUS*.

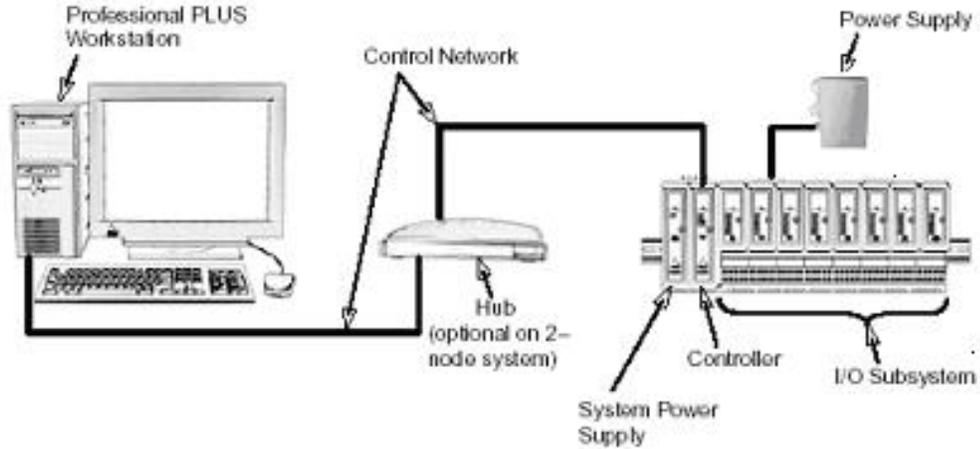


Figura 4.2.2: Configuración Básica del Sistema de Control DeltaV

El sistema DeltaV utiliza una Red de Control *Ethernet* dedicada a las comunicaciones entre los controladores y las *Workstations*, utilizando un protocolo de comunicación basado en TCP/IP. Esta red emplea dispositivos *Hub* o *Switch* como interface entre los diferentes nodos.

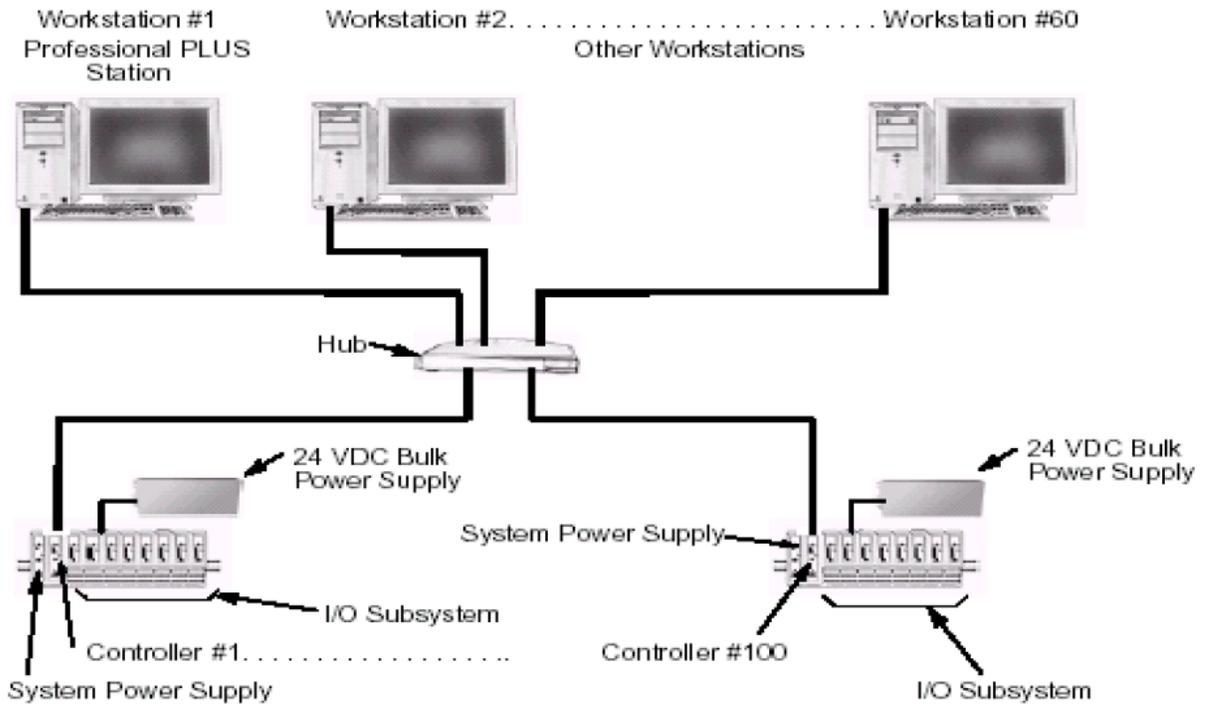


Figura 4.2.3: Red de Control DeltaV

El hardware utilizado en esta memoria es el siguiente:

- Una Professional Plus (*Workstation*)
- Red de Control (redundante)
- Un Controlador DeltaV
- Una Fuente de Poder para el Sistema DeltaV
- Una Fuente de Poder de 24 VDC
- Seis subsistemas Entradas/Salidas (I/O)
  - Un módulo de Entrada Analógica de 8 canales (4-20 mA)
  - Un módulo de Salida Analógica de 8 canales (4-20 mA)
  - Un módulo de Entrada Digital de 8 canales
  - Un módulo de Salida Digital de 8 canales
  - Un módulo FieldBus
  - Un módulo Serial

De los seis módulos I/O sólo se utilizarán los módulos de entrada y salida analógica.



**Figura 4.2.4: Sistema de Control DeltaV**

## 4.2.2 Software DeltaV

El control en el sistema DeltaV está basado en *módulos*. Un módulo es la entidad de control lógica más pequeña del sistema. Generalmente, un módulo contiene una entidad de control etiquetada con su lógica asociada tal como un lazo de control o un motor [12][13][25].

El software DeltaV soporta tres tipos de idiomas de control comunes para la configuración: bloques funcionales, funciones secuenciales (*sequential function charts*, SFC), y texto estructurado. Dentro de un sólo módulo de control, se puede entremezclar estos idiomas de control.

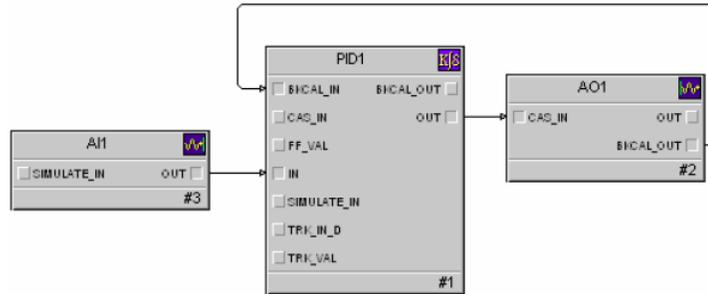


Figura 4.2.5: Configuración por Bloques Funcionales

Dentro de los bloques funcionales que posee el sistema DeltaV se encuentran bloques para control análogo (como PID), bloques I/O (análogos y discretos), bloques lógicos, bloques de control avanzado (MPC, FLC y Redes Neuronales), entre otros.

El sistema DeltaV se divide en niveles de modo que los usuarios puedan elegir el nivel del detalle en el cual desean o necesitan trabajar. La figura siguiente muestra los niveles en los cuales se divide el sistema de DeltaV

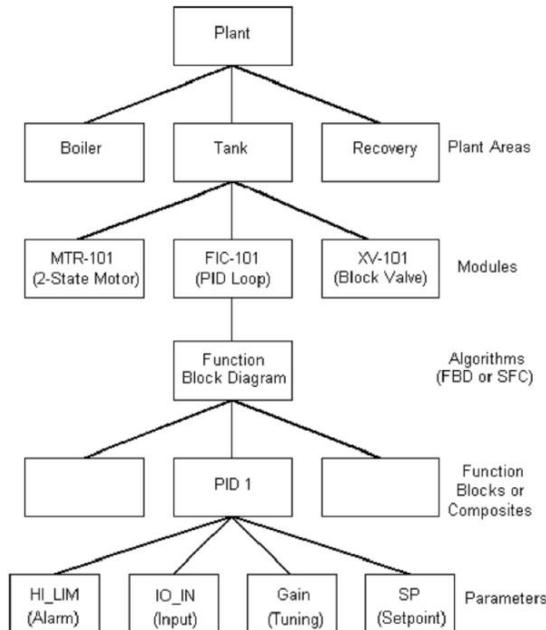


Figura 4.2.6: Estructura Jerárquica del Sistema DeltaV

El software del sistema DeltaV incluye una variedad de aplicaciones que se utilizan en la configuración, en la operación y en la optimización del proceso. Entre ellas se encuentran las siguientes:

- ❖ **DeltaV Explorer**  
Esta aplicación permite definir los componentes del sistema (como las áreas, nodos, módulos y alarmas) y tener una visión total de la estructura y composición del sistema.
- ❖ **Control Studio**  
Es la aplicación usada para diseñar y modificar los módulos y esquemas que forman parte de la estrategia de control.
- ❖ **DeltaV Predict**  
Corresponde a un conjunto de herramientas para la implementación de control predictivo (multivariable) basado en modelos en el ambiente DeltaV.  
*DeltaV Predict* está constituido por:
  - Bloque funcional *MPC*
  - Bloque funcional *MPC Simulation*
  - Dinamos
  - La aplicación *MPC Operate*
- ❖ **Deltav Tune**  
Con esta aplicación se pueden sintonizar los bloques PID y FLC. *DeltaV Tune* identifica la dinámica del proceso y aplica reglas de sintonización para calcular los parámetros del PID (ganancia proporcional, tiempo integral y tiempo derivativo) o los factores de escala del FLC.
- ❖ **Process History View**  
En esta herramienta se exhiben los datos en tiempo real e históricos tanto del historiador continuo (*continuous historian*) como de la crónica de eventos (discretos), con lo cual es posible saber como ha funcionado el proceso en cualquier instante del tiempo.

#### 4.2.2.1 Control Difuso en DeltaV

DeltaV Fuzzy usa la teoría de control por lógica difusa (FLC) para proporcionar una alternativa de control avanzado al control estándar PID. El FLC proporciona la capacidad del control PID con el beneficio de una respuesta superior a los cambios de *set-point* y a los disturbios externos [12][24][25].

EL bloque FLC funciona usando reglas difusas predefinidas, funciones de pertenencia y de parámetros ajustables (grados de activación).

DeltaV Fuzzy utiliza dos funciones de pertenencia, donde las señales de entrada son el error y el cambio en el error, y la señal de salida es el cambio en la acción de control. Las relaciones entre estas tres variables representan a un controlador no lineal. La no linealidad se debe a la traducción de las variables de proceso a un sistema difuso (fuzzificación) y la traducción de un sistema difuso a una señal continua (defuzzificación).

Las dos funciones de pertenencia para el error, cambio en el error y cambio en la salida son negativas o positivas. El *escalamiento* de pertenencia  $S_e$  y  $S_{\Delta e}$  y el valor del error y del cambio en el error, respectivamente, determinan el grado de pertenencia.

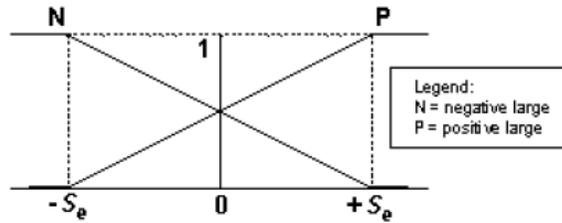


Figura 4.2.7: Función de Pertenencia para el Error (e)

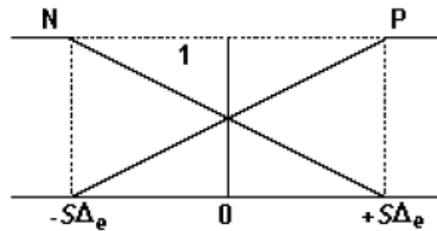


Figura 4.2.8: Función de Pertenencia para el Cambio en el Error ( $\Delta e$ )

Los cambios en la salida de la función de pertenencia se llaman "*singletons*". Ellos representan valores difusos que representan a un único punto con su función de pertenencia.

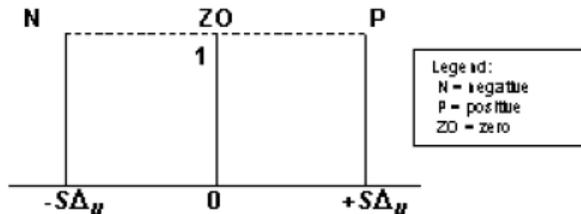


Figura 4.2.9: Función de Pertenencia Singleton para el cambio en la salida ( $\Delta u$ )

A partir de estas tres funciones de pertenencia, se tienen las siguientes reglas difusas:

- Regla 1: Si *error* es *N* y *cambio en el error* es *N* entonces *cambio en la salida* es *P*
- Regla 2: Si *error* es *N* y *cambio en el error* es *P* entonces *cambio en la salida* es *ZO*
- Regla 3: Si *error* es *P* y *cambio en el error* es *N* entonces *cambio en la salida* es *ZO*
- Regla 4: Si *error* es *P* y *cambio en el error* es *P* entonces *cambio en la salida* es *N*

#### 4.2.2.2 Control Predictivo en DeltaV

DeltaV Predict implementa control predictivo basado en modelos (multivariable) en el ambiente de control DeltaV. El algoritmo del control predictivo aplicado tiene sus raíces en el control por matriz dinámica (DMC) [12][24][25].

La identificación de proceso se realiza usando dos tipos de modelos: Respuesta Finita del Impulso (FIR) y Auto-Regresivo (*Auto-Regresive eXogenous*, ARX). La validación del modelo es realizada a través de la comparación entre los datos simulados y reales de proceso. Las variables de salida del proceso se encuentran restringidas según los *set-points* de trabajo establecidos. La optimización del proceso se alcanza maximizando o minimizando una entrada de proceso seleccionada (recordar que se utiliza en sistemas multivariables) hasta que una variable manipulada se acerque considerablemente a su límite deseado.

El controlador MPC minimiza el error cuadrático de la variable controlada sobre el horizonte de predicción y la acción de control cuadrática sobre el horizonte de control<sup>5</sup>.

---

<sup>5</sup> El horizonte de control se encuentra restringido a sólo dos valores: 5 ó 9 (pasos de predicción).

## **V Aplicación al Control de un Motor de C.C.**

### **5.1 Introducción**

La Máquina de Corriente Continua (C.C.) es constructivamente la más compleja entre las máquinas rotatorias tradicionales, debido a su gran complejidad mecánica (escobillas, portaescobillas y colector, entre otros componentes). Las máquinas de C.C., en comparación con las máquinas de corriente alterna, son menos robustas y necesitan de una unión eléctrica entre la armadura y el campo [20].

A pesar de lo anterior, las máquinas de C.C. han sido usadas y siguen usándose en forma amplia, principalmente como motor, en una gran variedad de accionamientos de industrias mineras, papeleras, etc., en especial cuando se requiere de:

- i) Un amplio rango de velocidades, ajustable de modo continuo.
- ii) Una característica torque-velocidad variable, constante o una combinación de ambas por tramo.
- iii) Rápida aceleración, desaceleración o cambio de sentido de giro.
- iv) Control de velocidad de muy alta calidad y precisión.
- v) Correlación exacta de la velocidad entre dos o más partes del proceso industrial.
- vi) Frenado regenerativo.

En este trabajo se controlará la velocidad del motor variando el voltaje de alimentación de la armadura, manteniendo la alimentación del rotor constante.

## 5.2 Descripción de la Planta

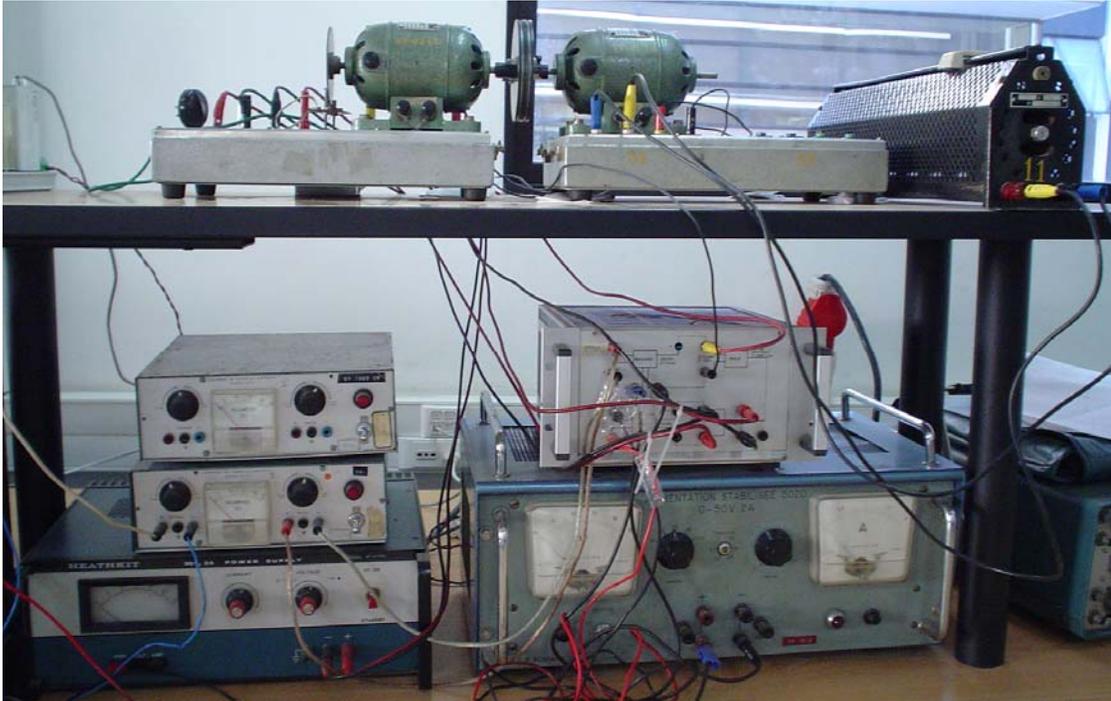


Figura 5.2.1: Plataforma de Prueba, Motor C.C.

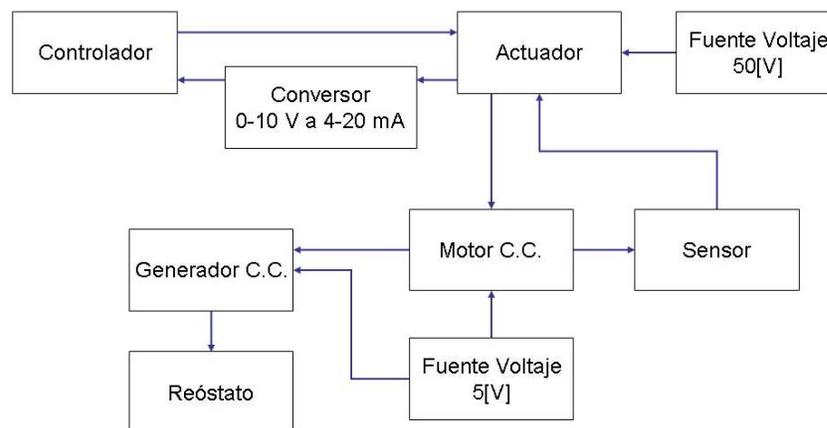


Figura 5.2.2: Diagrama representativo de la Planta

La plataforma de prueba o planta que se utilizará en esta memoria consiste en dos máquinas de C.C., una como motor, a la cual se desea controlar su velocidad de giro, y la otra como generador (figura 5.2.1).

La planta está compuesta de los siguientes elementos:

- i) **Motor de C.C.:** se utiliza un motor de C.C. de excitación independiente de 25 W, con un voltaje de armadura de 110 Volts, con una velocidad de 3500 r.p.m.<sup>6</sup>



Figura 5.2.3: Motor C.C.

- ii) **Generador de C.C.:** esta máquina posee las mismas características que el motor, al cual se encuentra acoplado.
- iii) **Actuador:** es el componente encargado de la comunicación entre el motor y el controlador. Recibe como entrada una señal de 4-20 mA, la cual permite modular la alimentación de la armadura a través de un PWM. También es el encargado de alimentar al sensor de velocidad (constituido por dos diodos, un emisor y un receptor) y expresar la salida del sensor en una señal 0-3 Volt, la cual es entregada como la salida del actuador.

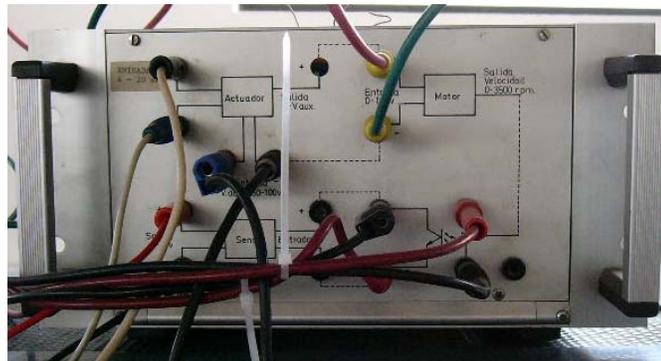


Figura 5.2.4: Bloque Actuador

- iv) **Convertor 0-10 [V] a 4-20 [mA]:** componente que convierte la salida del actuador para enviarla al controlador.



Figura 5.2.5: Convertor V-I

---

<sup>6</sup> Estos valores corresponden a los datos de placa (nominales).

- v) **Fuente de Voltaje Rotor:** fuente de voltaje continuo de 5[V] que alimenta el rotor del motor y del generador.



Figura 5.2.6: Fuente Voltaje Continuo 5V

- vi) **Fuente de Voltaje Armadura:** fuente de voltaje continuo de 50[V] que entrega la alimentación al actuador para su modulación.



Figura 5.2.7: Fuente Voltaje Continuo 50V

- vii) **Reóstato:** resistencia variable de 62[Ω] con una corriente máxima de 2,7[A]<sup>7</sup>, que permite realizar variación de carga en el generador.



Figura 5.2.8: Reóstato

---

<sup>7</sup> Estos valores corresponden a los datos de placa (nominales).

La planta realiza el siguiente procedimiento desde la llegada de la señal de control (señal de entrada al actuador, proveniente desde el controlador) hasta entregar la señal de salida asociada a dicha señal de entrada (salida del conversor).

1. La señal de entrada especifica el nivel de voltaje que se debe entregar a la armadura del motor (modulación PWM), para llevar al motor a la velocidad deseada.
2. El sensor compuesto por dos diodos y un platillo dentado, es el encargado de enviar un señal (codificada) al actuador, el cual toma esta señal y la transforma en una representación 0 – 3 Volt.
3. Finalmente, la señal correspondiente a la velocidad del motor entra al conversor voltaje-corriente, entregando una señal de salida en el protocolo 4-20 mA.

### **5.3 Modelo de la Planta**

Para el desarrollo de la memoria es necesario determinar un modelo de planta para realizar un estudio previo de las estrategias de control que se desean utilizar. Como la planta no consiste solamente en el motor de C.C., un modelo fenomenológico de éste no representaría a la planta sino que solo a un componente de ella, e por esto que se necesita identificar un modelo que nos permita simular el comportamiento de la planta real.

Como se desea que las simulaciones nos entreguen una visión sobre el comportamiento que presentarán las estrategias al ser implementadas en el controlador DeltaV, se decidió realizar una identificación ARX de la planta, debido a que el software que se utiliza para el diseño de las estrategias MPC en el DeltaV utiliza este tipo de identificación para conocer el comportamiento de la planta.

El modelo obtenido de la planta a través de una identificación ARX es:

$$V_a(Z) = \left( \frac{-0.3174 \cdot Z^{-4} + 0.6745 \cdot Z^{-3} + 0.1075 \cdot Z^{-2} + 0.00266 \cdot Z^{-1}}{0.04581 \cdot Z^{-4} - 0.09214 \cdot Z^{-3} - 0.07117 \cdot Z^{-2} - 0.4312 \cdot Z^{-1} + 1} \right) \cdot \omega(Z) \quad (5.3.1)$$

## VI Estrategias de Control

### 6.1 Definición de las estrategias de control

Se implementan tres tipos de estrategias diferentes para controlar la velocidad del motor de corriente continua. Las estrategias corresponden a control predictivo basado en modelos, control difuso y un control proporcional-integral (PI). Estas estrategias de control son evaluadas a través de tres pruebas: partida del motor, cambios en la velocidad de referencia y variación en la carga.

El diseño de las estrategias de control se realiza utilizando la herramienta *Control Studio*<sup>8</sup>, perteneciente al sistema de control DeltaV [12][24][25][26].

Los parámetros de cada una de las estrategias de control se definen a continuación:

- a) Controlador PI
  - a.1) PI1
    - Acción Proporcional: 0.37
    - Acción Integral: 2.18
  - a.2) PI2
    - Acción Proporcional: 0.55
    - Acción Integral: 4.00
  
- b) Controlador Difuso (FLC)
  - b.1) FLC1
    - Límite del Error: 0.50
    - Límite del Cambio del Error: 0.23
    - Cambio en la Acción de Control: 0.1
  - b.2) FLC2
    - Límite del Error: 0.40
    - Límite del Cambio del Error: 0.23
    - Cambio en la Acción de Control: 0.1
  
- c) Controlador Predictivo (MPC)
  - c.1) MPC1
    - Horizonte de Control: 5
    - Peso en el Error: 1
    - Peso en la Acción de Control: 3
  - c.2) MPC2
    - Horizonte de Control: 9
    - Peso en el Error: 1
    - Peso en la Acción de Control: 3

---

<sup>8</sup> En el capítulo 10.2 se observan los esquemas utilizados en el DCS DeltaV.

Las estrategias de control que se proponen en este trabajo no consideran los controles estabilizantes necesarios dentro de una planta, así como por ejemplo las acciones de protección necesarias para un motor dentro de las cuales se pueden considerar protección de embalamiento y protección de sobrecarga, entre otras. Las estrategias propuestas, más bien, se refieren a estrategias operativas de la planta, como llevar una salida específica a un nuevo *set-point*.

La sintonización de los controladores FLC y PI se realizó en una primera etapa utilizando la herramienta *DeltaV Tune*, en donde se sintonizaron para una referencia de velocidad igual a 60%. Se realizó una sintonización manual, a partir de la sintonización anterior, observando el comportamiento que presentaba cada estrategia en cada una de las pruebas que se realizarán, de manera de obtener una sintonización única para las tres pruebas y no una para cada prueba (y para cada estrategia). Para el controlador predictivo se utilizan dos horizontes de control (impuestas por el sistema de control DeltaV).

Se implementan todas las estrategias propuestas para las pruebas de variación de referencia y de carga, para la prueba de partida de la planta se utilizarán los controladores PI1, FLC2 y MPC1.

## **6.2 Descripción de Pruebas**

Como se mencionó anteriormente, para observar el comportamiento de cada una de las estrategias de control (FLC, MPC y PI) se utilizan las siguientes pruebas:

1. Partida del Motor
2. Cambio en la Velocidad de Referencia
3. Variación en la Carga

### **6.2.1 Partida del Motor**

El desempeño de un sistema de control se puede especificar a través de la respuesta transitoria frente a un escalón unitario, medida en cantidad de tiempo. Pero esta respuesta esta fuertemente ligada a las condiciones iniciales, es por esto que para comparar entre varias respuestas a un escalón es necesario que las condiciones iniciales del sistema sean iguales, por ello es aconsejable realizarlas cuando el sistema se encuentra en reposo, logrando así que las condiciones iniciales sean nulas (cero) [16].

A través de la respuesta transitoria obtenida se pueden determinar los siguientes parámetros:

1. **Tiempo de Retardo ( $t_d$ ):** Tiempo requerido para que la respuesta alcance la primera vez la mitad del valor final.
2. **Tiempo de Levantamiento ( $t_r$ ):** Tiempo requerido para que la respuesta pase del 0 al 100% de su valor final.
3. **Tiempo Pico ( $t_p$ ):** Tiempo requerido para que la respuesta alcance el primer pico de sobrepaso.
4. **Sobrepaso Máximo ( $M_p$ ):** Valor pico máximo de la curva de respuesta, medido a partir de la unidad.
5. **Tiempo de Asentamiento ( $t_s$ ):** Tiempo que se requiere para que la curva de respuesta alcance un rango alrededor del valor final del tamaño especificado por el porcentaje absoluto del valor final (por lo general, de 2 o 5%) y permanezca dentro de él.

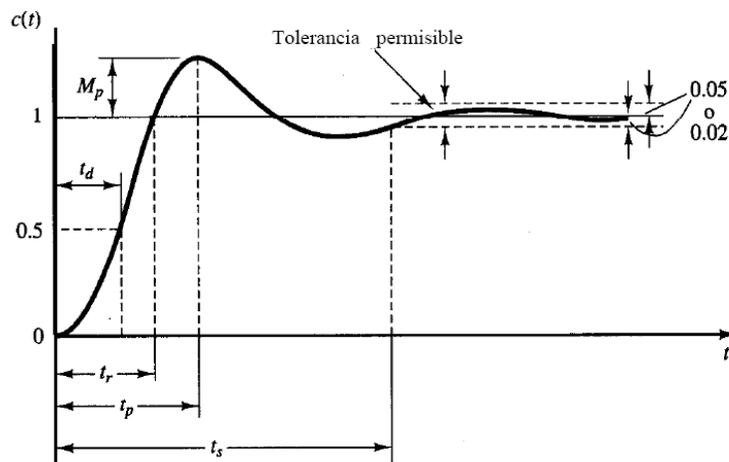


Figura 6.2.1: Curva Respuesta Escalón Unitario

Se realiza un estudio del comportamiento de cada estrategia frente a la partida de la planta; para ello se modificara la referencia de la velocidad del motor a un 60%, partiendo de una referencia en 0%.

El estudio de este comportamiento no va dirigido a como se comportaría la estrategia cuando la planta comienza en operación, debido a que en la industria se tiene una estrategia específica a seguir para inicializar la partida de la planta<sup>9</sup>. Más bien, permitirá obtener los tiempos de respuesta de cada una de estas estrategias.

Se utiliza el tiempo de levantamiento  $t_r$  y el tiempo de asentamiento  $t_s$  (con una tolerancia del 5%) como los índices a considerar en esta prueba.

<sup>9</sup> Estrategia en la que se consideran los pasos necesarios para que cada uno de los componentes de la planta (alimentación, protecciones, estado de cada dispositivo, entre otros aspectos) comience a funcionar adecuadamente.

## 6.2.2 Cambio en la Velocidad de Referencia

En la práctica, es común que existan cambios de referencia dentro de las variables controladas, por ejemplo en el caso de una central eléctrica la cual debe pasar de una generación baja a una generación alta y viceversa dependiendo de la necesidad del consumo. Es por esta razón que es de suma relevancia observar como se comportan las estrategias de control diseñadas frente a cambios en la referencia.

Se realiza un cambio de referencia de velocidad en el motor pasando de un 53% a un 67% del valor máximo y viceversa.

Se evalúan los siguientes índices:

- el valor medio del valor absoluto del error
- la desviación estándar del error
- la desviación estándar de la acción de control
- la desviación estándar de la variación de la acción de control

## 6.2.3 Variación en la Carga

Un aspecto importante a considerar es el efecto que produce la carga frente a la acción de control, mientras el controlador debe mantener el proceso en las condiciones (referencias) deseadas.

En esta prueba se evalúan los mismos índices considerados en la prueba de cambio en la velocidad de referencia para realizar las comparaciones.

En este trabajo, se realiza en una primera etapa pruebas por simulación (capítulo 6.3) y posteriormente pruebas en tiempo real (capítulo VII), utilizando las pruebas descritas.

## 6.3 Pruebas por Simulación

En este capítulo se presentan los comportamientos que se obtuvieron de la simulación de las distintas estrategias de control diseñadas. Para realizar estas simulaciones se ha empleado la herramienta computacional Matlab-Simulink, utilizando el modelo ARX de la planta (ecuación 5.3.1).

Para cada prueba, se muestra gráficamente los resultados de cada una de las estrategias y luego se realiza el análisis de los resultados en conjunto.

Los resultados se presentan a través de porcentajes, correspondientes a los valores máximos de velocidad del motor (3500 r.p.m.) y del voltaje de armadura (50V).

## 6.3.1 Partida del Motor

### 6.3.1.1 Controlador PI

La figura 6.3.1 muestra la velocidad obtenida en el motor al utilizar el controlador PI en el momento de la partida de la planta.

En la figura 6.3.2, se puede observar el tiempo que tomó el controlador para que la velocidad alcanzara el nivel de referencia deseada por primera vez es 0,96 seg.

Por último, el tiempo de asentamiento obtenido para el controlador PI durante esta simulación es 4,7 seg. La figura 6.3.3 muestra un detalle de la figura 6.3.1 que refleja este valor.

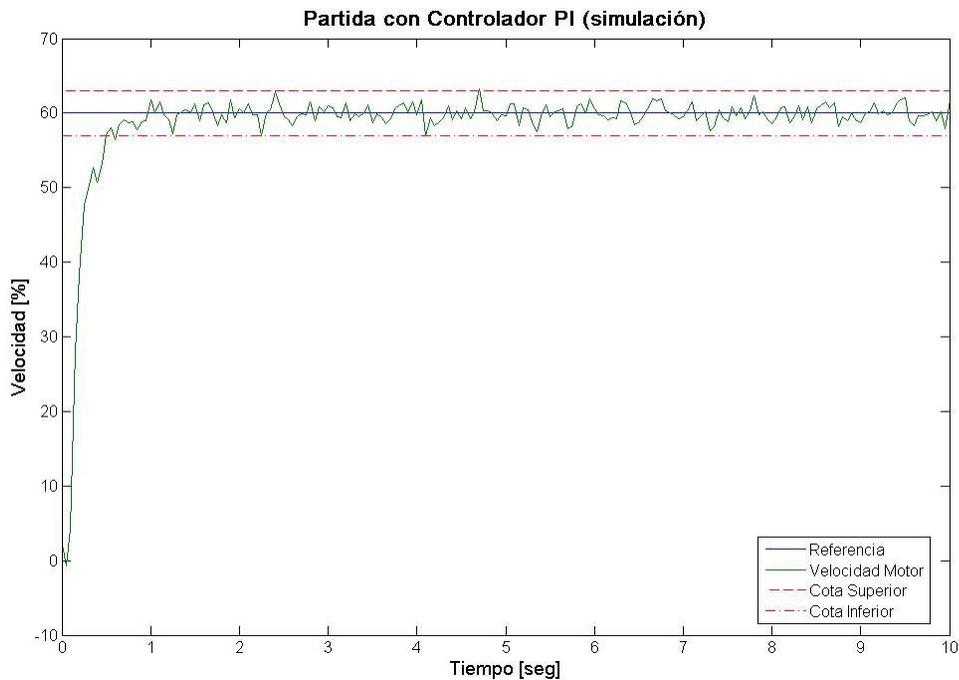


Figura 6.3.1: Partida del Motor utilizando controlador PI

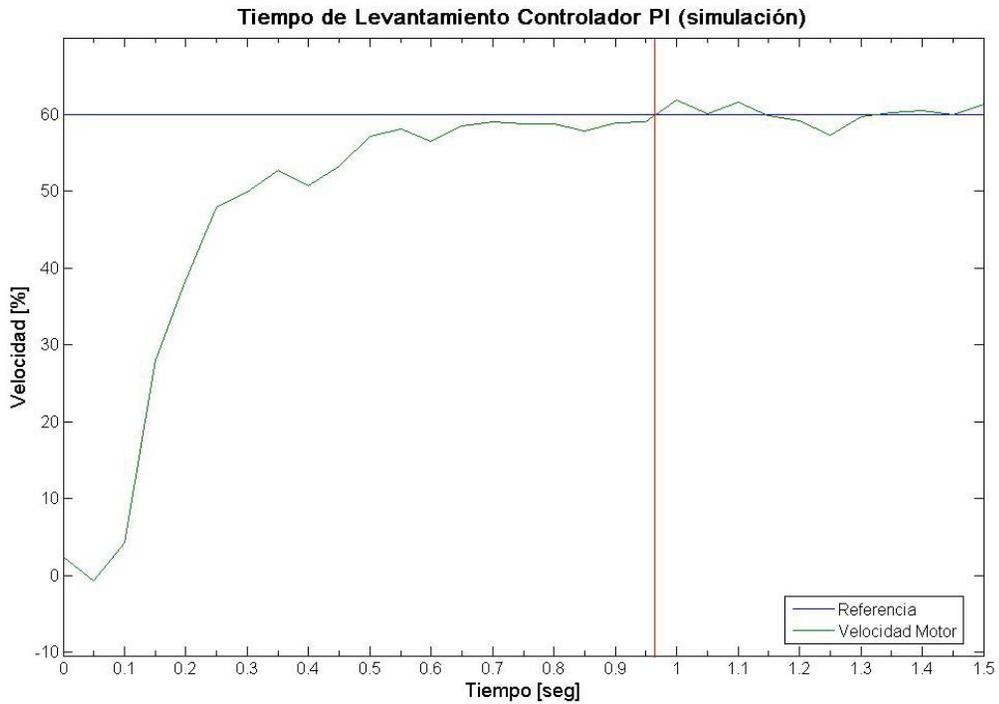


Figura 6.3.2: Tiempo de Levantamiento Controlador PI (detalle Figura 6.3.1)

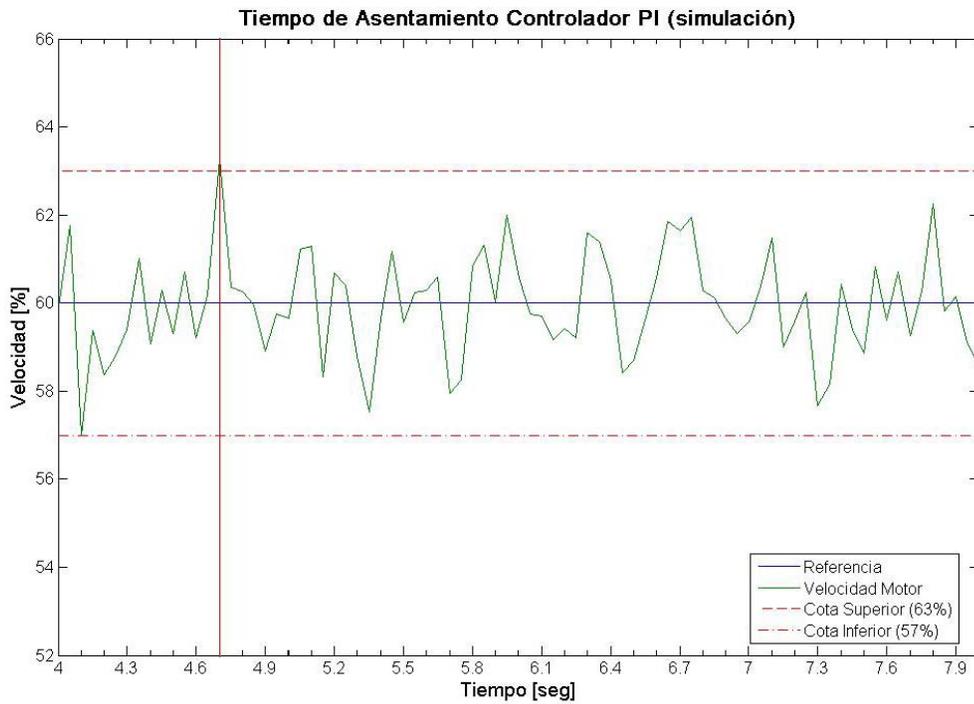


Figura 6.3.3: Tiempo Asentamiento Controlador PI (detalle Figura 6.3.1)

### 6.3.1.2 Controlador FLC

En las figuras 6.3.4 y 6.3.5 se muestran la velocidad del motor durante la partida y el tiempo de levantamiento obtenido para el controlador difuso, respectivamente. El tiempo de levantamiento es 11 seg., valor mayor al obtenido en el controlador PI.

El tiempo de asentamiento para el control FLC, como se observa en la figura 6.3.6, es 10,8 seg.

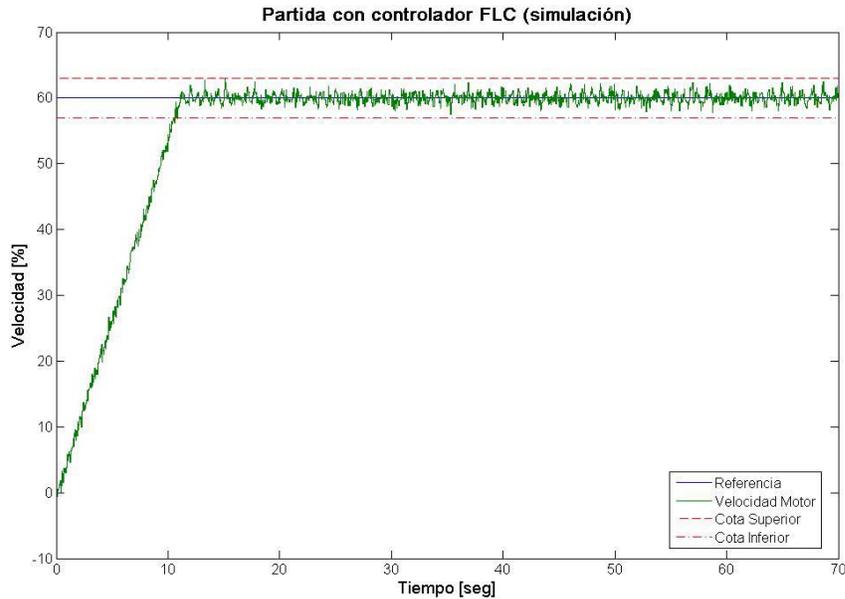


Figura 6.3.4: Partida del Motor utilizando controlador Difuso

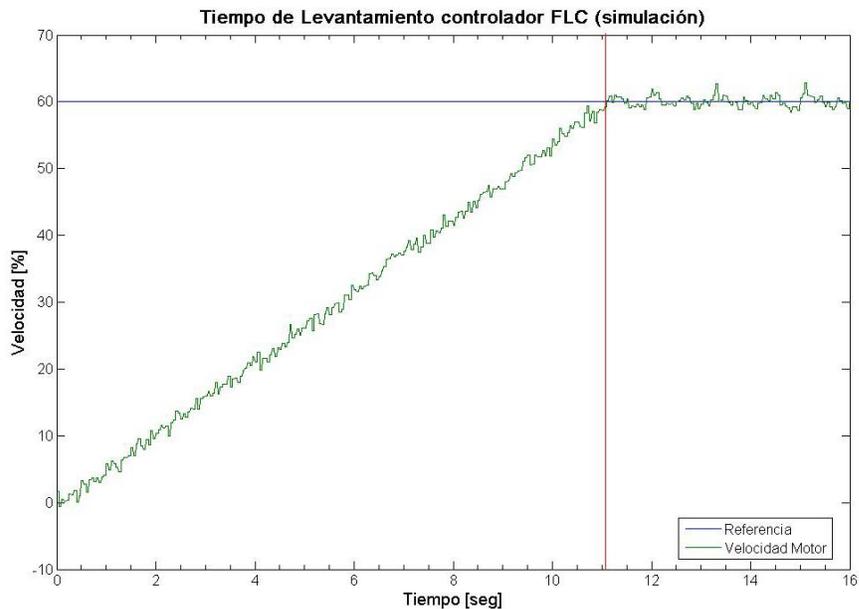


Figura 6.3.5: Tiempo de Levantamiento controlador Difuso (detalle Figura 6.3.4)

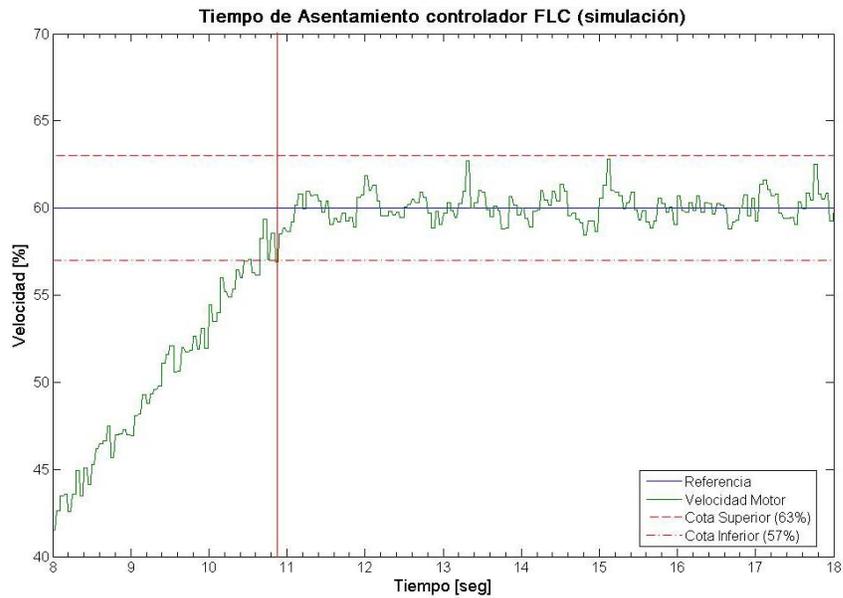


Figura 6.3.6: Tiempo de Asentamiento controlador Difuso (detalle Figura 6.3.4)

### 6.3.1.3 Controlador MPC

En la figura 6.3.7 se observa la velocidad del motor utilizando un controlador MPC.

Las figuras 6.3.8 y 6.3.9, detalles de la figura 6.3.7, muestran que el tiempo de levantamiento es 0,14 seg. y el tiempo de asentamiento es 0,18 seg., respectivamente.

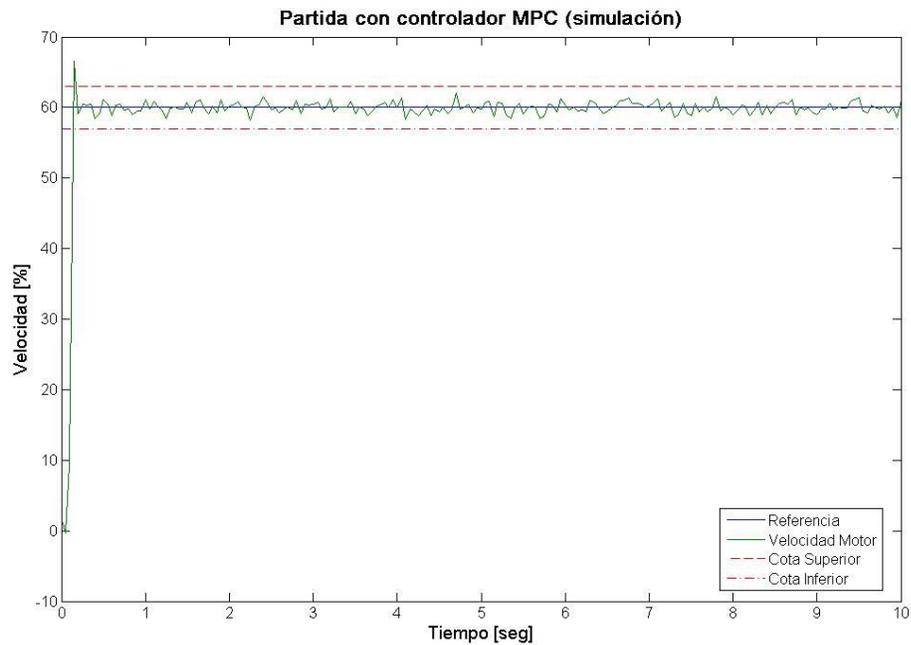


Figura 6.3.7: Partida del Motor utilizando controlador Predictivo

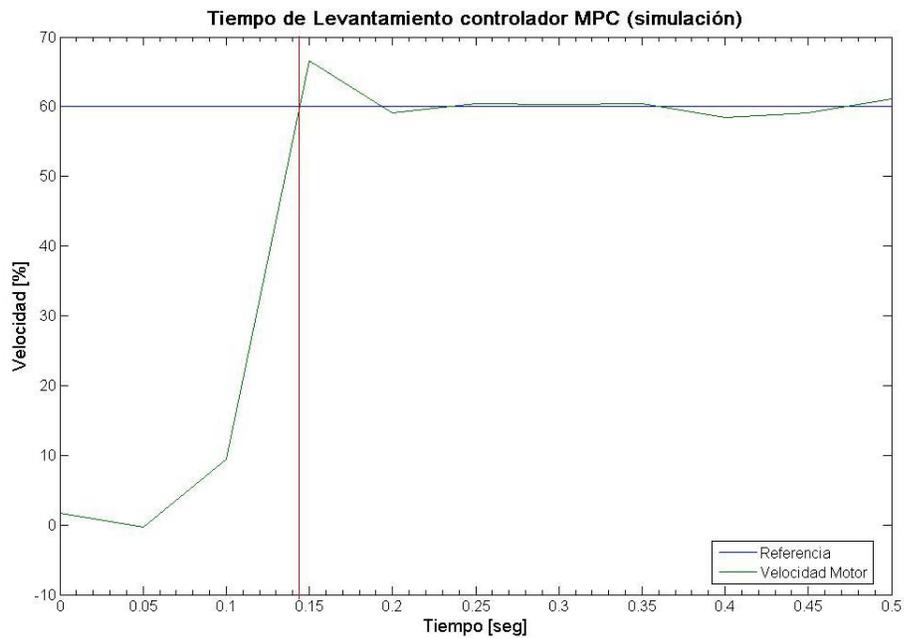


Figura 6.3.8: Tiempo de Levantamiento controlador Predictivo (detalle Figura 6.3.7)

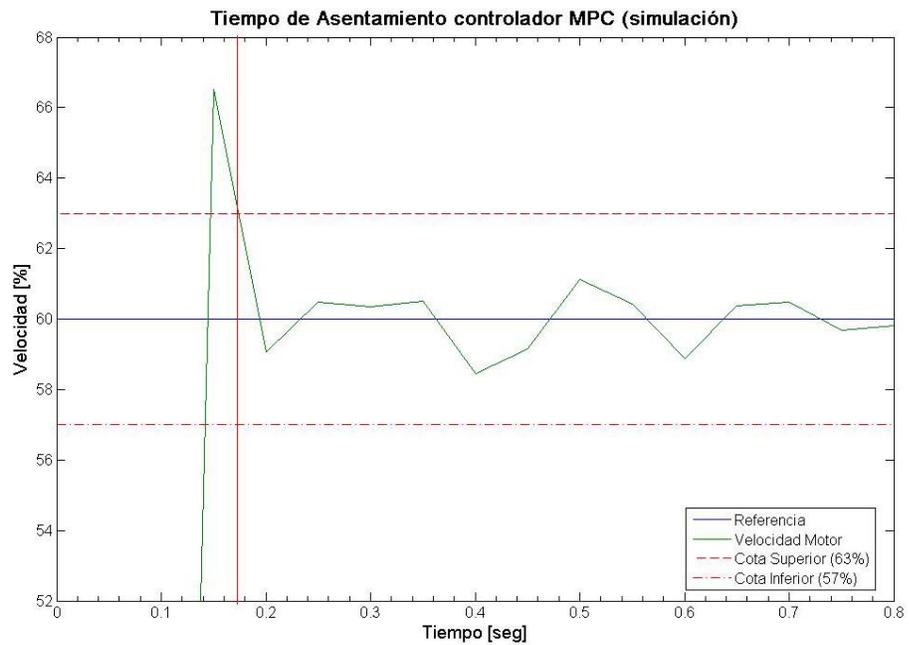


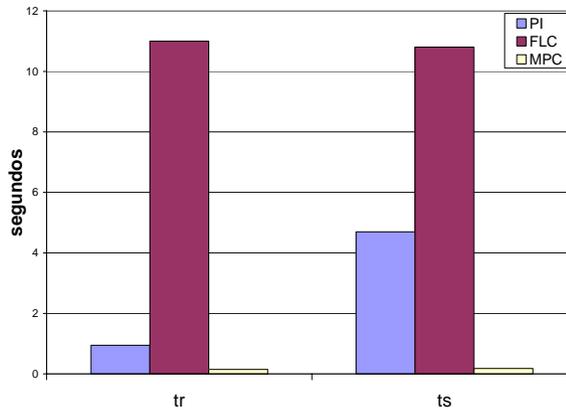
Figura 6.3.9: Tiempo de Asentamiento controlador Predictivo (detalle Figura 6.3.7)

### 6.3.1.4 Análisis de Resultados

A partir de las figuras 6.3.1 a 6.3.9, en la tabla 6.3.1 se muestran los tiempos de levantamiento y de asentamiento obtenidos para cada estrategia y en la figura 6.3.10 se presentan estos valores en forma gráfica.

**Tabla 6.3.1: Resumen de Tiempos para la Partida del Motor**

	Tiempo de Levantamiento, tr [seg]	Tiempo de Asentamiento, ts [seg]
PI	0,96	4,70
FLC	11,00	10,80
MPC	0,14	0,18



**Figura 6.3.10: Tiempos de Levantamiento y de Asentamiento**

Se puede observar que el tiempo de levantamiento y el tiempo de asentamiento son similares en cada estrategia, a excepción del controlador PI en el que se supera levemente el límite superior a los 4,7 seg. En el caso de no considerar este punto el tiempo de asentamiento para el control PI correspondería a unos 0,7 seg., que se asemeja más al tiempo de levantamiento obtenido.

Existe una gran diferencia entre el tiempo de levantamiento del control difuso con respecto a las otras dos estrategias, esto se debe a que en cada instante de muestreo se incrementa la acción de control según el paso establecido, que corresponde a 0,1. Debido a esto, el incremento es muy lento en comparación a las otras estrategias que actúan según el valor del error y de las predicciones (para control PI y MPC respectivamente) y no de los signos como sucede con el control difuso.

En esta prueba se tiene que el controlador MPC, en ambos tiempos, resulta ser el mejor (más rápido). La posibilidad de predecir las salidas futuras, permite al controlador MPC reaccionar más rápido que las otras estrategias de control.

Los tiempos de respuestas obtenidos en las estrategias pueden ser mejorados con una sintonización más fina.

## 6.3.2 Cambio en la Velocidad de Referencia

### 6.3.2.1 Controlador PI1

La respuesta obtenida al cambiar la velocidad de referencia entre un 53% y un 67%, utilizando el controlador PI1, se observa en la figura 6.3.11. El error obtenido se observa en la figura 6.3.12, donde los valores máximos (y mínimos) corresponden al momento del cambio de referencia.

La figura 6.3.13 muestra la acción aplicada por el controlador PI1.

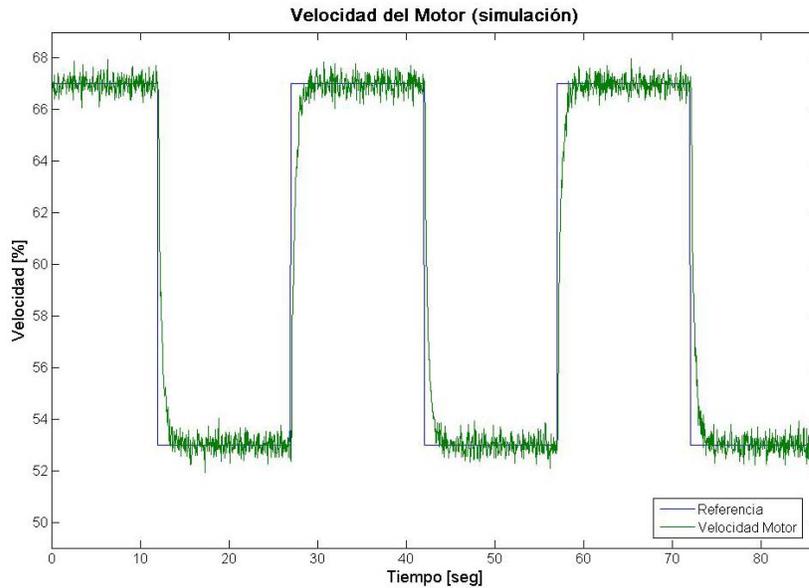


Figura 6.3.11: Velocidad del Motor bajo cambio de referencia, controlador PI1

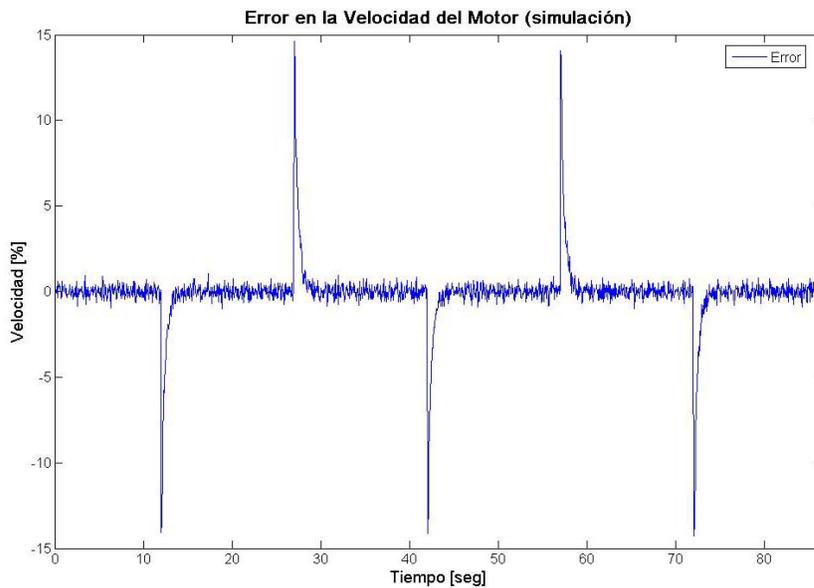
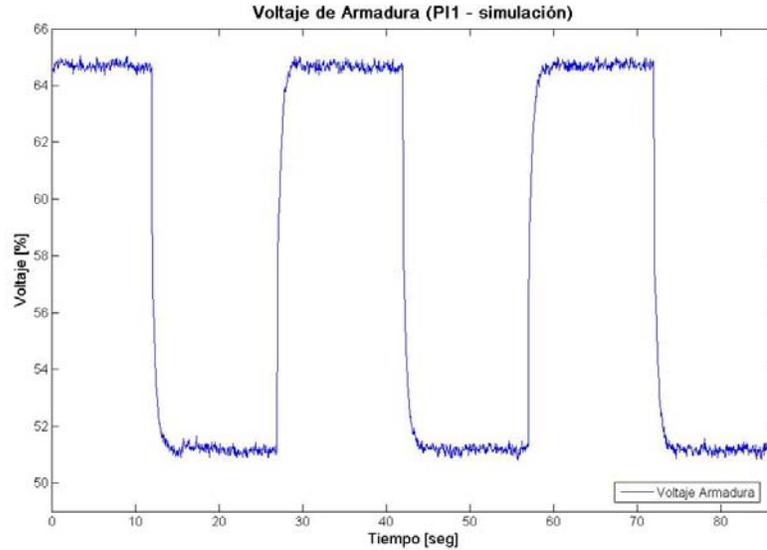


Figura 6.3.12: Error de Control en la Velocidad obtenido con controlador PI1



**Figura 6.3.13: Voltaje de Armadura, Salida Controlador PI1**

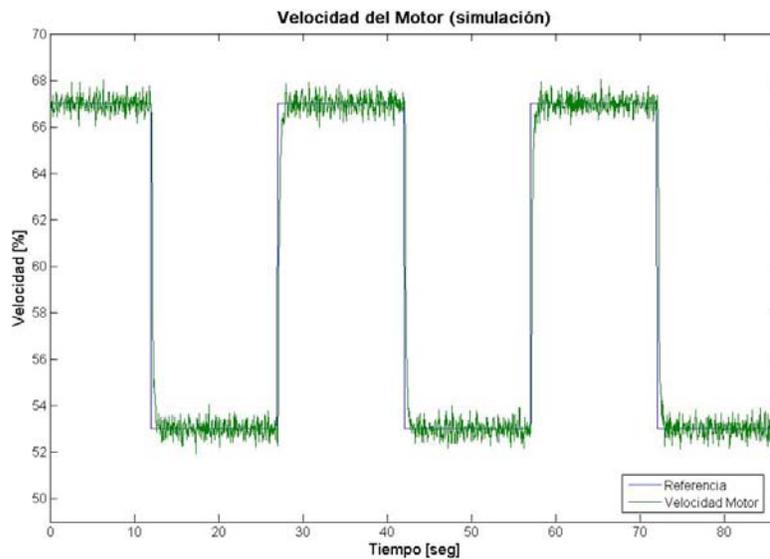
La tabla 6.3.2 presenta los índices obtenidos en esta prueba para el controlador PI1.

**Tabla 6.3.2: Índices para controlador PI1, frente a cambio de referencia.**

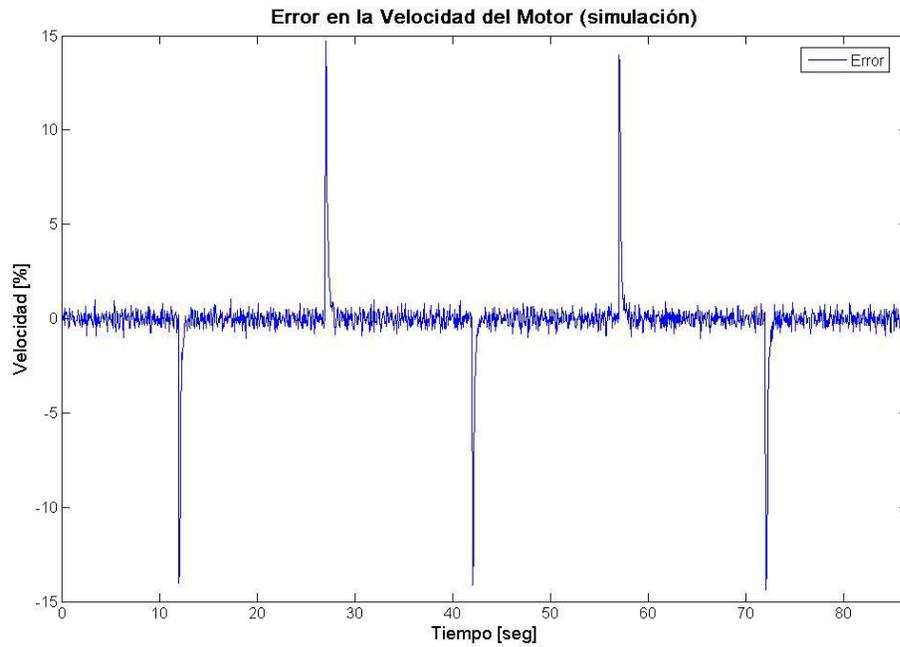
Media	Desviación Estándar		
abs(r-y) [%]	(r-y) [%]	u [%]	du [%]
0,592	1,704	6,613	0,341

### 6.3.2.2 Controlador PI2

En las figuras 6.3.14 y 6.3.15 se observan los resultados obtenidos para la velocidad del motor y el error asociado, respectivamente, utilizando la estrategia de control PI2.

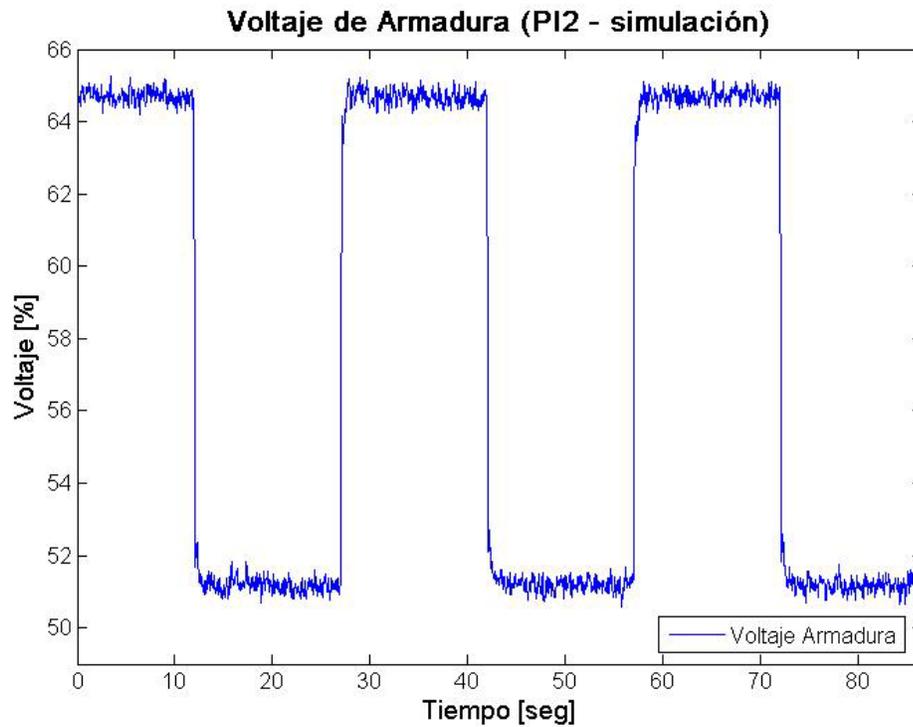


**Figura 6.3.14: Velocidad del Motor bajo cambio de referencia, controlador PI2**



**Figura 6.3.15: Error de Control en la Velocidad obtenido con controlador PI2**

La figura 6.3.16 muestra el voltaje aplicado a la armadura del motor, utilizando la estrategia de control PI2.



**Figura 6.3.16: Voltaje de Armadura, Salida Controlador PI2**

En la tabla 6.3.3 se presentan los índices obtenidos durante la simulación para el controlador PI2.

**Tabla 6.3.3: Índices para controlador PI2, frente a cambio de referencia.**

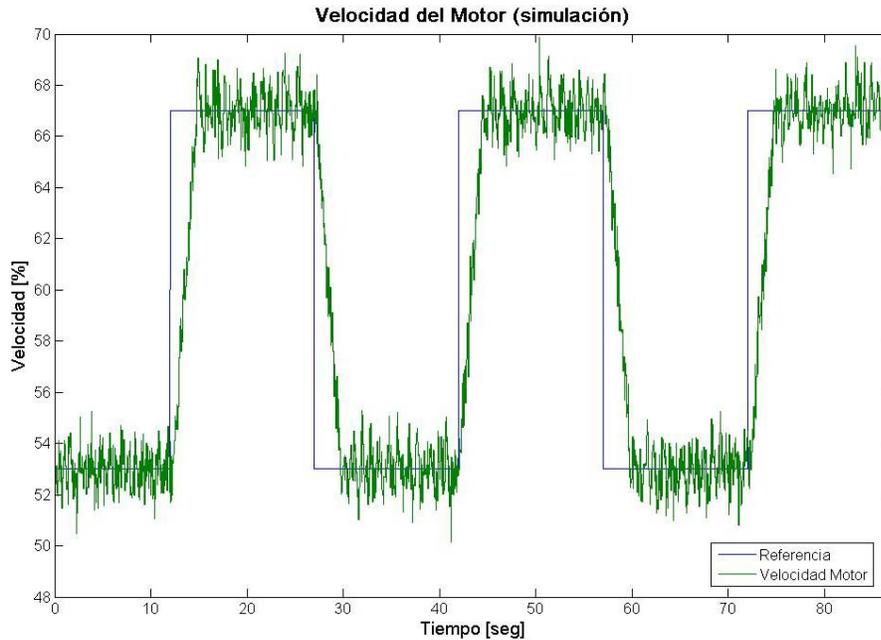
Media	Desviación Estándar		
	(r-y) [%]	u [%]	du [%]
0,459	1,426	6,719	0,509

La diferencia obtenida con respecto al controlador PI1 es mínima. Considerando el error, el controlador PI2 presenta valores más pequeños, pero para la acción de control y la variación de la acción de control el controlador PI1 es el que presenta los valores menores.

### 6.3.2.3 Controlador FLC1

La figura 6.3.17 muestra el comportamiento de la planta frente a cambios en la velocidad de referencia utilizando el controlador FLC1.

En las figuras 6.3.18 y 6.3.19 se observan el error obtenido y la acción de control aplicada por el controlador FLC1, respectivamente.



**Figura 6.3.17: Velocidad del Motor bajo cambio de referencia, controlador FLC1**

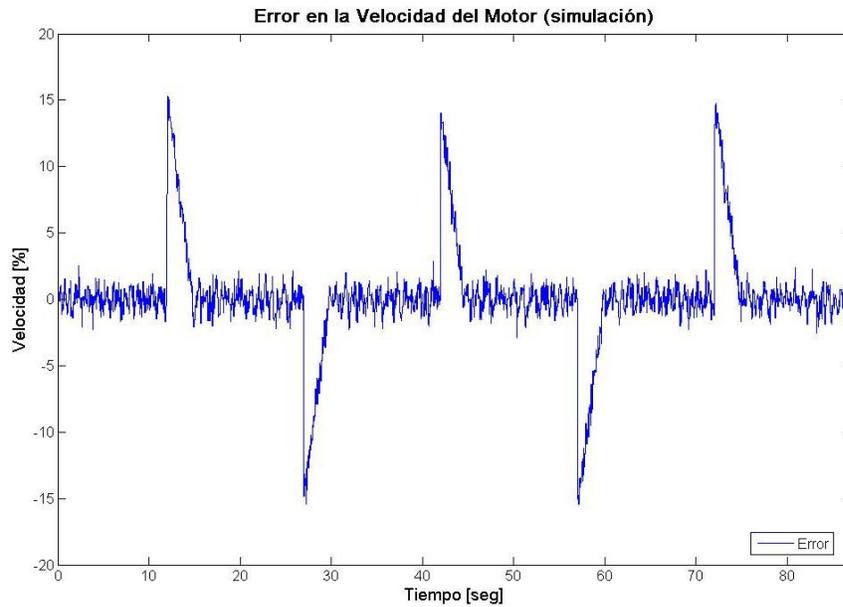


Figura 6.3.18: Error de Control en la Velocidad obtenido con controlador FLC1

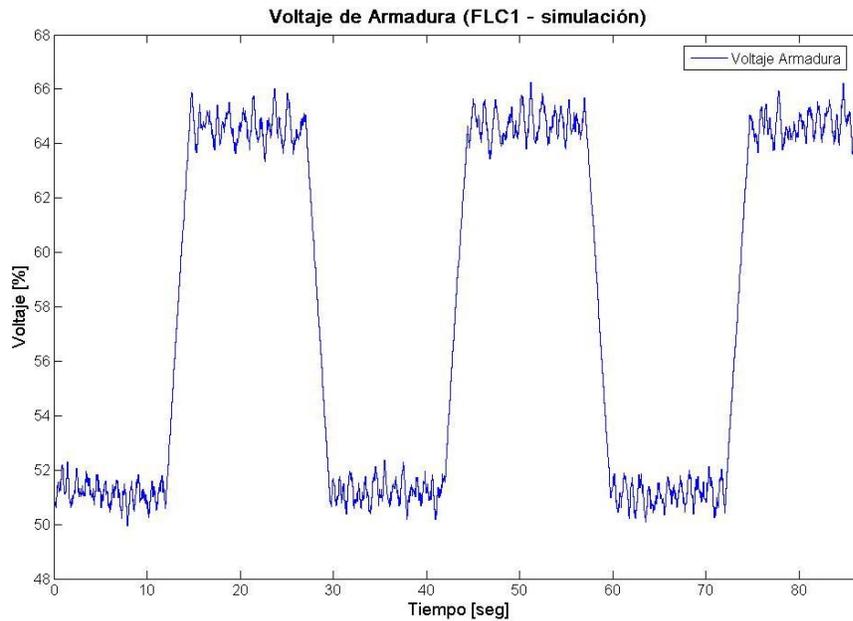


Figura 6.3.19: Voltaje de Armadura, Salida Controlador FLC1

Para el controlador FLC1 los índices obtenidos a través de esta prueba son indicados en la tabla 6.3.4.

Tabla 6.3.4: Índices para controlador FLC1, frente a cambio de referencia.

Media	Desviación Estándar		
abs(r-y) [%]	(r-y) [%]	u [%]	du [%]
1,773	3,587	6,441	0,141

Si consideramos los resultados obtenidos con los controladores PI, el control FLC1 presenta un tiempo de levantamiento muy notorio, esto se observa en el gráfico del error (Figura 6.3.18) y en el gráfico de la acción de control aplicada (Figura 6.3.19).

Los índices asociados al error obtenido son mayores a los de ambos controladores PI, pero en el índice que se refiere al esfuerzo de control ( $du$ ) aplicado se observa que es menor para este controlador (que por diseño la variación debe ser cercana a 0,1%).

### 6.3.2.4 Controlador FLC2

Las figuras 6.3.20, 6.3.21 y 6.3.22 muestran la velocidad del motor, el error obtenido y la acción aplicada, respectivamente, utilizando el controlador FLC2. Se observa en estas figuras un comportamiento similar al obtenido por el controlador FLC1.

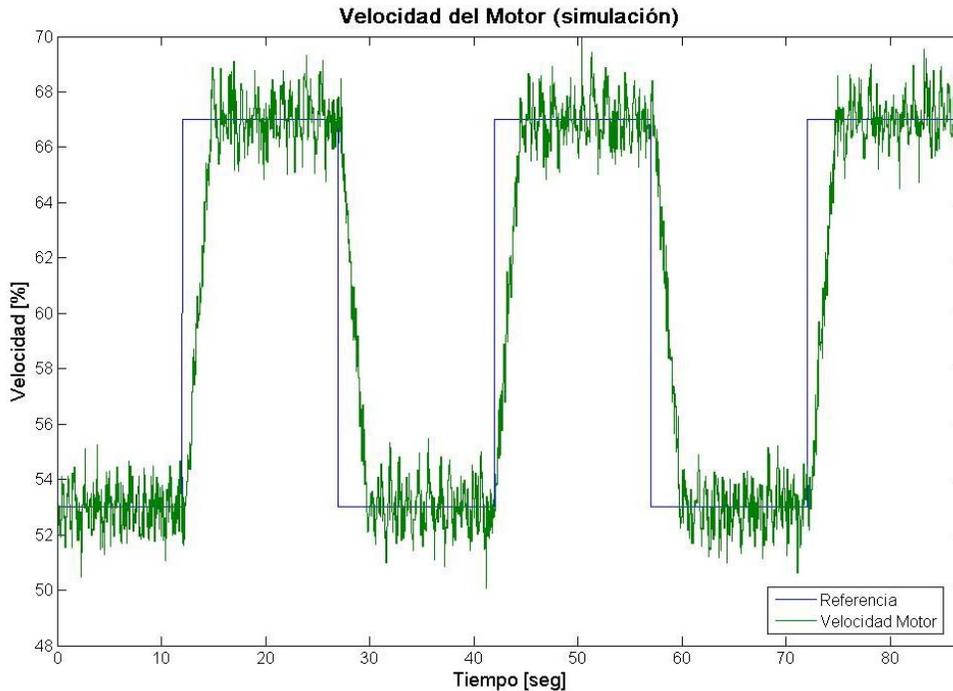


Figura 6.3.20: Velocidad del Motor bajo cambio de referencia, controlador FLC2

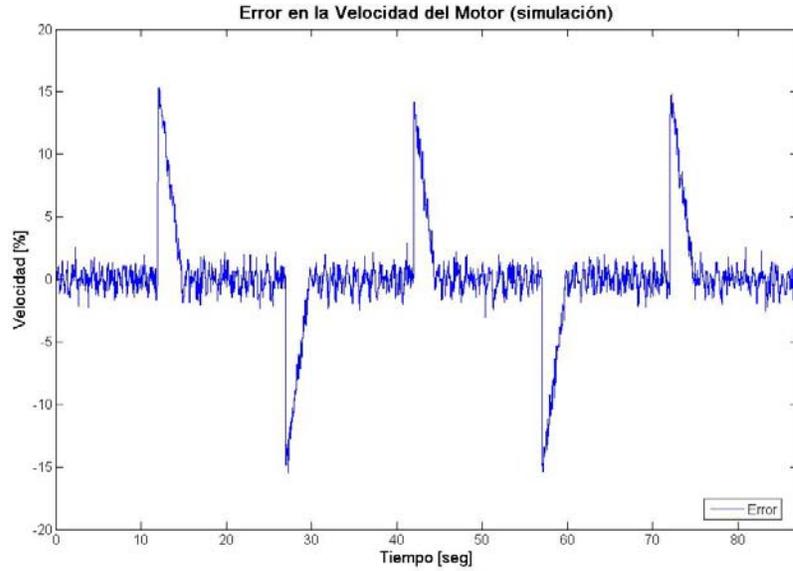


Figura 6.3.21: Error de Control en la Velocidad obtenido con controlador FLC2

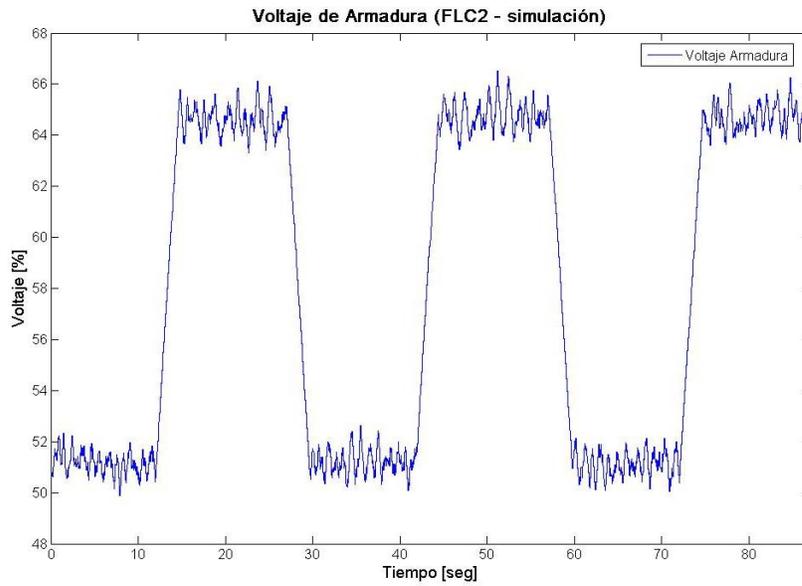


Figura 6.3.22: Voltaje de Armadura, Salida Controlador FLC2

La tabla 6.3.5 muestra los índices obtenidos al realizar cambios en la velocidad de referencia utilizando el controlador FLC2.

Tabla 6.3.5: Índices para controlador FLC2, frente a cambio de referencia.

Media	Desviación Estándar		
abs(r-y) [%]	(r-y) [%]	u [%]	du [%]
1,791	3,599	6,449	0,146

De las tablas 6.3.4 y 6.3.5, se obtiene que el controlador FLC1 es levemente mejor al control FLC2, pero la diferencia entre los índices de ambos es muy pequeña.

### 6.3.2.5 Controlador MPC1

Las figuras 6.3.23 y 6.3.24 muestran la velocidad del motor y el error obtenido en esta prueba, respectivamente, utilizando el controlador MPC1.

Se observa que la estrategia de control mantiene la velocidad del motor según la referencia deseada, tomando un pequeño tiempo para llevar al motor de una velocidad a otra en los cambios de referencia, como se observa en la figura 6.3.24.

En la figura 6.3.25 se puede observar la acción de control aplicada al motor C.C.

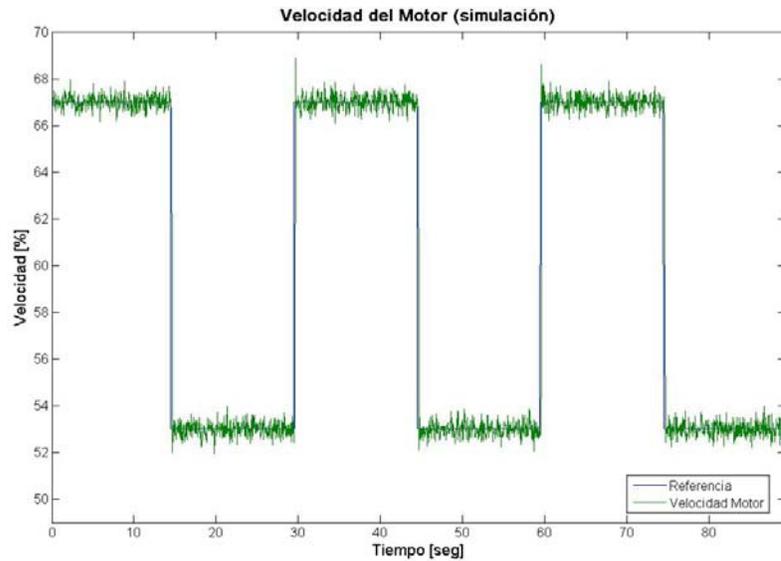


Figura 6.3.23: Velocidad del Motor bajo cambio de referencia, controlador MPC1

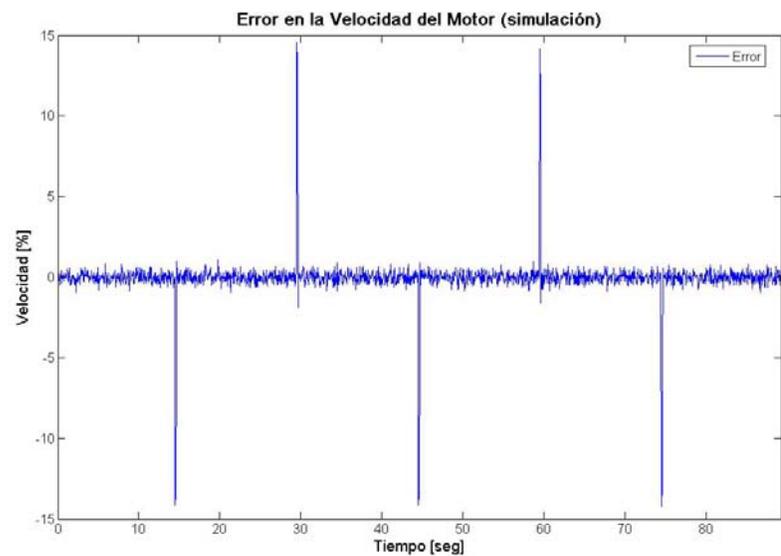


Figura 6.3.24: Error de Control en la Velocidad obtenido con controlador MPC1

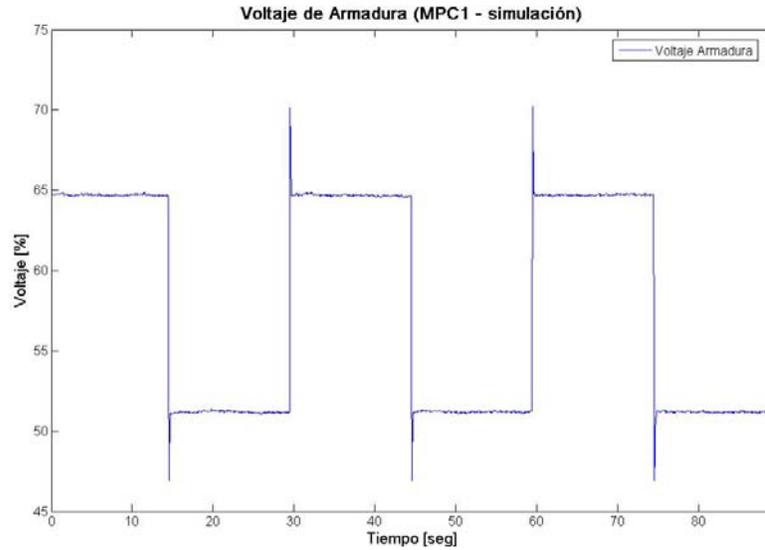


Figura 6.3.25: Voltaje de Armadura, Salida Controlador MPC1

La tabla 6.3.6 nos presenta los índices que se obtuvieron en esta prueba para el controlador MPC1.

Tabla 6.3.6: Índices para controlador MPC1, frente a cambio de referencia.

Media	Desviación Estándar		
abs(r-y) [%]	(r-y) [%]	u [%]	du [%]
0,376	1,294	6,789	0,835

### 6.3.2.6 Controlador MPC2

Las figuras 6.3.26, 6.3.27 y 6.3.28 muestran el comportamiento obtenido para el controlador MPC2. Tal como sucedió con el controlador MPC1, el controlador MPC2 mantiene la velocidad del motor según los cambios de referencia deseados.

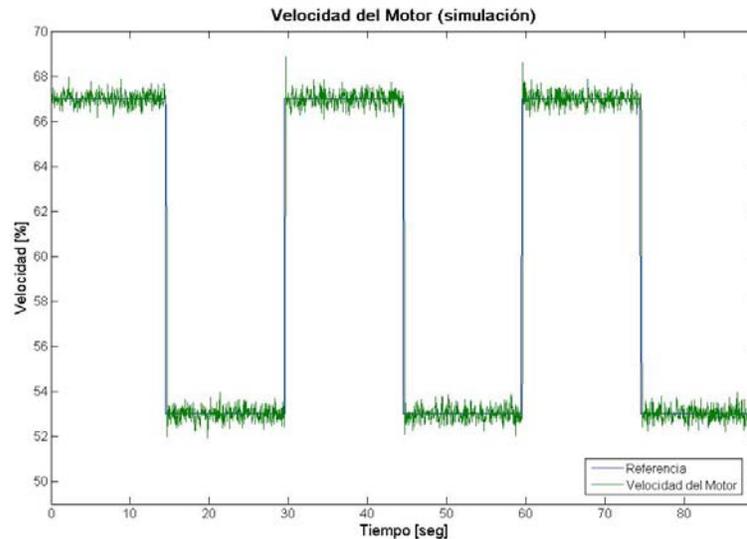
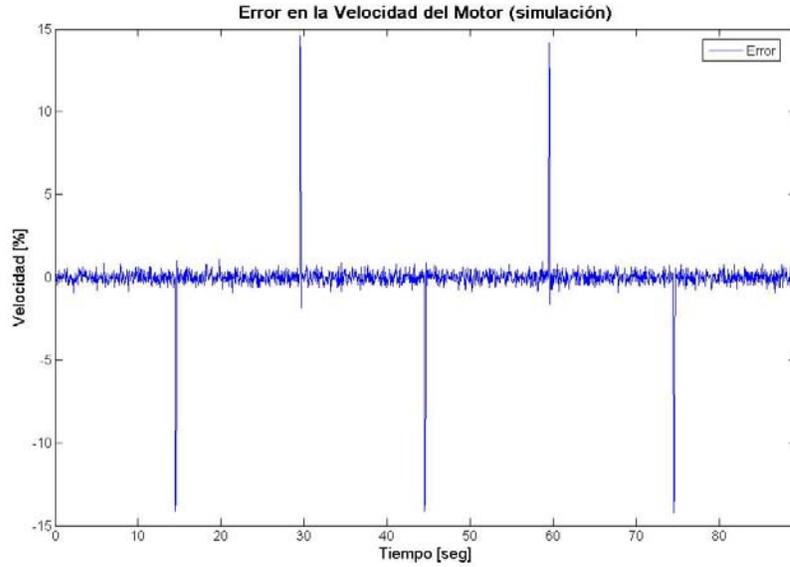
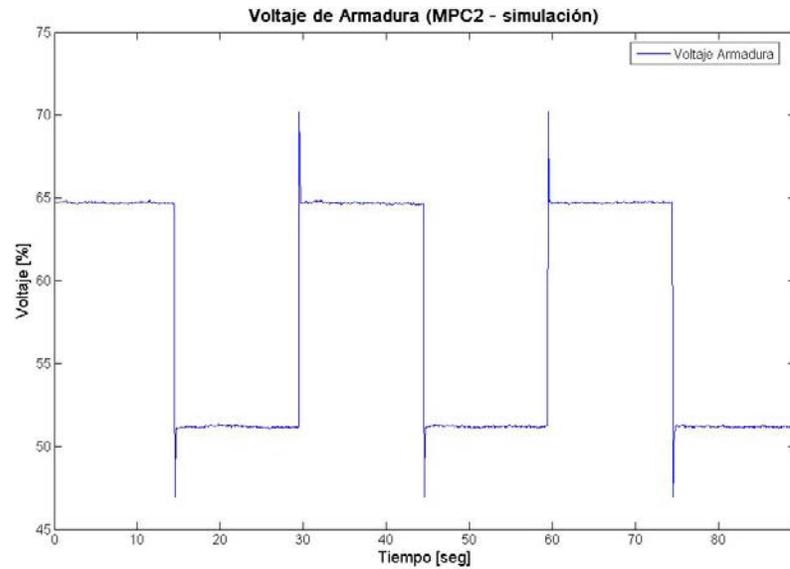


Figura 6.3.26: Velocidad del Motor bajo cambio de referencia, controlador MPC2



**Figura 6.3.27: Error de Control en la Velocidad obtenido con controlador MPC2**



**Figura 6.3.28: Voltaje de Armadura, Salida Controlador MPC2**

En la tabla 6.3.7 se observan los índices obtenidos durante esta simulación.

**Tabla 6.3.7: Índices para controlador MPC2, frente a cambio de referencia**

Media	Desviación Estándar		
	(r-y) [%]	u [%]	du [%]
0,376	1,294	6,789	0,835

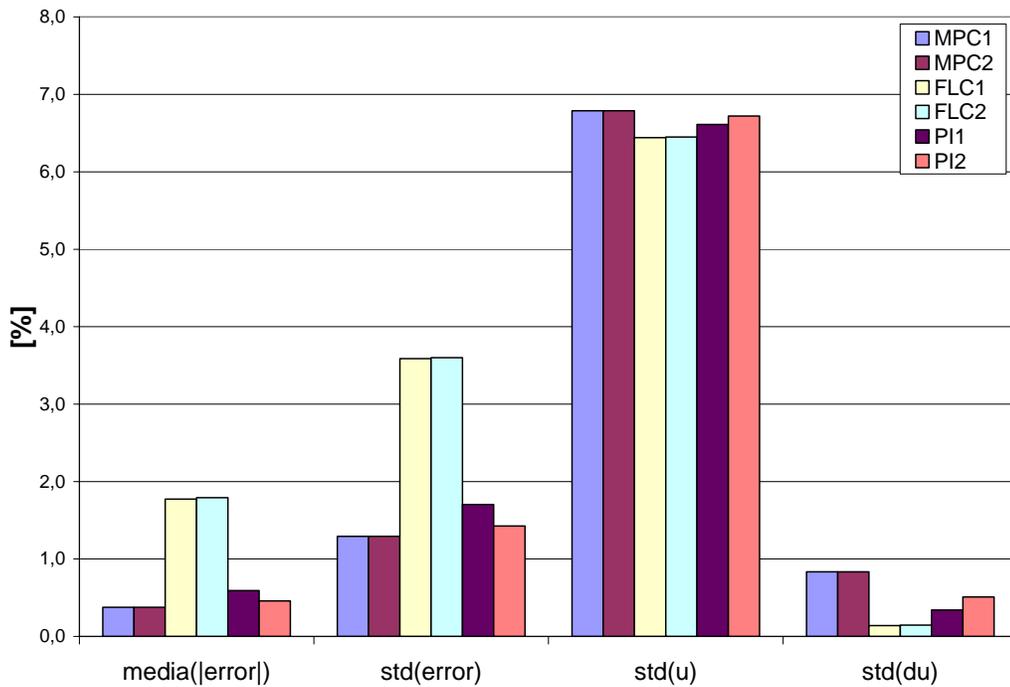
Para esta estrategia de control, ambos controladores (MPC1 y MPC2) obtienen los mismos índices para el error y la acción de control. Y de las figuras 6.3.23 a 6.3.28 no se observa ninguna gran diferencia entre ellas. Durante esta simulación no se logra identificar una ventaja al utilizar horizontes de control diferentes.

### 6.3.2.7 Análisis de Resultados

De las tablas 6.3.2 a 6.3.7, se tienen en la tabla 6.3.8 el resumen de los índices para cada una de las estrategias de control estudiadas y en la figura 6.3.29 se observan estos índices en forma gráfica.

**Tabla 6.3.8: Resumen índices para Cambio en la Velocidad de Referencia<sup>10</sup>**

	media( error ) [%]	std(error) [%]	std(u) [%]	std(du) [%]
MPC1	0,376	1,294	6,789	0,835
MPC2	0,376	1,294	6,789	0,835
FLC1	1,773	3,587	6,441	0,141
FLC2	1,791	3,599	6,449	0,146
PI1	0,592	1,704	6,613	0,341
PI2	0,459	1,426	6,719	0,509



**Figura 6.3.29: Resultados Cambio de Referencia**

Las simulaciones muestran que los controladores difusos presentan los errores más elevados y la acción de control más suave. Además, tanto las estrategias de control MPC como las estrategias de control PI obtienen un buen comportamiento manteniendo un error pequeño; sobresaliendo levemente las estrategias de control MPC con un menor valor en el error pero con un mayor esfuerzo en el control, con respecto a las estrategias de control PI.

<sup>10</sup> Los índices correspondientes al error en la velocidad hacen referencia al  $x\%$  de 3500 r.p.m, en tanto los índices para la acción de control están expresados en  $x\%$  de 50V (donde  $x$  representa el valor expresado en la tabla).

### 6.3.3 Variación en la Carga

#### 6.3.3.1 Controlador PI1

En las figuras 6.3.30 y 6.3.31 se observa la velocidad del motor y el error obtenido, respectivamente, cuando el motor se ve enfrentado a cambios en la carga mientras el controlador PI1 debe mantener la velocidad en 60%.

La figura 6.3.32 muestra la acción de control aplicada por el controlador PI1, para mantener la velocidad del motor en la referencia deseada.

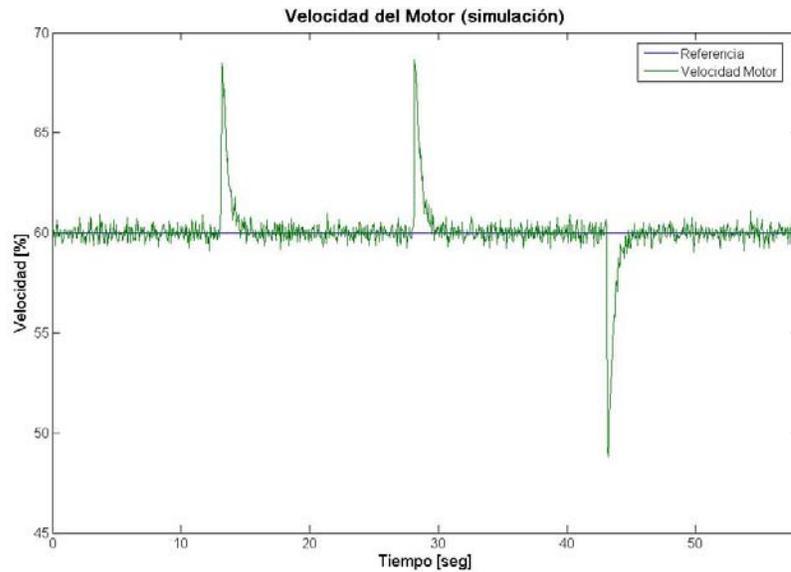


Figura 6.3.30: Velocidad del Motor bajo variación en la carga, controlador PI1

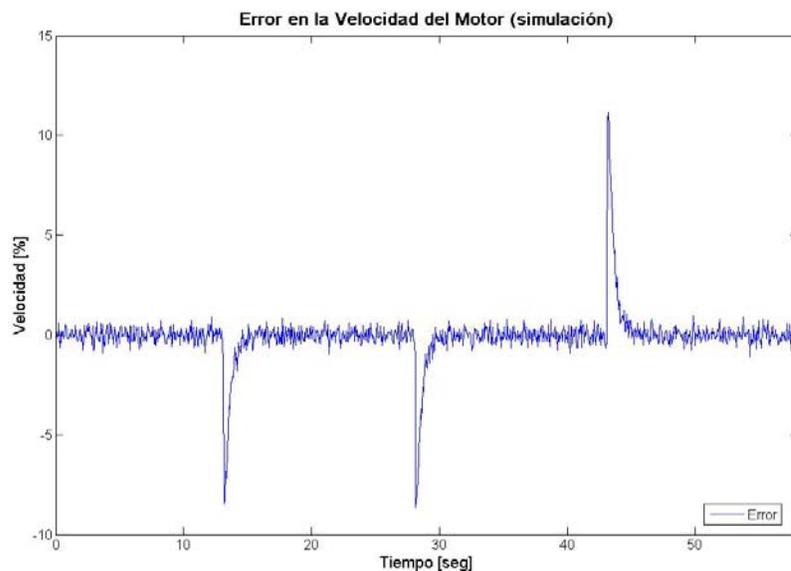


Figura 6.3.31: Error de Control en la Velocidad obtenido con controlador PI1

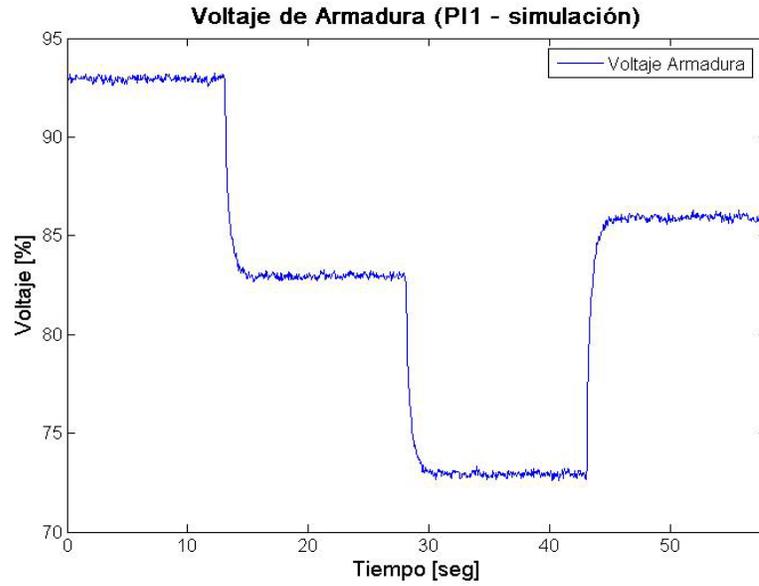


Figura 6.3.32: Voltaje de Armadura, Salida Controlador PI1

En la tabla 6.3.9 se observan los índices obtenidos para este controlador.

Tabla 6.3.9: Índices para controlador PI1, frente a variaciones en la carga

Media	Desviación Estándar		
abs(r-y) [%]	(r-y) [%]	u [%]	du [%]
0,497	1,253	7,061	0,236

### 6.3.3.2 Controlador PI2

La figura 6.3.33 muestra la velocidad del motor obtenida con el controlador PI2.

En las figuras 6.3.34 y 6.3.35 se observan el error obtenido y la acción de control aplicada por el controlador, respectivamente.

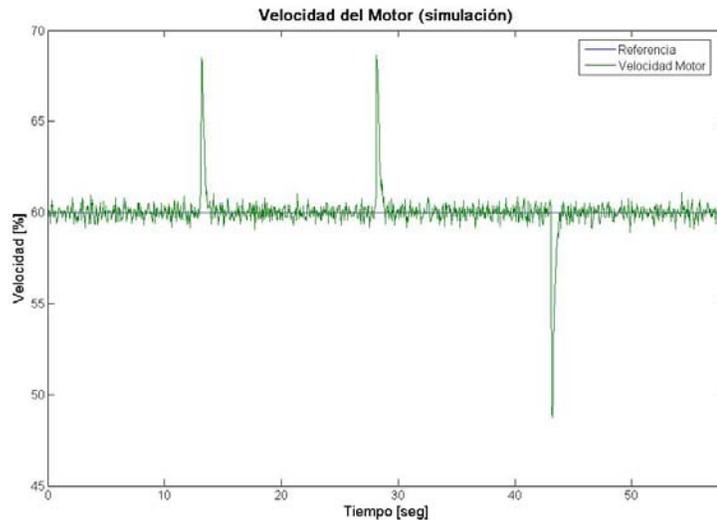
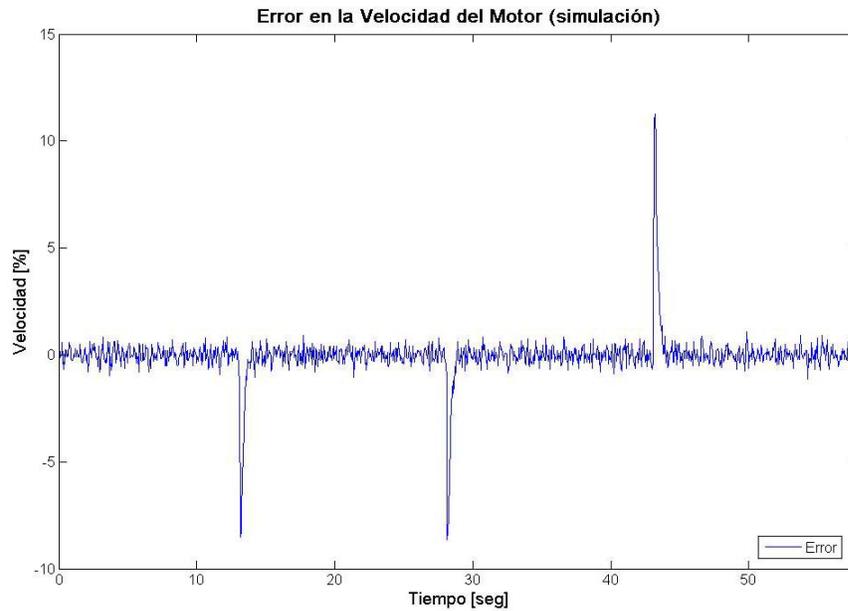
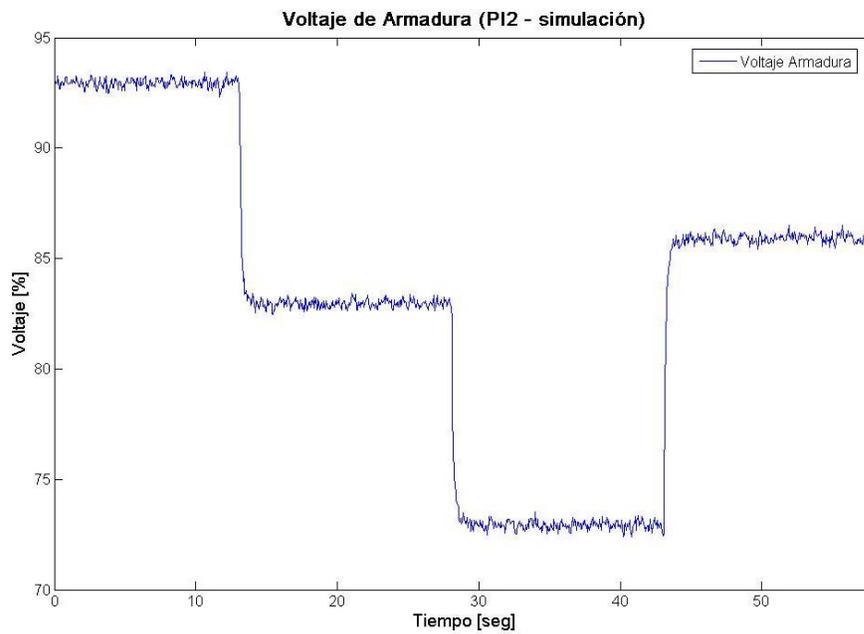


Figura 6.3.33: Velocidad del Motor bajo variación en la carga, controlador PI2



**Figura 6.3.34: Error de Control en la Velocidad obtenido con controlador PI2**



**Figura 6.3.35: Voltaje de Armadura, Salida Controlador PI2**

La tabla 6.3.10 presenta los índices para el controlador PI2.

**Tabla 6.3.10: Índices para controlador PI2, frente a variaciones en la carga**

Media	Desviación Estándar		
	(r-y) [%]	u [%]	du [%]
0,406	1,007	7,098	0,346

### 6.3.3.3 Controlador FLC1

Las figuras 6.3.36 y 6.3.37 muestran el comportamiento obtenido para la velocidad del motor y el error en la salida, respectivamente, utilizando el controlador FLC1.

En la figura 6.3.38 se puede observar la acción aplicada por el controlador FLC1.

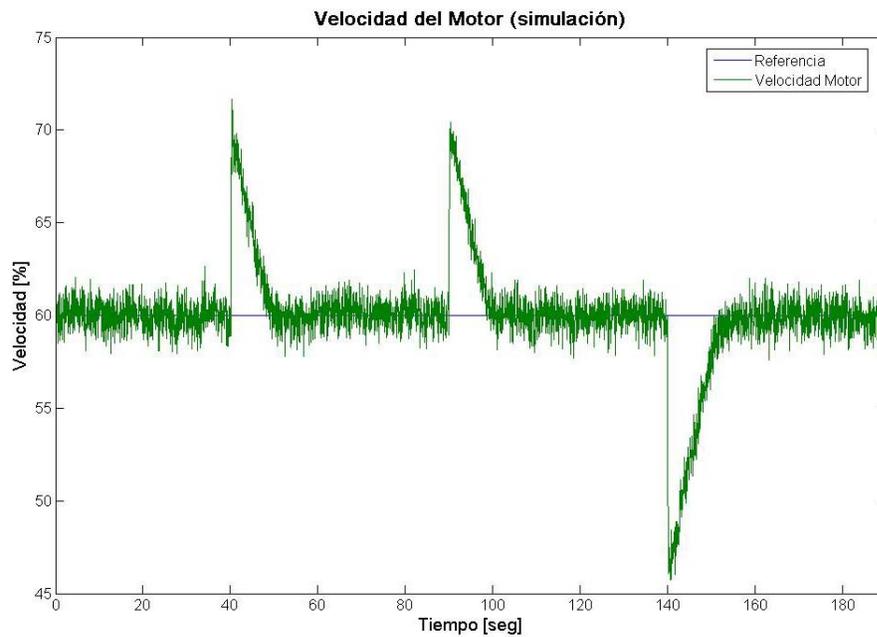


Figura 6.3.36: Velocidad del Motor bajo variación en la carga, controlador FLC1

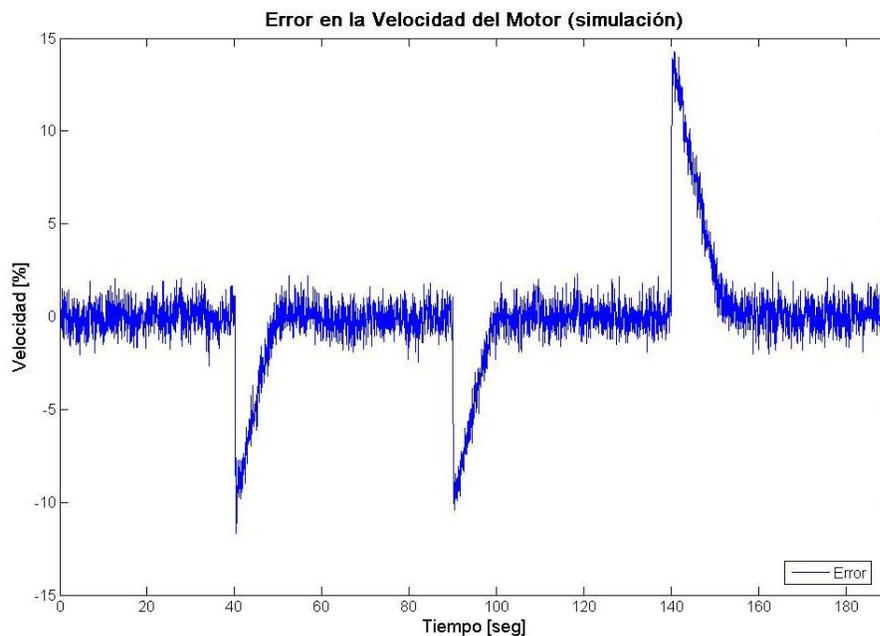
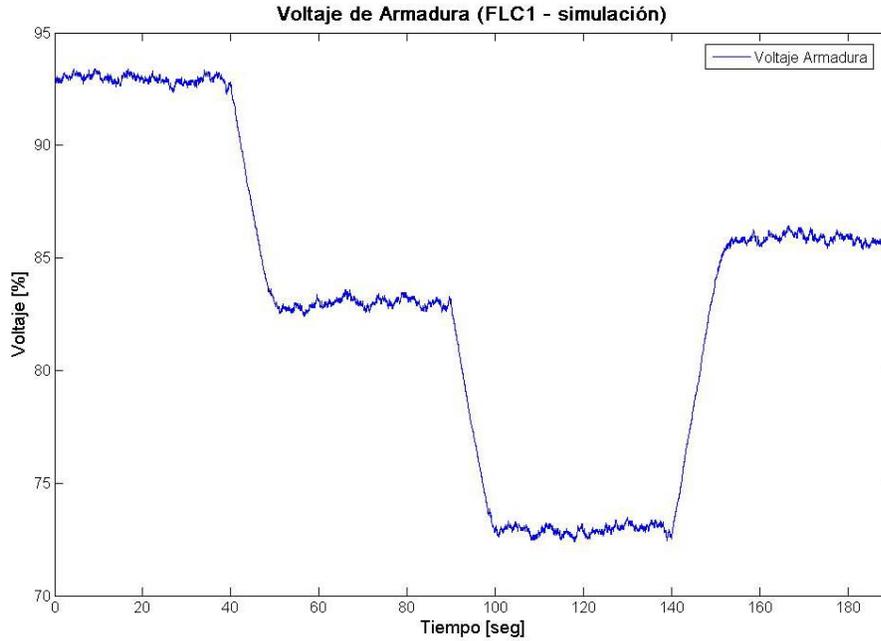


Figura 6.3.37: Error de Control en la Velocidad obtenido con controlador FLC1



**Figura 6.3.38: Voltaje de Armadura, Salida Controlador FLC1**

La tabla 6.3.11 presenta los índices obtenidos en esta prueba para el controlador FLC1.

**Tabla 6.3.11: Índices para controlador FLC1, frente a variaciones en la carga**

Media	Desviación Estándar		
abs(r-y) [%]	(r-y) [%]	u [%]	du [%]
1,402	2,749	7,006	0,092

### 6.3.3.4 Controlador FLC2

En la figura 6.3.39 se observa la velocidad del motor obtenida utilizando el controlador FLC2. Se observa como el controlador difuso se toma un mayor tiempo de levantamiento que el controlador PI para llevar la velocidad a la referencia deseada.

En la figura 6.3.40 se muestra como el elevado tiempo de levantamiento (con respecto a las estrategias de control PI y MPC) se refleja en un mayor error.

La acción aplicada por el controlador FLC2 se muestra en la figura 6.3.41.

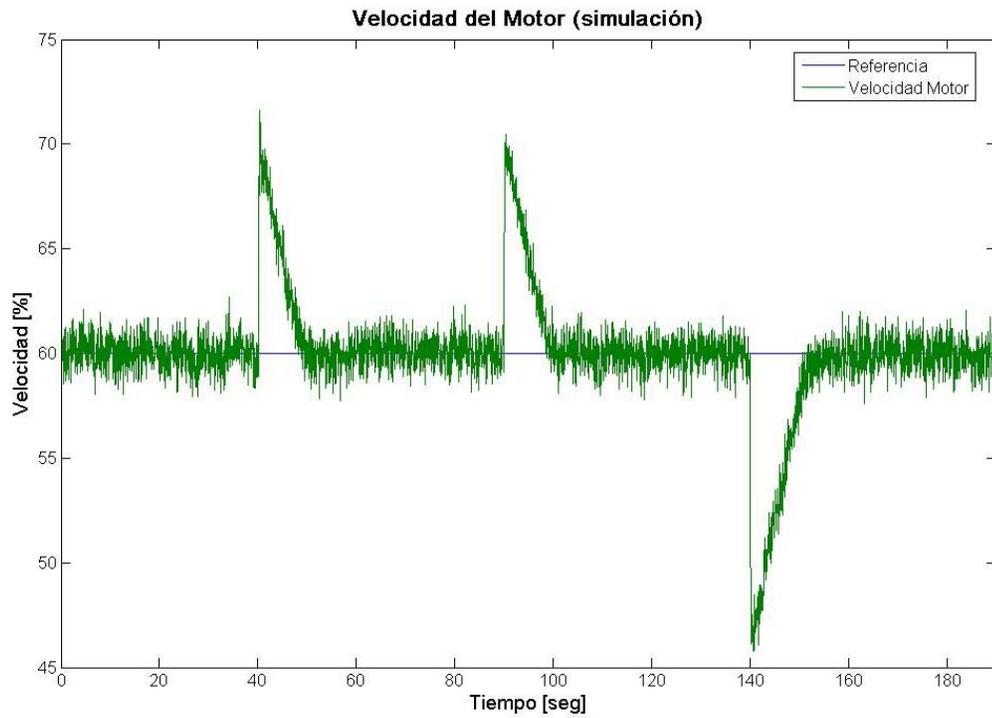


Figura 6.3.39: Salida Planta bajo variación en la carga, controlador FLC2

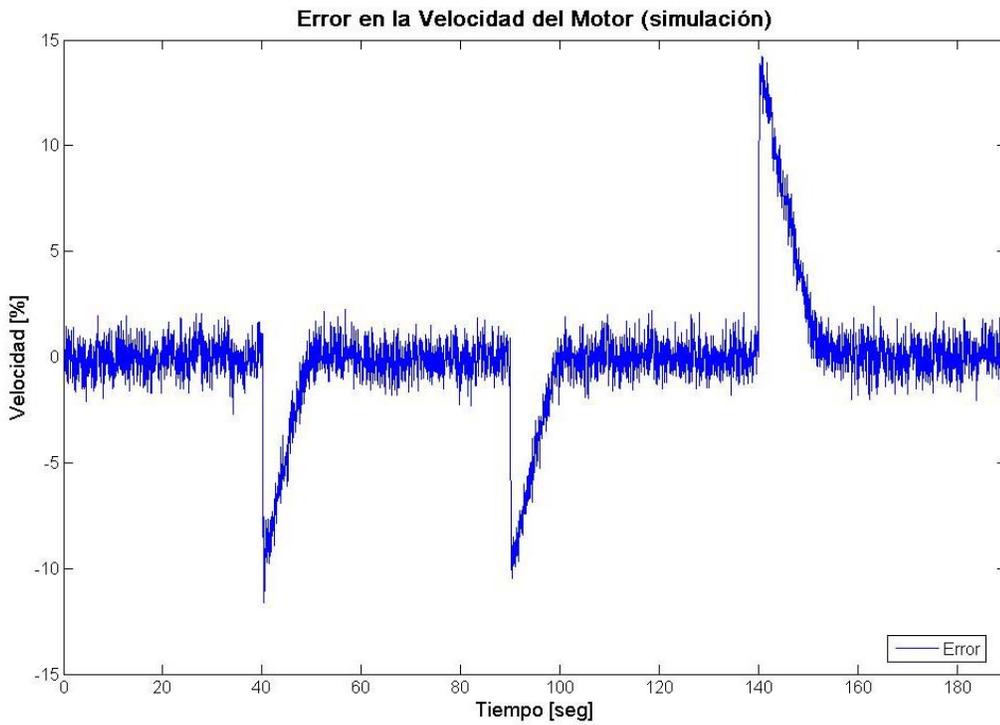
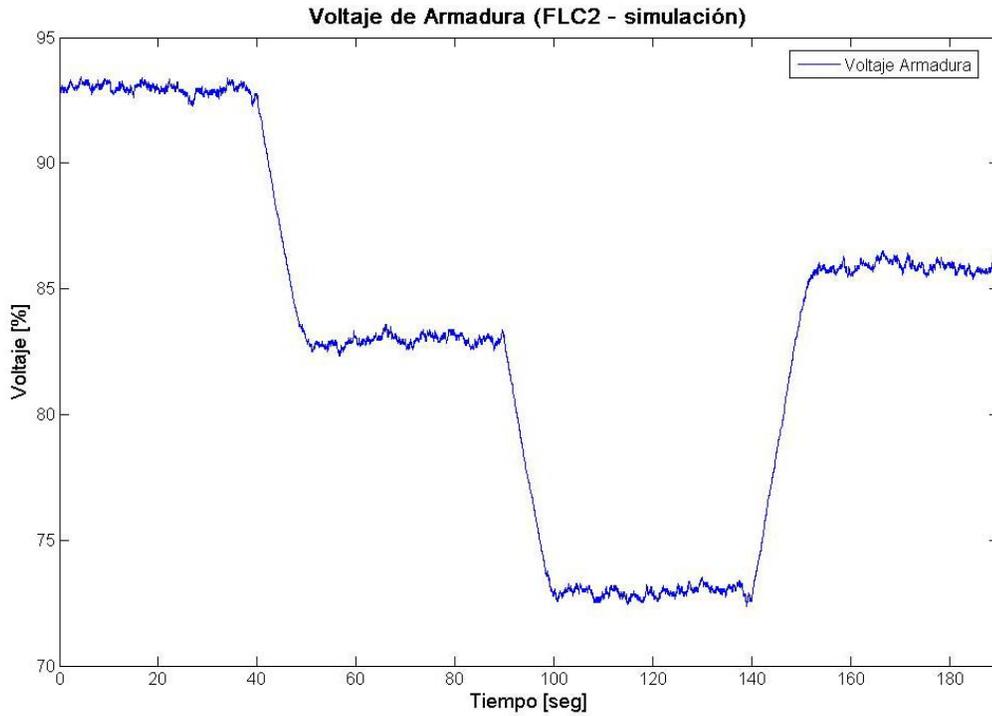


Figura 6.3.40: Error de Control en la Velocidad obtenido con controlador FLC2



**Figura 6.3.41: Voltaje de Armadura, Salida Controlador FLC2**

Los índices que se obtienen para este controlador se muestran en la tabla 6.3.12.

**Tabla 6.3.12: Índices para controlador FLC2, frente a variaciones en la carga**

Media	Desviación Estándar		
abs(r-y) [%]	(r-y) [%]	u [%]	du [%]
1,397	2,738	7,007	0,091

Hasta el momento el controlador difuso ha demostrado mantener la desviación del esfuerzo de control en torno a 0,1. Pero también mantiene un error grande, el tiempo que toma para llevar la velocidad del motor a la velocidad deseada influye en que el error obtenido para esta estrategia de control siempre sea mayor al error en los controladores PI o MPC que responden rápidamente a los cambios.

### 6.3.3.5 Controlador MPC1

El comportamiento de la velocidad del motor y el error obtenido durante esta prueba se observan en las figuras 6.3.42 y 6.3.43, respectivamente. La acción de control aplicada por el controlador MPC1 se muestra en la figura 6.3.44.

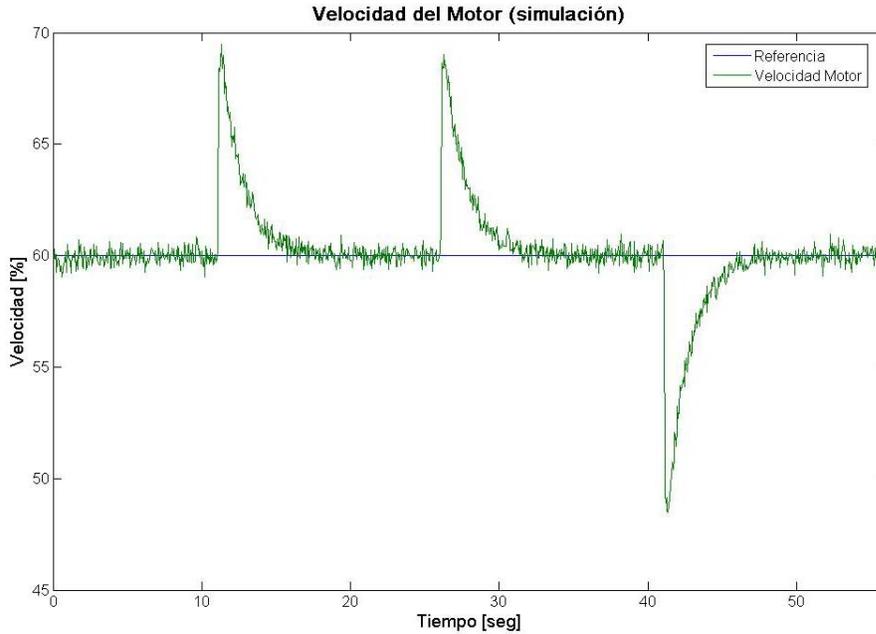


Figura 6.3.42: Velocidad del Motor bajo variación en la carga, controlador MPC1

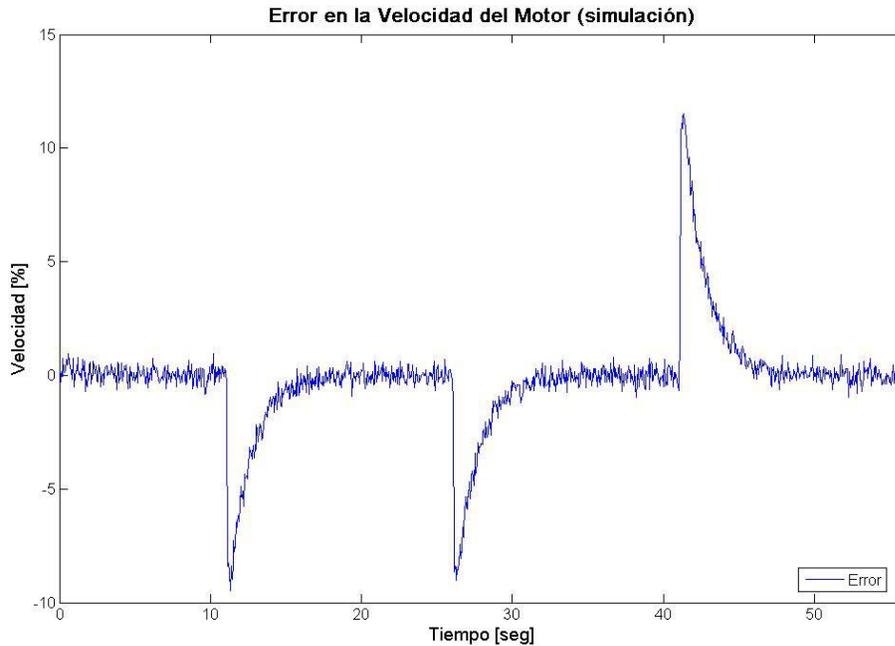


Figura 6.3.43: Error de Control en la Velocidad obtenido con controlador MPC1

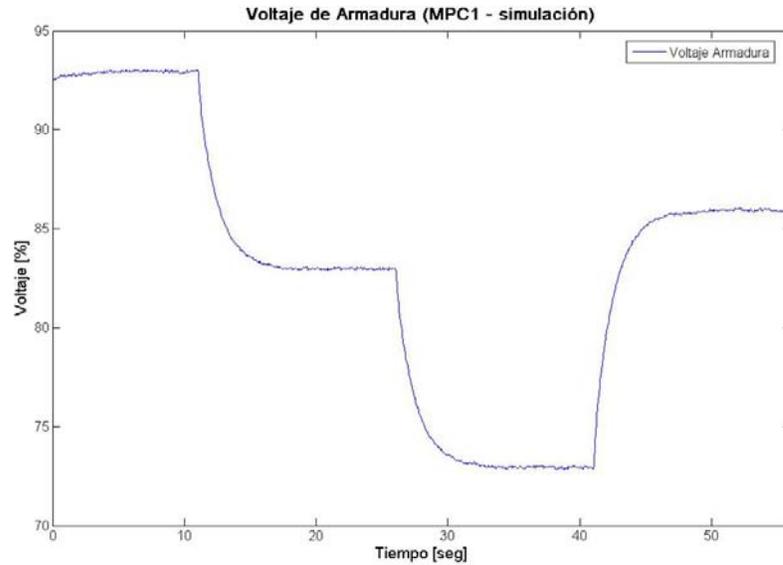


Figura 6.3.44: Voltaje de Armadura, Salida Controlador MPC1

La tabla 6.3.13 presenta los índices obtenidos para el controlador MPC1 en esta prueba.

Tabla 6.3.13: Índices para controlador MPC1, frente a variaciones en la carga

Media	Desviación Estándar		
abs(r-y) [%]	(r-y) [%]	u [%]	du [%]
1,043	2,219	6,799	0,096

### 6.3.3.6 Controlador MPC2

Las figuras 6.3.45 y 6.3.46 muestran la velocidad del motor y el error asociado, respectivamente, para este controlador. La acción de control aplicada se observa en la figura 6.3.47.

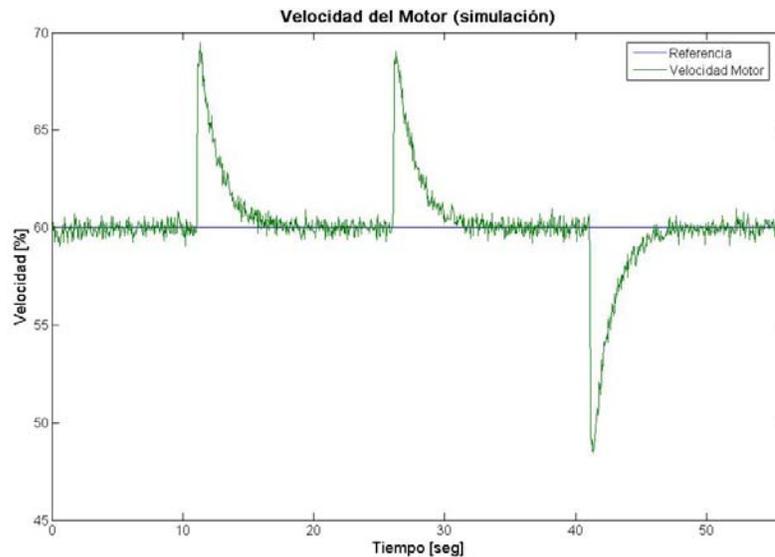


Figura 6.3.45: Velocidad del Motor bajo variación en la carga, controlador MPC2

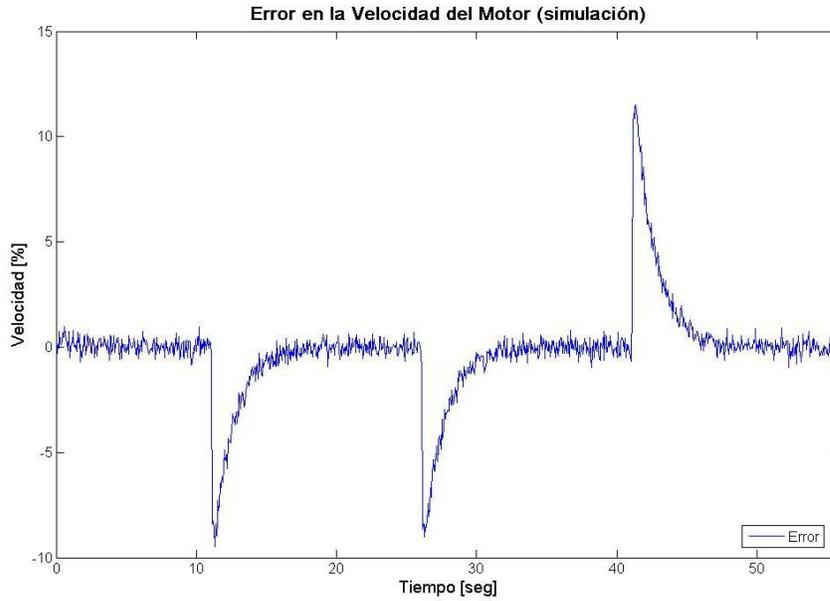


Figura 6.3.46: Error de Control en la Velocidad obtenido con controlador MPC2

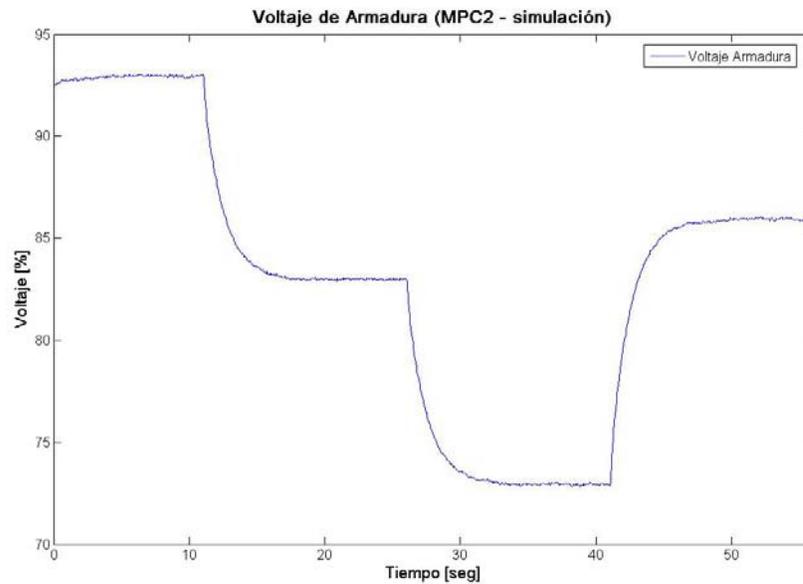


Figura 6.3.47: Voltaje de Armadura, Salida Controlador MPC2

Los índices obtenidos para el controlador MPC2 se presentan en la tabla 6.3.14.

Tabla 6.3.14: Índices para controlador MPC2, frente a variaciones en la carga

Media	Desviación Estándar			
	abs(r-y) [%]	(r-y) [%]	u [%]	du [%]
1,043	2,219	6,799	0,096	

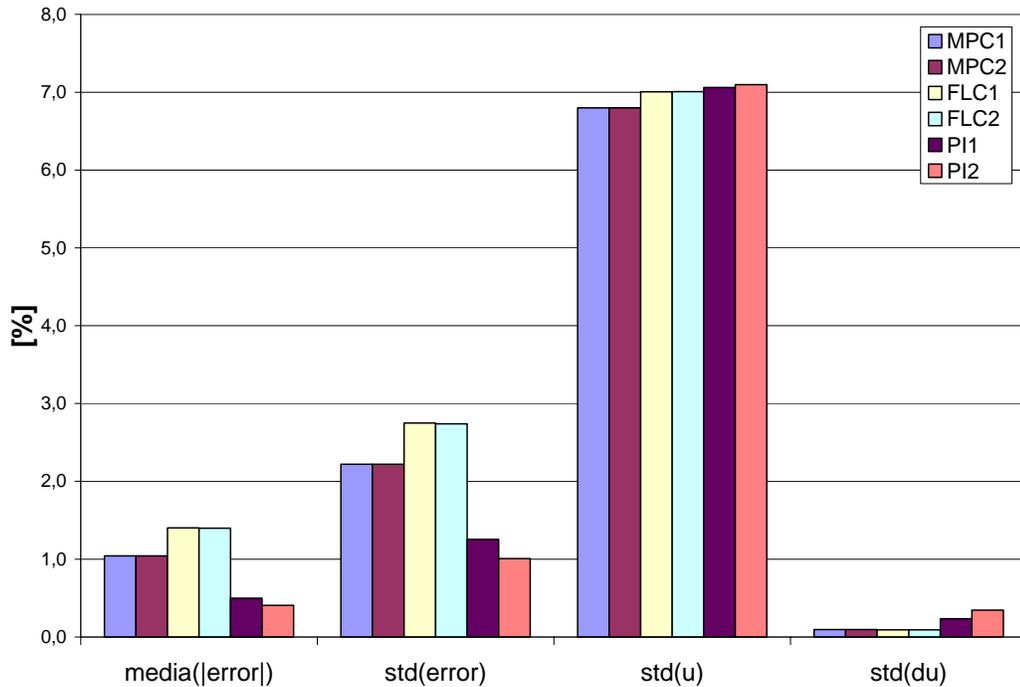
En esta prueba, los controladores MPC presentan un tiempo de levantamiento mayor al de los controladores PI, observándose un comportamiento similar a los controladores FLC.

### 6.3.3.7 Análisis de Resultados

A partir de las tablas 6.3.9 y 6.3.14, se presentan los índices obtenidos en la tabla 6.3.15 y en la figura 6.3.48 se muestra una representación gráfica de estos índices.

**Tabla 6.3.15: Resumen índices para Variación en la Carga**

	media( error ) [%]	std(error) [%]	std(u) [%]	std(du) [%]
MPC1	1,043	2,219	6,799	0,096
MPC2	1,043	2,219	6,799	0,096
FLC1	1,402	2,749	7,006	0,095
FLC2	1,397	2,738	7,007	0,091
PI1	0,497	1,253	7,061	0,236
PI2	0,406	1,007	7,098	0,346



**Figura 6.3.48: Resultados Variación en la Carga**

En esta prueba, se obtuvo que los controladores PI presentan el mejor desempeño, un error bajo, con respecto a los controladores MPC y FLC, y un esfuerzo de control comparable con el de las otras estrategias de control.

Los controladores FLC, nuevamente presentan el peor desempeño, aunque esta vez el comportamiento de los controladores MPC resultó ser similar al del FLC.

En el desarrollo de las simulaciones, no se nota ninguna variación significativa para la variación del horizonte de control de las estrategias MPC.

## VII Implementación de Estrategias de Control

En este capítulo se muestran los resultados que se obtuvieron al implementar las estrategias de control en tiempo real utilizando el sistema de control distribuido DeltaV.

La figura 7.1 muestra el diagrama de conexión que se utiliza para realizar las pruebas en tiempo real.

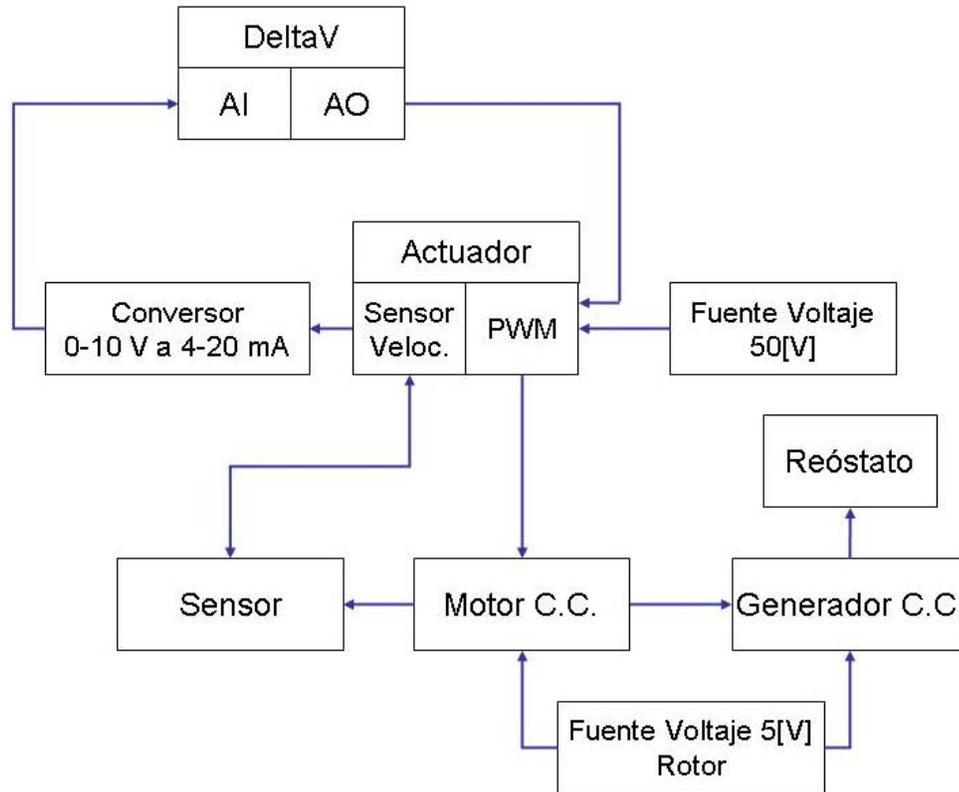


Figura 7.1: Diagrama Conexión DeltaV - Motor C.C.

## 7.1 Partida del Motor

### 7.1.1 Controlador PI

La figura 7.1.1 presenta la velocidad del motor utilizando el controlador PI.

En la figura 7.1.2, detalle de la figura 7.1.1, se observa el tiempo de levantamiento para este controlador, que corresponde a 19 seg.

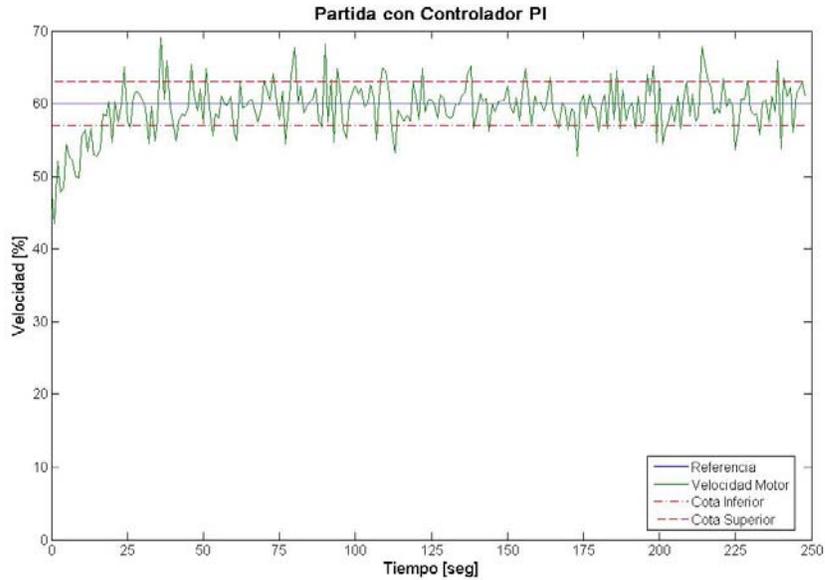


Figura 7.1.1: Partida del Motor utilizando controlador PI

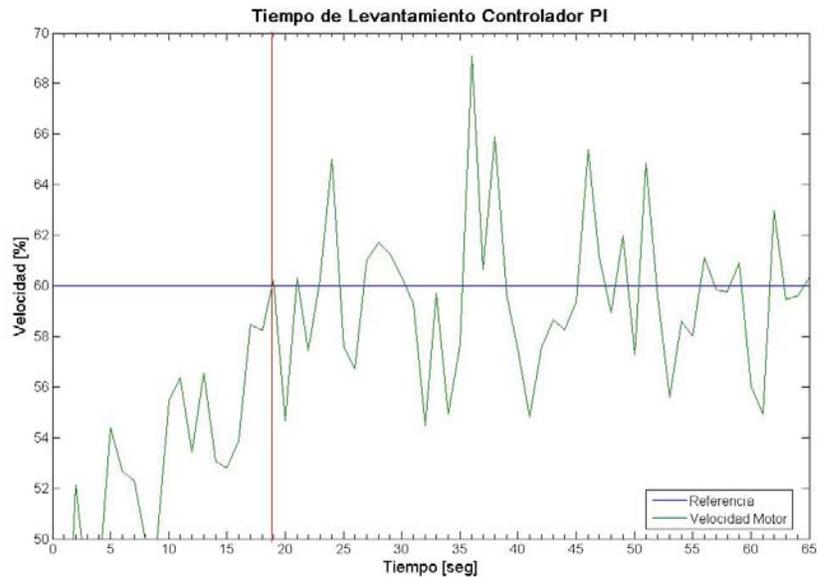


Figura 7.1.2: Tiempo de Levantamiento Controlador PI (detalle Figura 7.1.1)

En las figuras 7.1.1 y 7.1.3 se observa que no se logra mantener la velocidad dentro de la zona de asentamiento, a pesar de esto el controlador mantiene estable y en torno a la referencia la velocidad del motor. El exceso de ruido y la amplificación de éste debido al escalamiento necesario para dejar la señal que indica el valor de la salida de la planta en la escala 0-100%<sup>11</sup>, afecta fuertemente al controlador PI, impidiendo definir un tiempo de asentamiento.

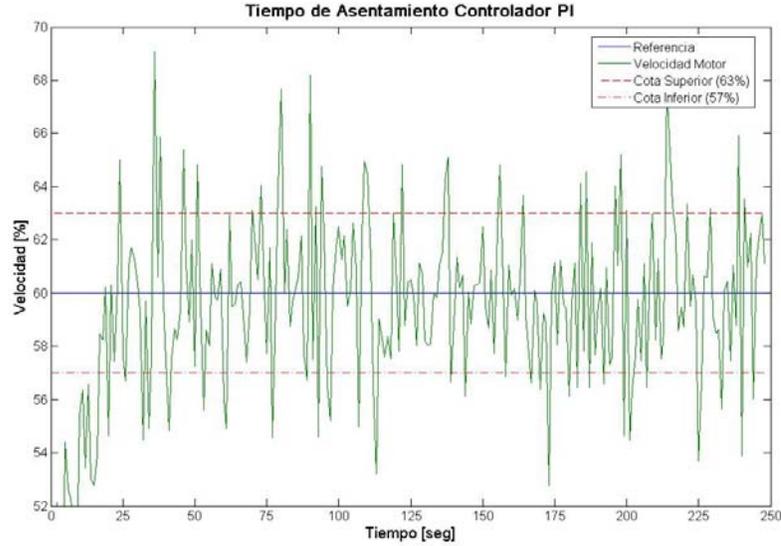


Figura 7.1.3: Tiempo de Asentamiento Controlador PI (detalle Figura 7.1.1)

### 7.1.2 Controlador FLC

Se observa en la figura 7.1.4 la velocidad del motor utilizando el controlador FLC.

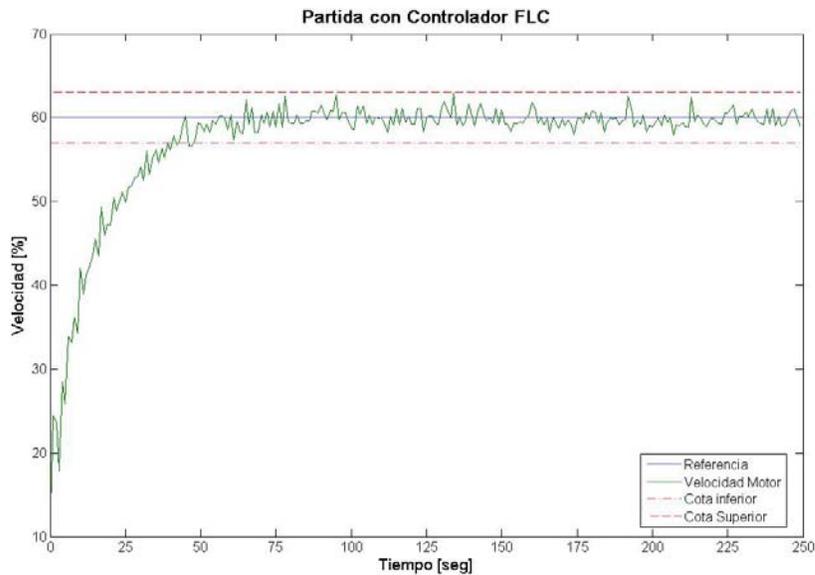


Figura 7.1.4: Partida del Motor utilizando controlador FLC

<sup>11</sup> Este escalamiento se especifica en el capítulo 10.2

El tiempo de levantamiento (45 seg.) y el tiempo de asentamiento (47,5 seg.) para el controlador FLC se observan en las figuras 7.1.5 y 7.1.6, respectivamente.

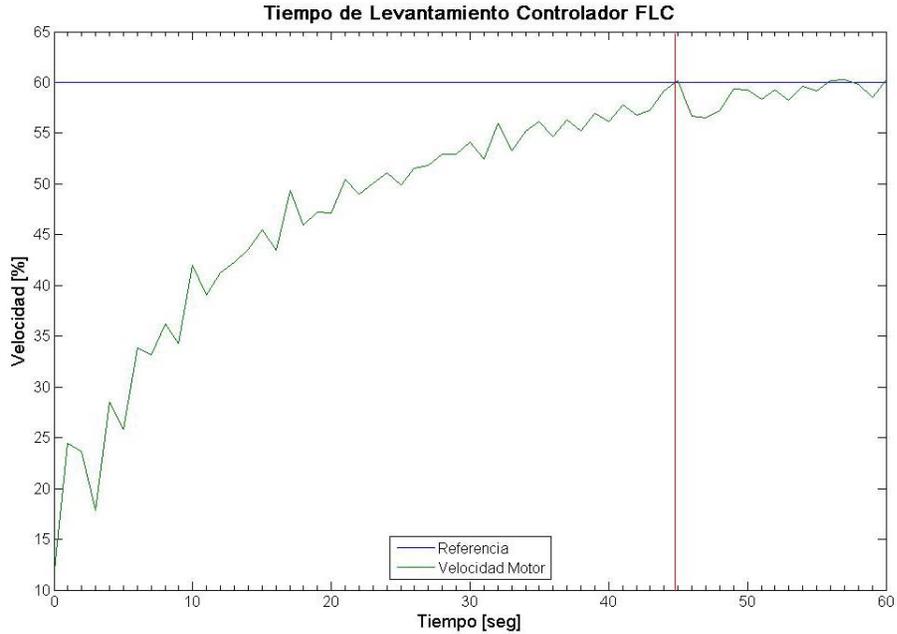


Figura 7.1.5: Tiempo de Levantamiento Controlador FLC (detalle Figura 7.1.4)

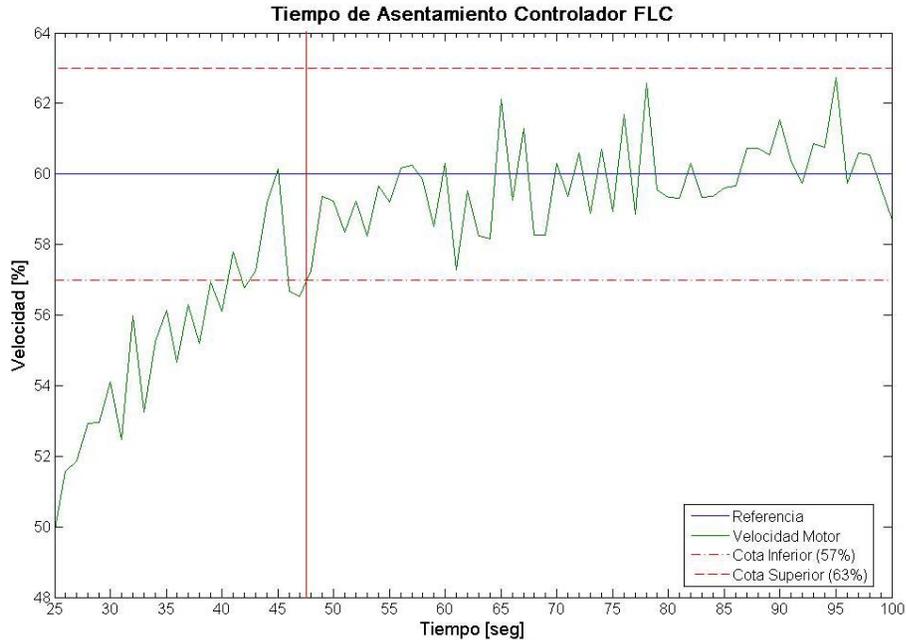


Figura 7.1.6: Tiempo de Asentamiento Controlador FLC (detalle Figura 7.1.4)

### 7.1.3 Controlador MPC

La velocidad del motor observada durante esta prueba se muestra en la figura 7.1.7. En la figura 7.1.8, detalle de la figura 7.1.7, muestra que el tiempo de levantamiento es 33 seg.

En las figuras 7.1.7 y 7.1.9 se puede observar que el tiempo de asentamiento para este controlador es 19,5 seg.

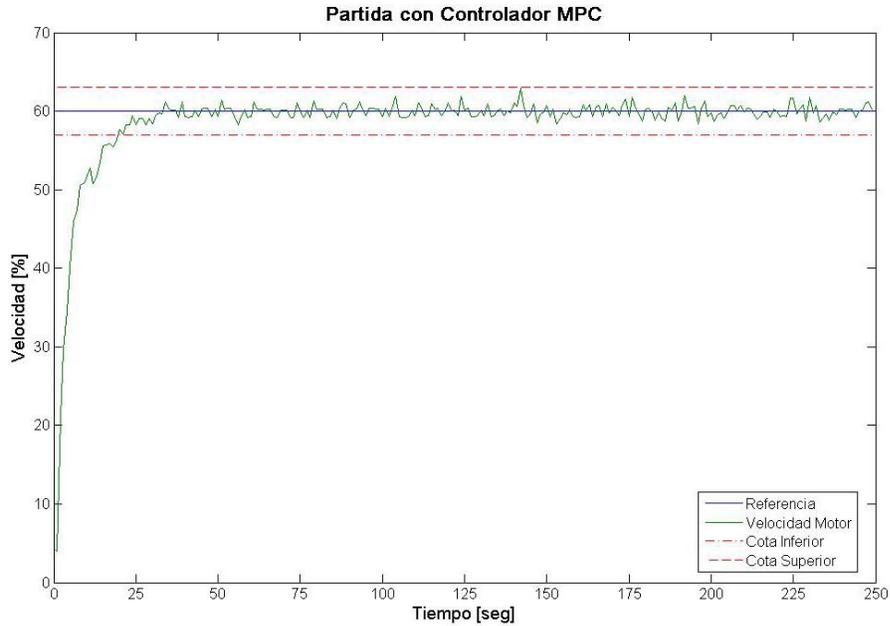


Figura 7.1.7: Partida del Motor utilizando controlador MPC

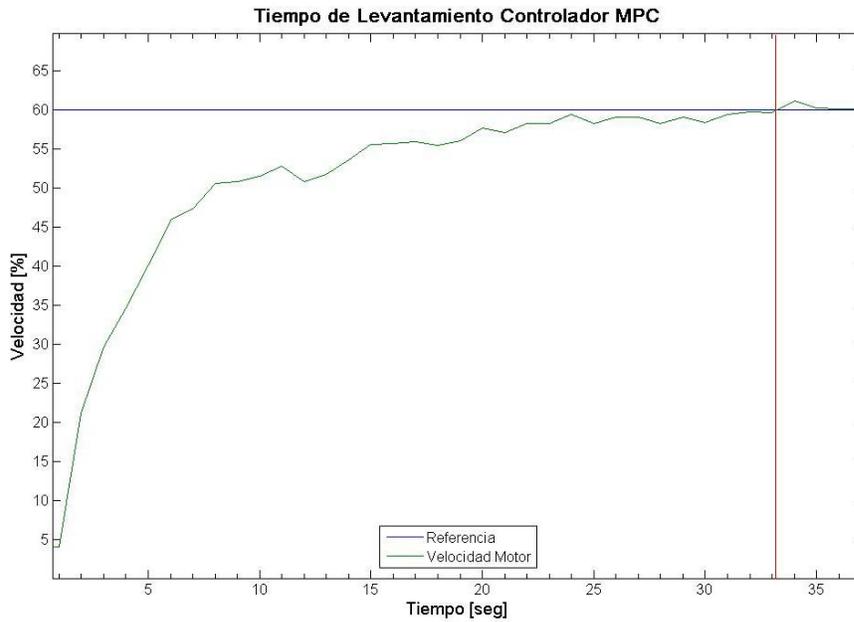
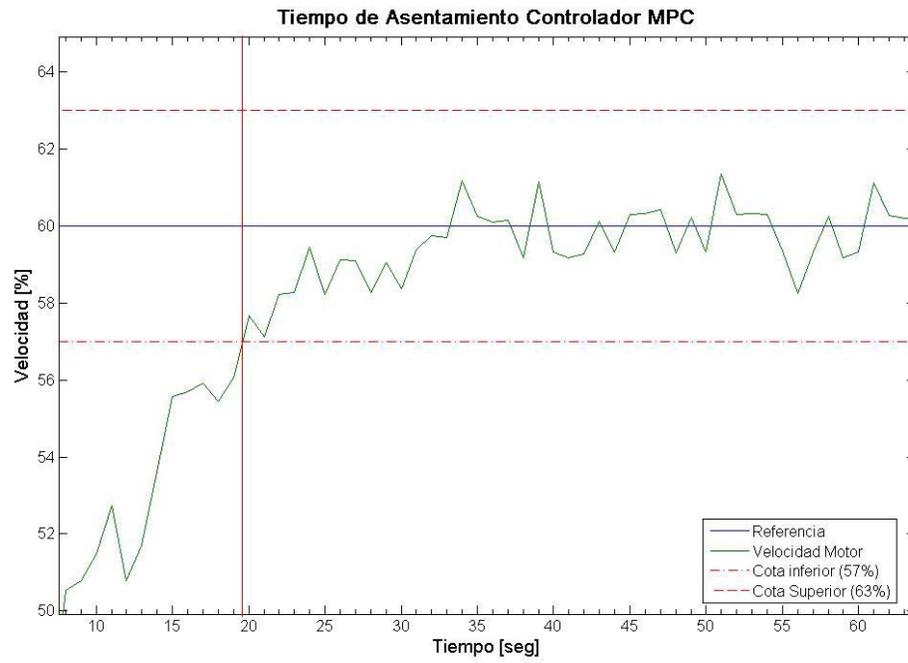


Figura 7.1.8: Tiempo de Levantamiento Controlador MPC (detalle Figura 7.1.7)



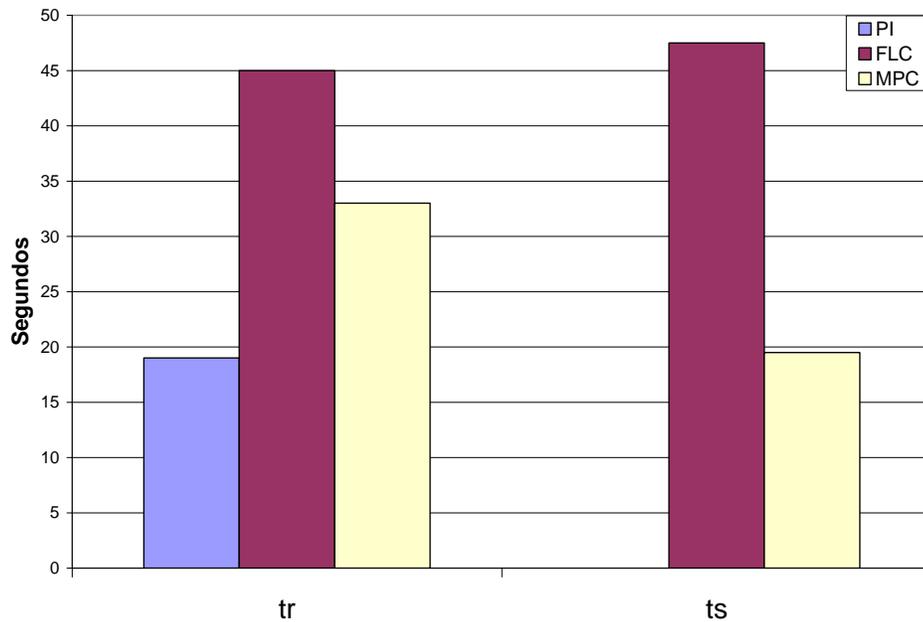
**Figura 7.1.9: Tiempo de Asentamiento Controlador MPC (detalle Figura 7.1.7)**

### 7.1.4 Análisis de Resultados

A partir de las figuras 7.1.1 a 7.1.9, en la tabla 7.1.1 se observa el tiempo de levantamiento y el tiempo de asentamiento para cada estrategia de control. En la figura 7.1.10 se presenta gráficamente estos valores.

**Tabla 7.1.1: Resumen de Tiempos para la Partida del Motor**

	Tiempo de Levantamiento, tr [seg]	Tiempo de Asentamiento, ts [seg]
PI	19	---
FLC	45	47,5
MPC	33	19,5



**Figura 7.1.10: Tiempos de Levantamiento y de Asentamiento**

El controlador PI llevó más rápidamente la planta a la referencia deseada, pero no logró mantenerla dentro de la banda (fijada por una tolerancia del 5%), aunque mantiene al sistema estable entorno a la velocidad de referencia.

El controlador FLC, tal como sucedió en la simulación, experimento los mayores tiempos. Y considerando que no se logró tener un tiempo de asentamiento para el controlador PI, el mejor tiempo lo obtiene el controlador MPC.

Una mejor sintonización para el controlador PI, hubiera permitido obtener un tiempo de asentamiento.

## 7.2 Cambio en la Velocidad de Referencia

### 7.2.1 Controlador PI1

En la figura 7.2.1 se puede apreciar el comportamiento de la velocidad del motor frente a los cambios de referencia, utilizando el controlador PI1.

El error obtenido en esta prueba se observa en la figura 7.2.2 y en la figura 7.2.3 se muestra la acción de control aplicada.

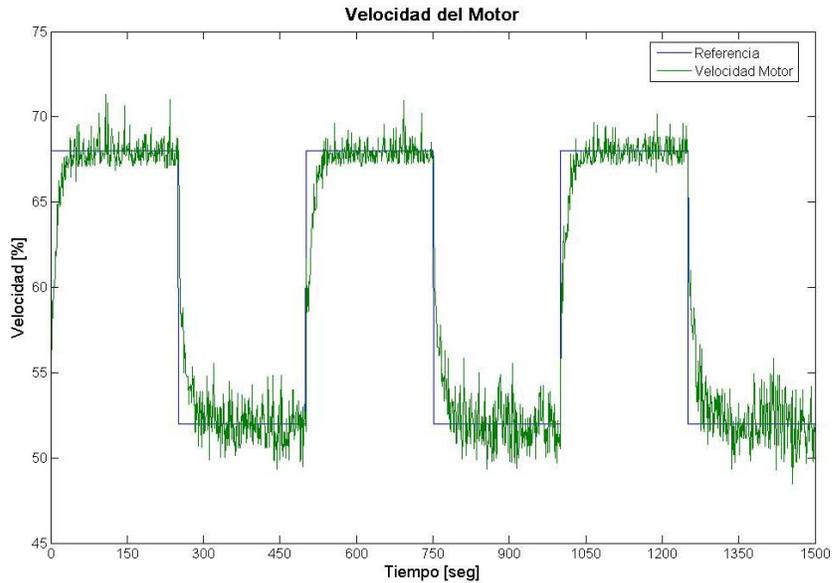


Figura 7.2.1: Velocidad del Motor bajo cambio de referencia, controlador PI1

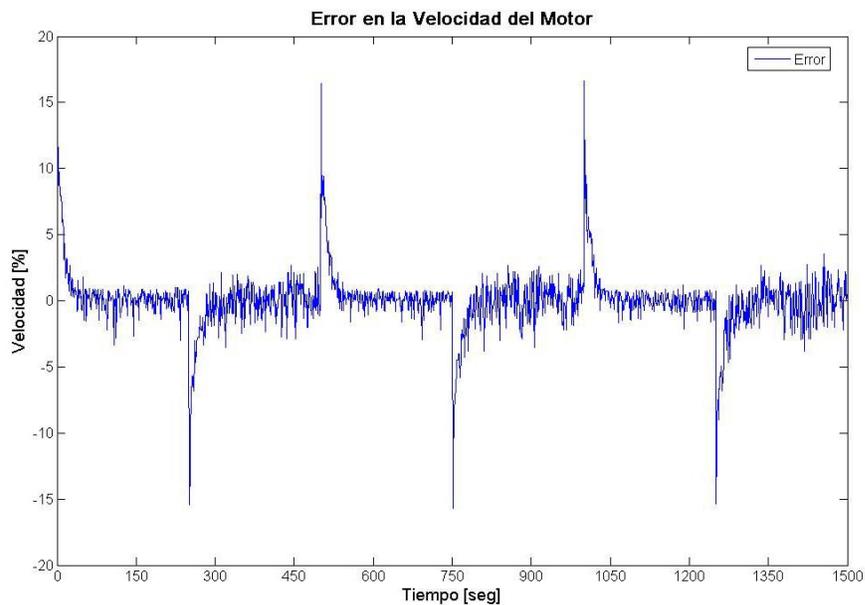


Figura 7.2.2: Error de Control en la Velocidad obtenido con controlador PI1

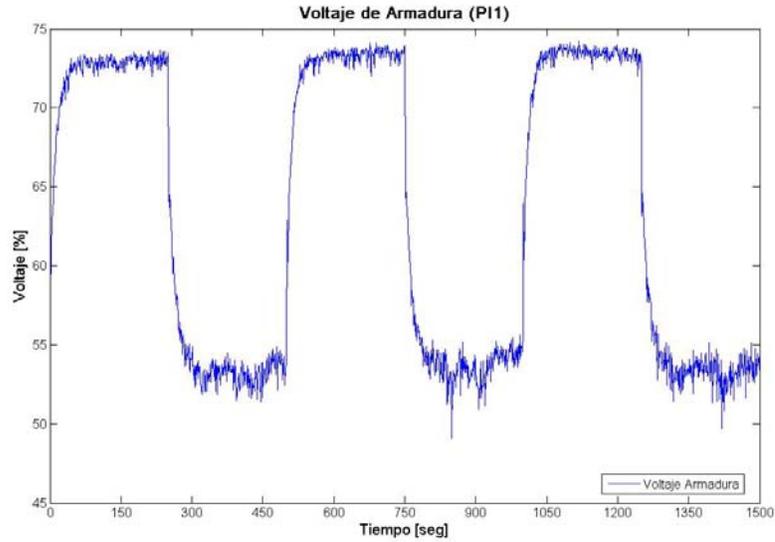


Figura 7.2.3: Voltaje de Armadura, Salida Controlador PI1

La tabla 7.2.1 muestra los índices obtenidos para el controlador PI1.

Tabla 7.2.1: Índices para controlador PI1, frente a cambio de referencia

Media	Desviación Estándar		
abs(r-y) [%]	(r-y) [%]	u [%]	du [%]
1,209	2,184	9,455	0,937

## 7.2.2 Controlador PI2

Se observa en la figura 7.2.4 la velocidad del motor frente a los cambios en la velocidad de referencia. En las figuras 7.2.5 y 7.2.6 se muestran el error obtenido y la acción de control aplicada, respectivamente, para el controlador PI2.

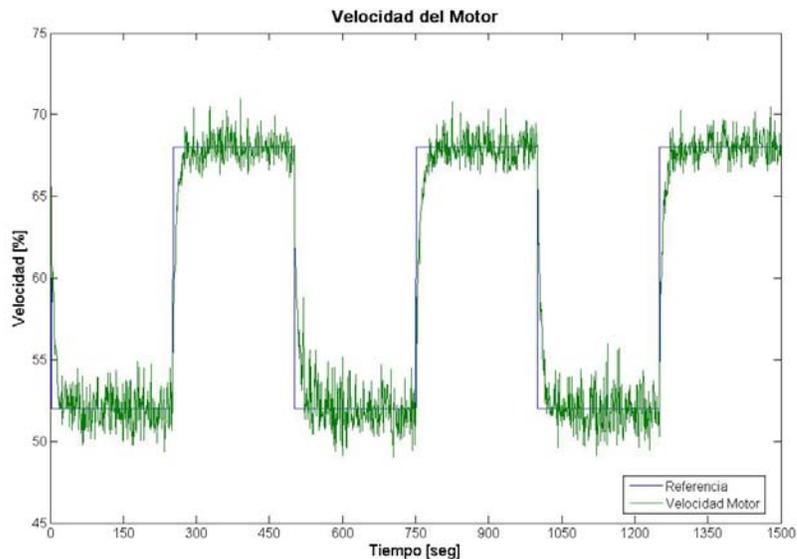


Figura 7.2.4: Velocidad del Motor bajo cambio de referencia, controlador PI2

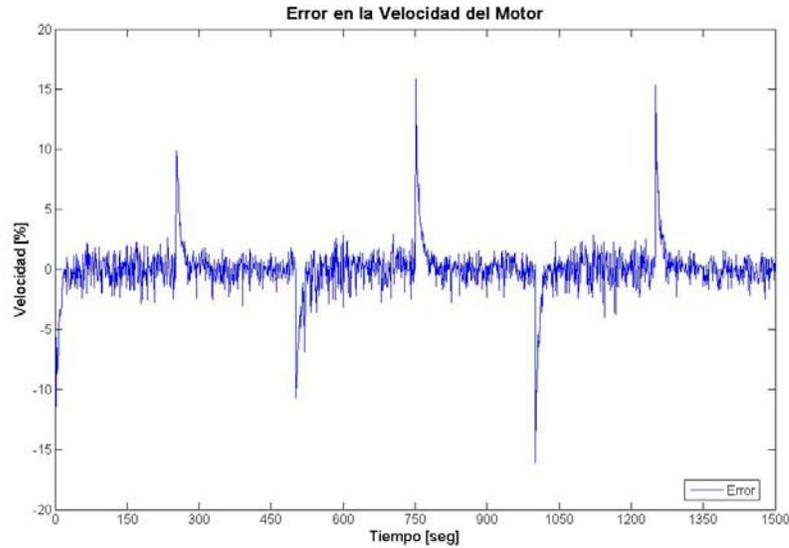


Figura 7.2.5: Error de Control en la Velocidad obtenido con controlador PI2

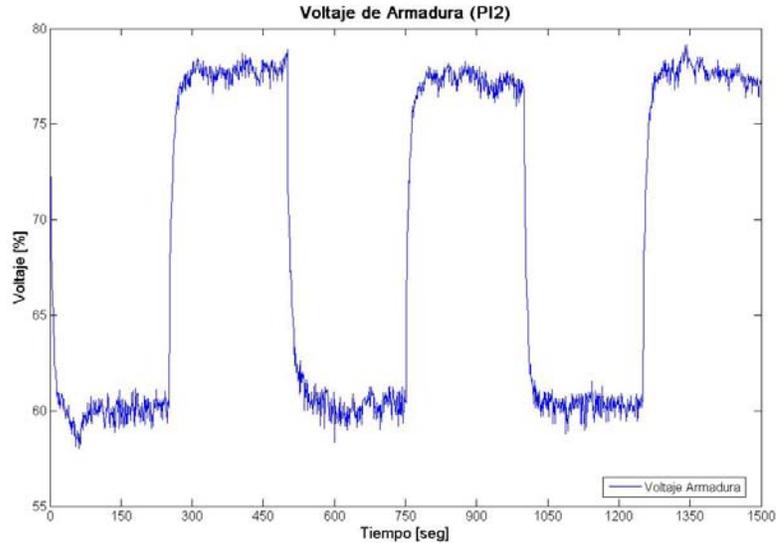


Figura 7.2.6: Voltaje de Armadura, Salida Controlador PI2

La tabla 7.2.2 entrega los índices que se obtuvieron a través de esta prueba para el controlador PI2.

Tabla 7.2.2: Índices para controlador PI2, frente a cambio de Referencia

Media	Desviación Estándar		
abs(r-y) [%]	(r-y) [%]	u [%]	du [%]
1,129	1,933	8,484	0,689

En contraste a lo obtenido en las simulaciones, el controlador PI1 es mejor evaluado en estos cuatro índices, en comparación con el controlador PI2<sup>12</sup>.

<sup>12</sup> En las simulaciones se observó que el controlador PI1 tenía los menores valores en la acción de control y el controlador PI2 en el error (capítulo 6.3.2).

### 7.2.3 Controlador FLC1

En la figura 7.2.7 se observa la salida de la planta frente a los cambios en la velocidad de referencia, al utilizar el controlador FLC1.

El error obtenido y la acción aplicada se observan en las figuras 7.2.8 y 7.2.9, respectivamente.

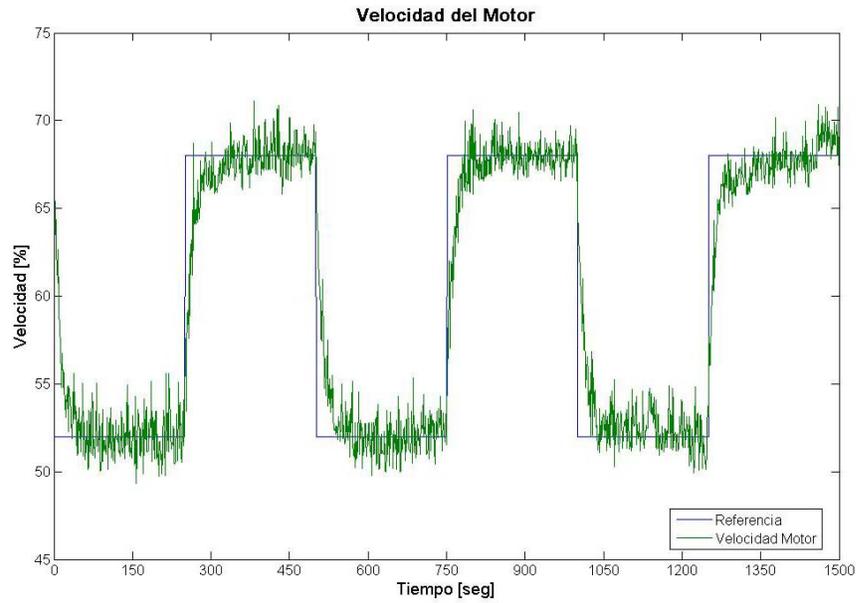


Figura 7.2.7: Velocidad del Motor bajo cambio de referencia, controlador FLC1

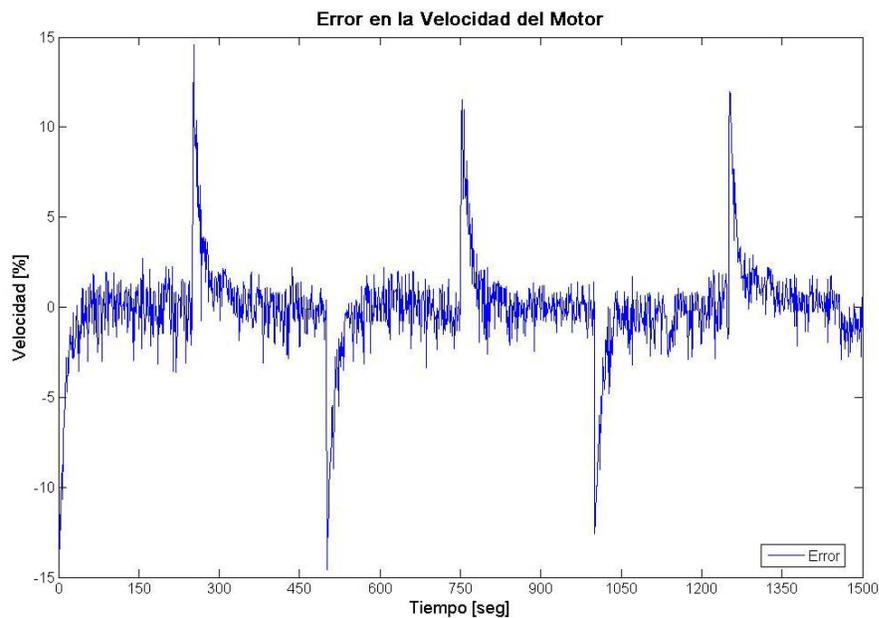
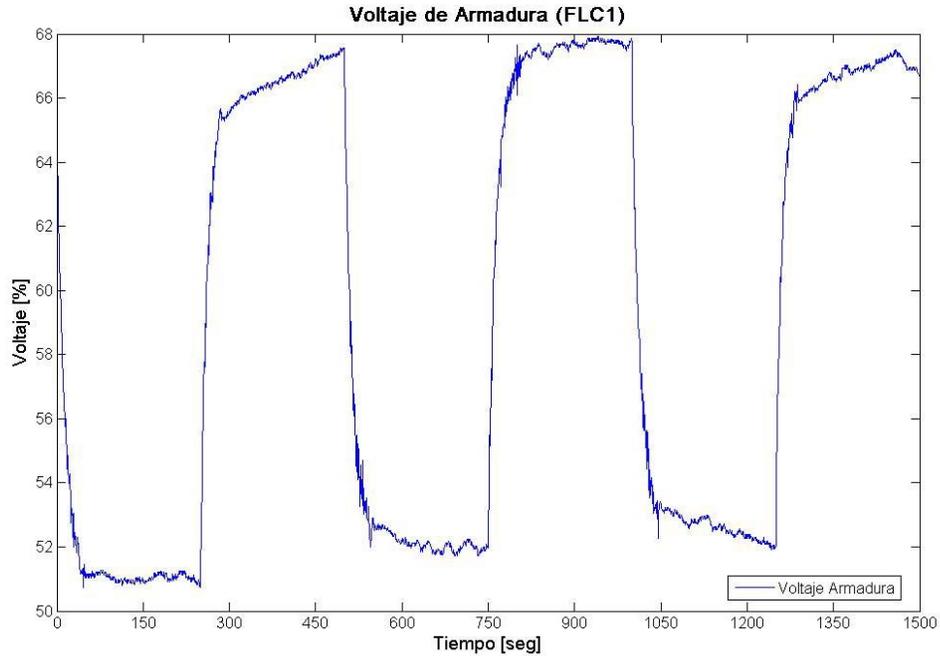


Figura 7.2.8: Error de Control en la Velocidad obtenido con controlador FLC1



**Figura 7.2.9: Voltaje de Armadura, Salida Controlador FLC1**

Los índices obtenidos en esta prueba para el controlador FLC1 se observan en la tabla 7.2.3.

**Tabla 7.2.3: Índices para controlador FLC1, frente a cambio de referencia**

Media	Desviación Estándar		
abs(r-y) [%]	(r-y) [%]	u [%]	du [%]
1,419	2,477	7,179	0,347

Los resultados obtenidos son mejores que los esperados según la simulación. Se puede ver que el error es un poco mayor al obtenido con los controladores PI, en cambio en la simulación la diferencia entre los errores era mucho mayor.

## 7.2.4 Controlador FLC2

En las figuras 7.2.10 y 7.2.11 se observan la velocidad del motor y el error obtenido, respectivamente.

La acción de control aplicada por el controlador FLC2 se muestra en la figura 7.2.12.

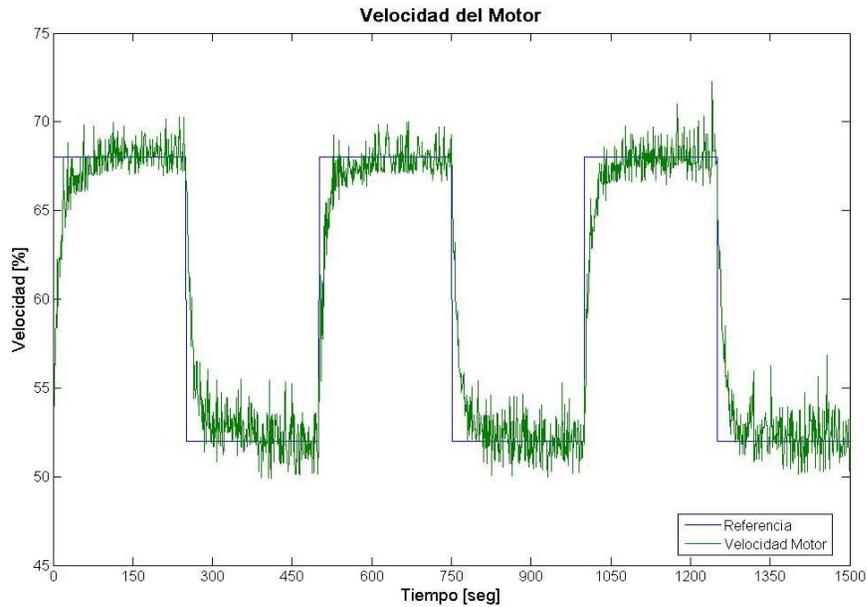


Figura 7.2.10: Velocidad del Motor bajo cambio de referencia, controlador FLC2

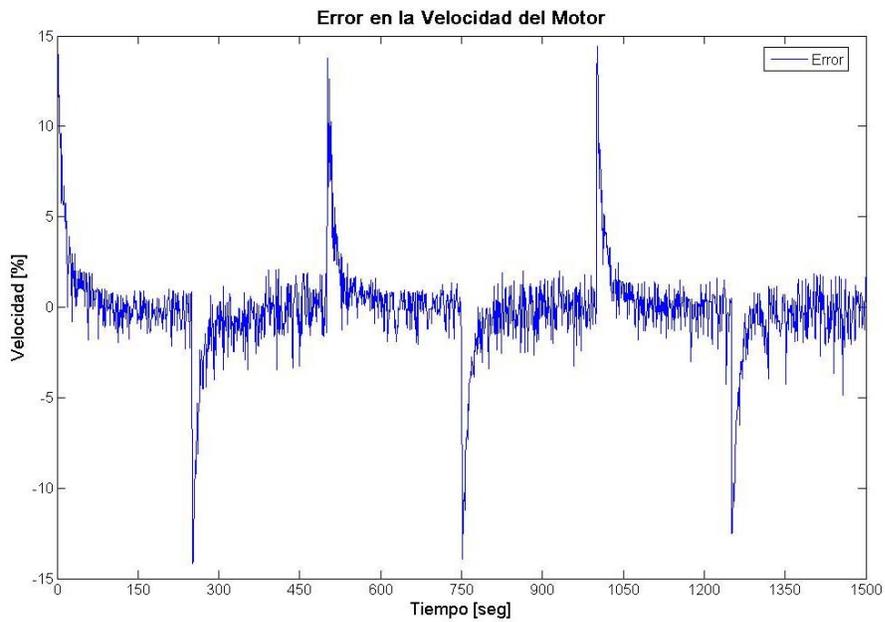


Figura 7.2.11: Error de Control en la Velocidad obtenido con controlador FLC2

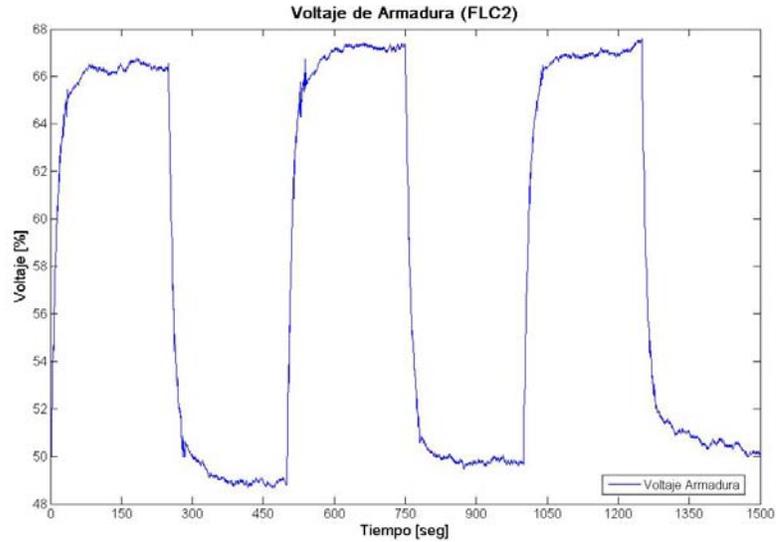


Figura 7.2.12: Voltaje de Armadura, Salida Controlador FLC2

La tabla 7.2.4 presenta los índices obtenidos para el controlador FLC2, al aplicar cambios en la velocidad de referencia.

Tabla 7.2.4: Índices para controlador FLC2, frente a cambio de referencia

Media	Desviación Estándar		
abs(r-y) [%]	(r-y) [%]	u [%]	du [%]
1,386	2,466	8,052	0,349

## 7.2.5 Controlador MPC1

El comportamiento de la velocidad del motor frente a cambios en la velocidad de referencia se observa en la figura 7.2.13. El error en salida y la acción de control aplicado por el controlador MPC1 se muestran en las figuras 7.2.14 y 7.2.15, respectivamente.

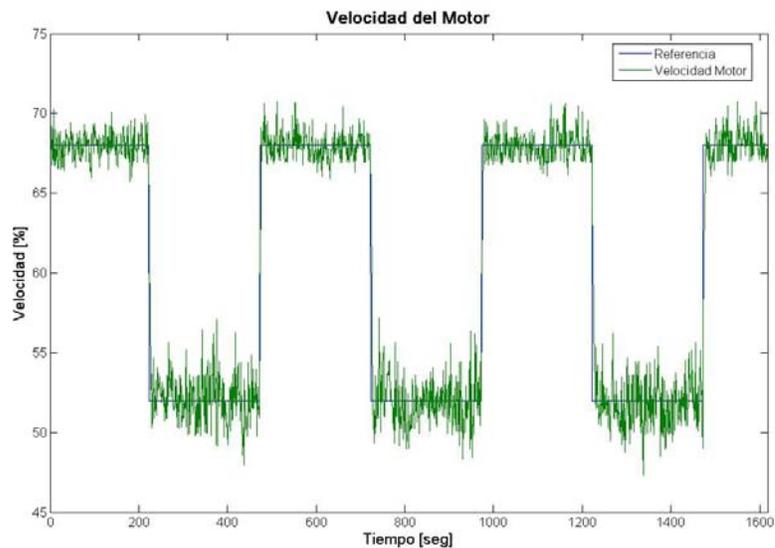
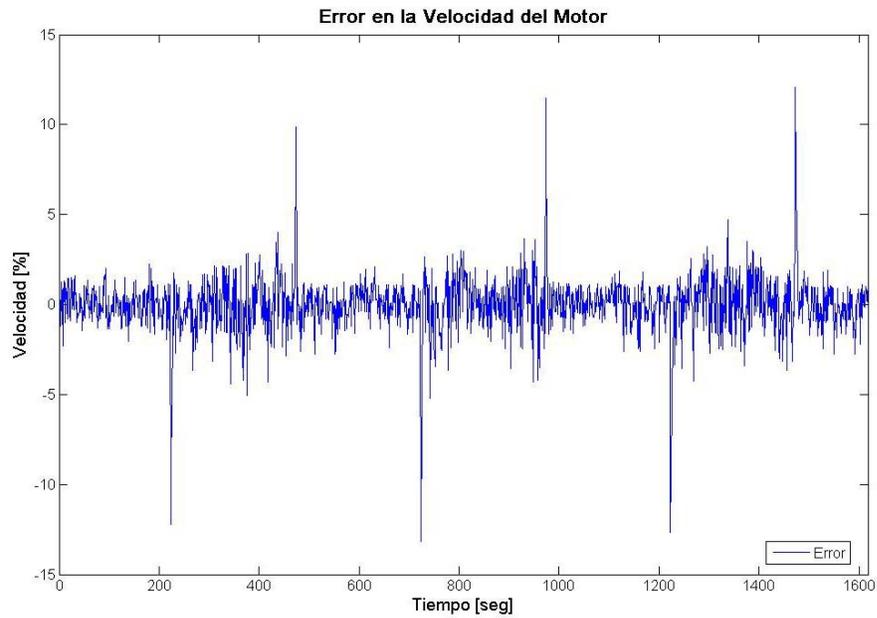
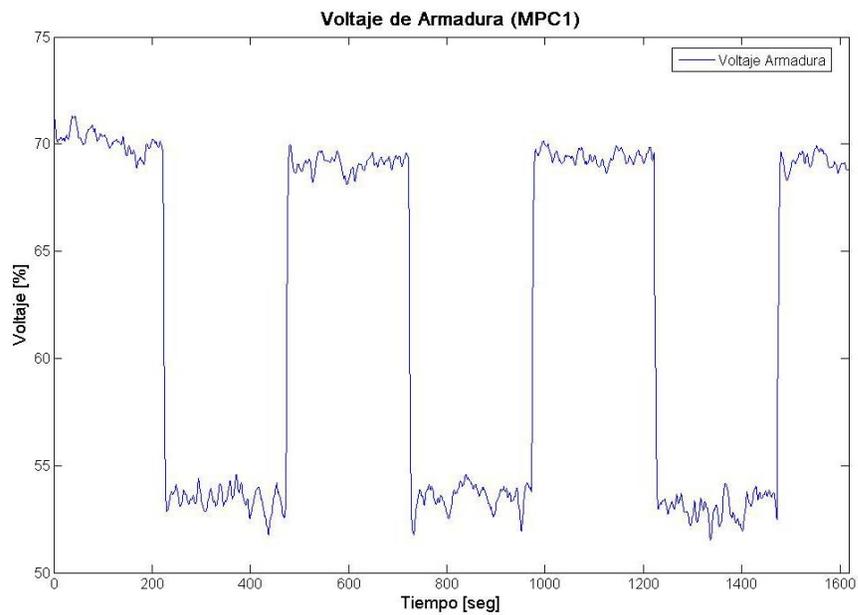


Figura 7.2.13: Velocidad del Motor bajo cambio de referencia, controlador MPC1



**Figura 7.2.14: Error de Control en la Velocidad obtenido con controlador MPC1**



**Figura 7.2.15: Voltaje de Armadura, Salida Controlador MPC1**

La tabla 7.2.5 presenta los índices, obtenidos durante esta prueba, para el controlador MPC1.

**Tabla 7.2.5: Índices para controlador MPC1, frente a cambio de referencia**

Media	Desviación Estándar		
abs(r-y) [%]	(r-y) [%]	u [%]	du [%]
1,020	1,553	8,009	0,459

## 7.2.6 Controlador MPC2

En la figura 7.2.16 se observa la velocidad obtenida en el motor, al utilizar el controlador MPC2 cuando el proceso se ve enfrentado a cambios en la velocidad de referencia.

En las figuras 7.2.17 y 7.2.18 se muestran el error obtenido en la salida y la acción aplicada por el controlador MPC2 durante esta prueba.

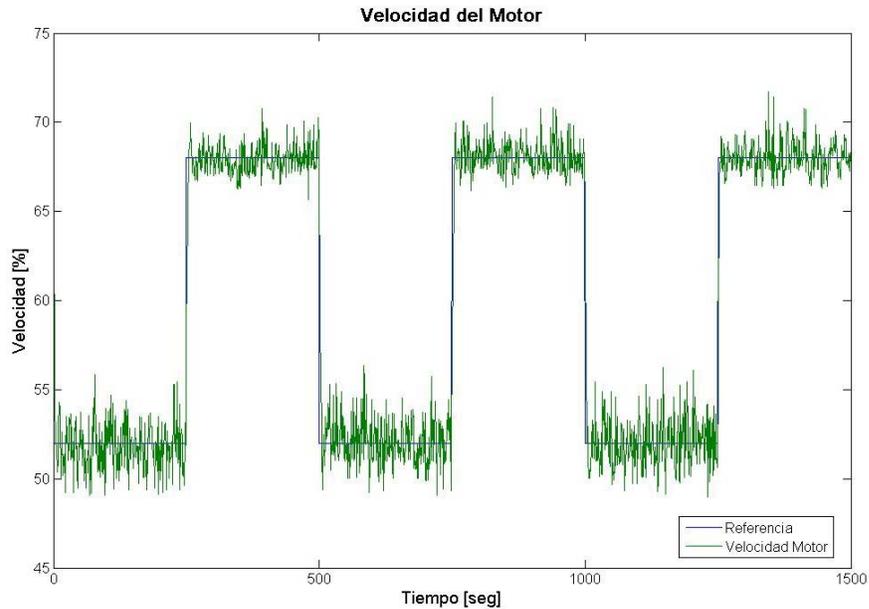


Figura 7.2.16: Velocidad del Motor bajo cambio de referencia, controlador MPC2

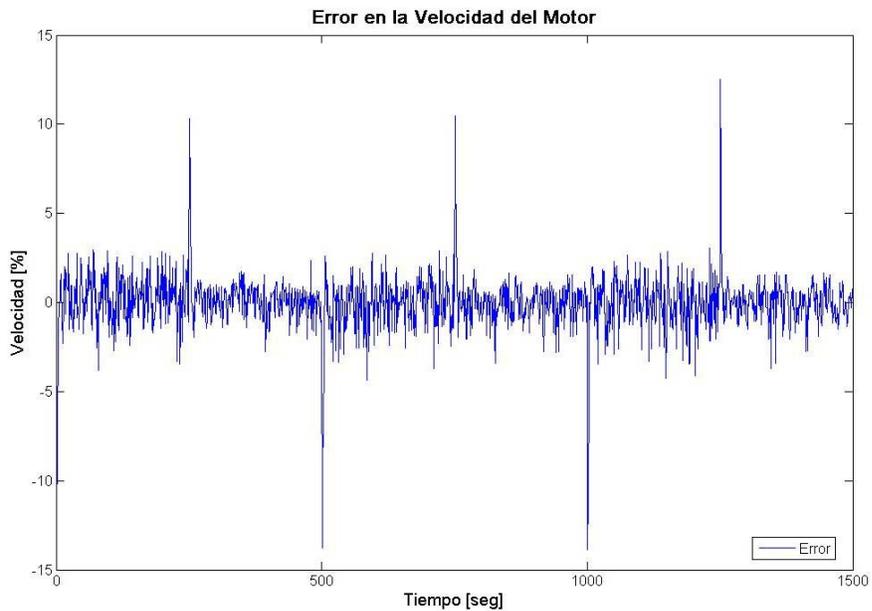
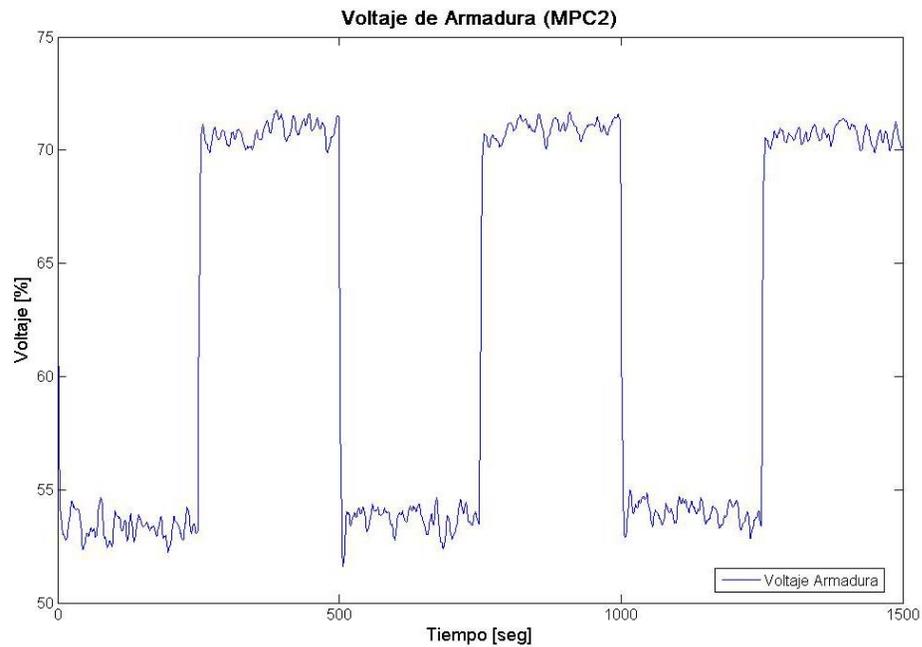


Figura 7.2.17: Error de Control en la Velocidad obtenido con controlador MPC2



**Figura 7.2.18: Voltaje de Armadura, Salida Controlador MPC2**

En la tabla 7.2.6 se observan los índices para el controlador MPC2.

**Tabla 7.2.6: Índices para controlador MPC2, frente a cambio de referencia**

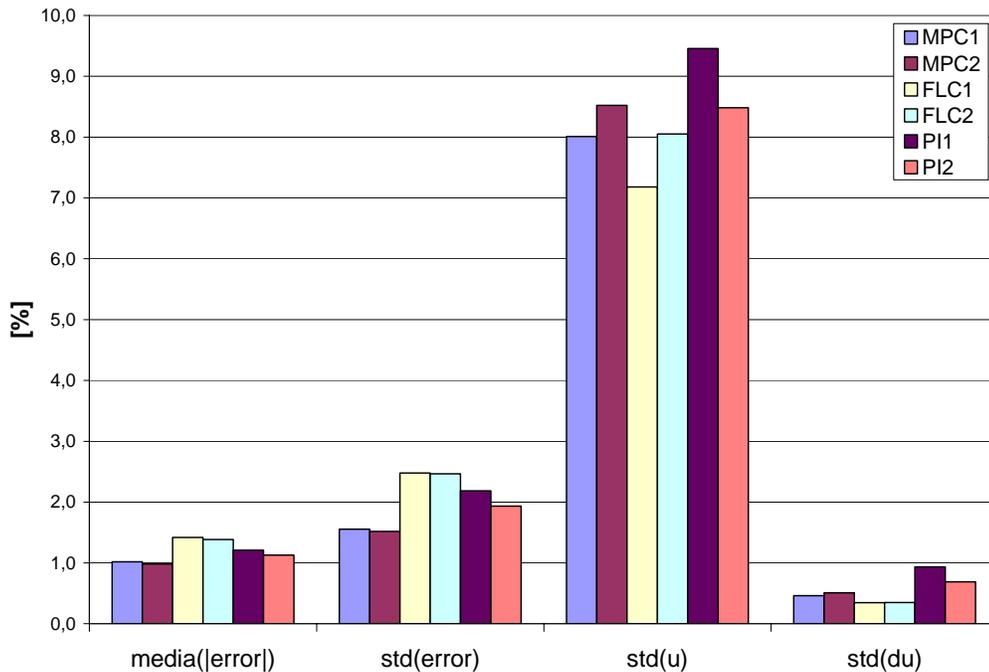
Media	Desviación Estándar		
	(r-y) [%]	u [%]	du [%]
0,989	1,518	8,523	0,509

## 7.2.7 Análisis de Resultados

A partir de las tablas 7.2.1 a 7.2.6, se presenta en la tabla 7.2.7 el resumen de los índices obtenidos para cada una de las estrategias de control al realizarse cambios en la velocidad de referencia. Además en la figura 7.2.19 se presentan estos índices en forma gráfica.

**Tabla 7.2.7: Resumen Índices para Cambio de Referencia**

	media( error ) [%]	std(error) [%]	std(u) [%]	std(du) [%]
MPC1	1,020	1,553	8,009	0,459
MPC2	0,982	1,518	8,523	0,509
FLC1	1,419	2,477	7,179	0,347
FLC2	1,386	2,466	8,052	0,349
PI1	1,209	2,184	9,455	0,937
PI2	1,129	1,933	8,484	0,689



**Figura 7.2.19: Resultados Cambio de Referencia**

De la figura 7.2.19, se observa una leve diferencia entre cada uno de los controladores. Es así como los controladores PI realizan un esfuerzo de control mayor con respecto a los otros controladores. Los controladores FLC mantienen su característica de ser el que aplica el menor esfuerzo de control, pero los controladores MPC obtienen un esfuerzo de control cercano a los obtenidos por los controladores FLC.

En contraposición a lo obtenido en las simulaciones, no se observa una gran diferencia entre los controladores. Los controladores MPC logran ser los controladores que presentan un mejor desempeño manteniendo tanto el error como el esfuerzo de control en valores bajos.

## 7.3 Variación en la Carga

### 7.3.1 Controlador PI1

La figura 7.3.1 muestra como el controlador mantiene la velocidad en torno a la referencia, a pesar de las variaciones producidas en la carga, que se observan a través de la acción de control aplicada que muestra la figura 7.3.3.

En la figura 7.3.2 se observa el error obtenido utilizando el controlador PI1.

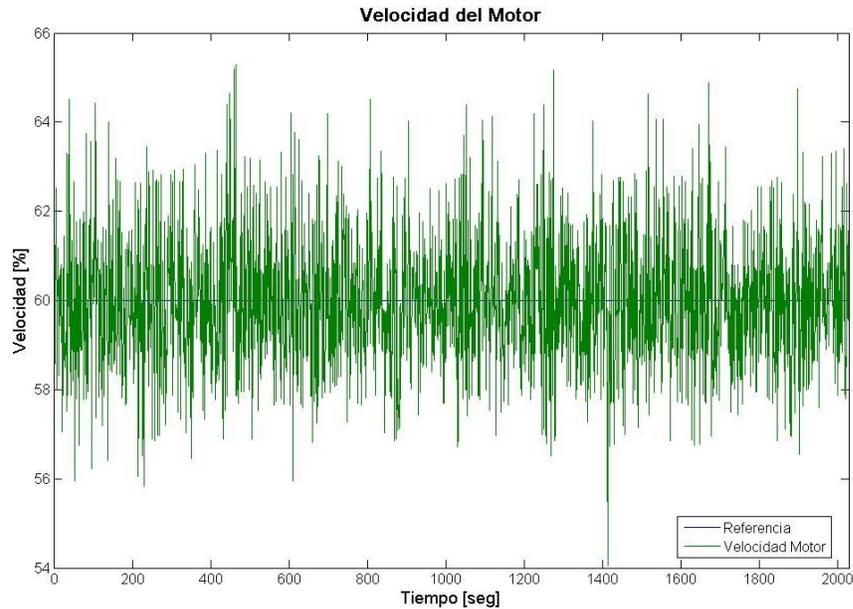


Figura 7.3.1: Velocidad del Motor bajo variación en la carga, controlador PI1

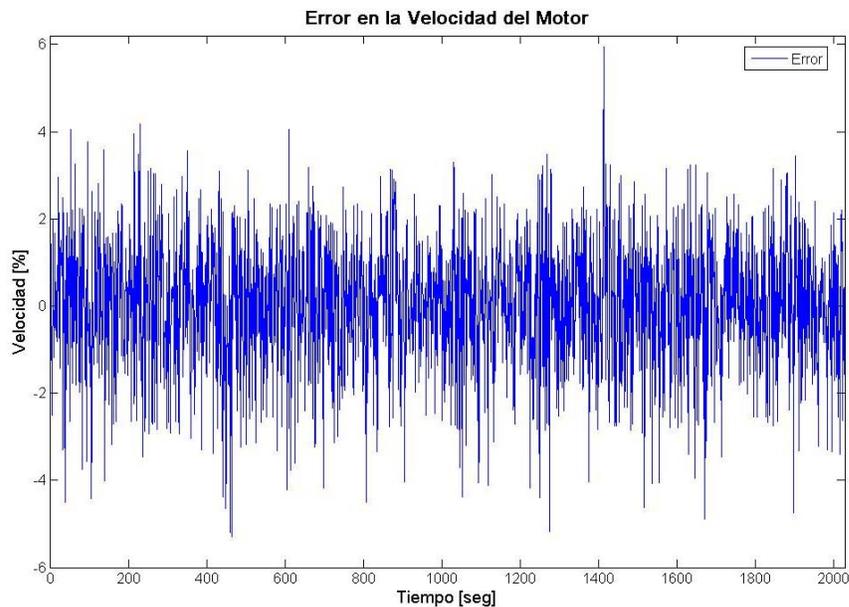
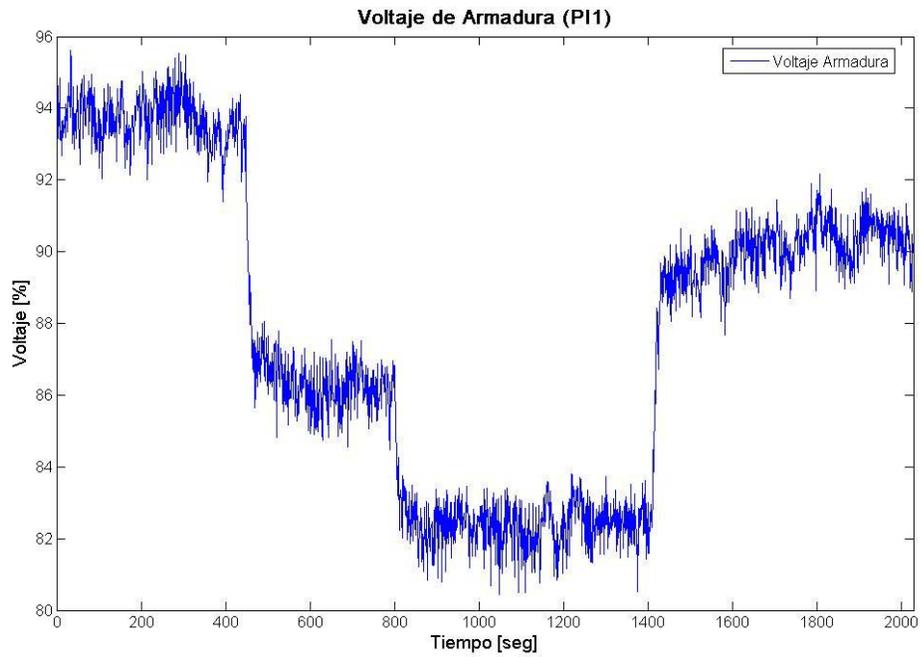


Figura 7.3.2: Error de Control en la Velocidad obtenido con controlador PI1



**Figura 7.3.3: Voltaje de Armadura, Salida Controlador PI1**

Los índices obtenidos durante esta prueba para el controlador PI1 se presentan en la tabla 7.3.1.

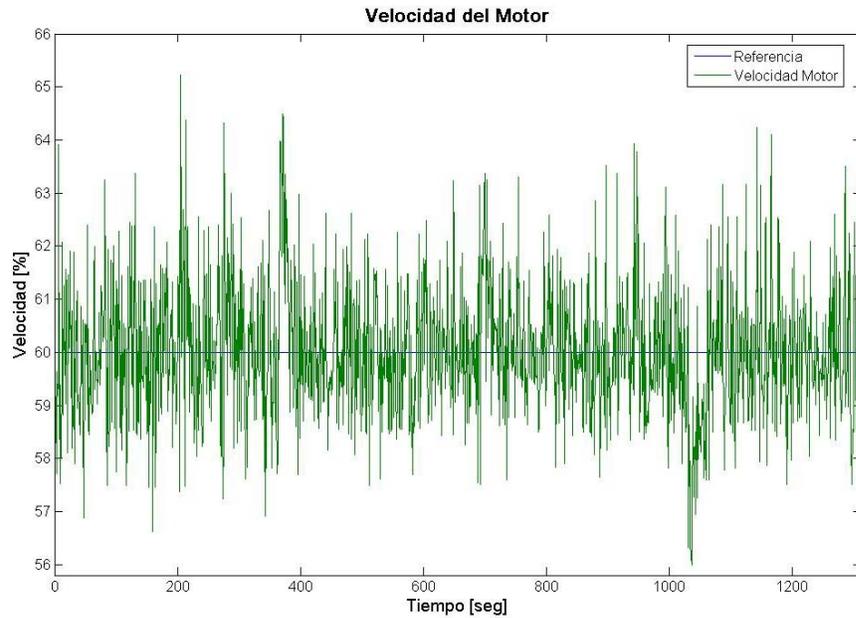
**Tabla 7.3.1: Índices para controlador PI1, frente a variaciones en la carga**

Media	Desviación Estándar			
	abs(r-y) [%]	(r-y) [%]	u [%]	du [%]
1,218	1,531	4,343	0,779	

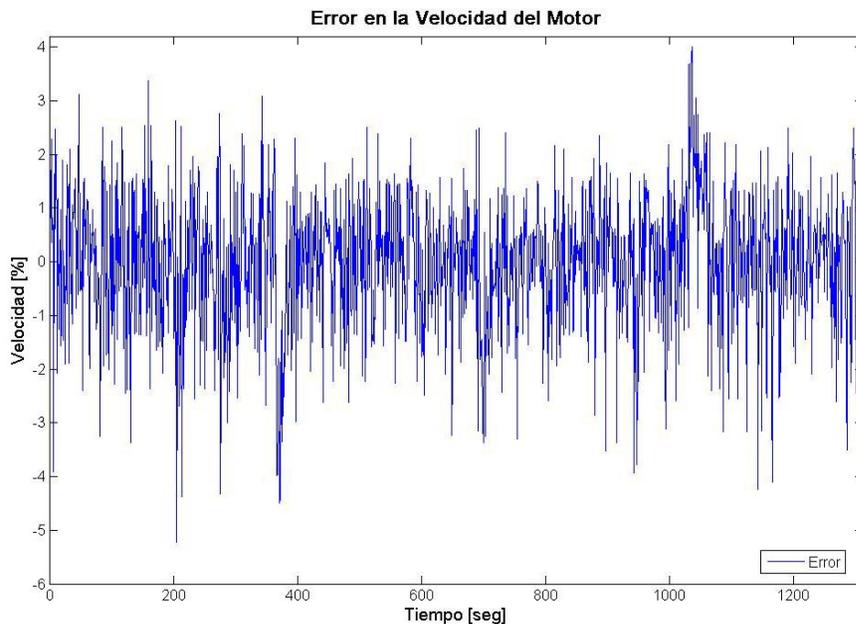
### 7.3.2 Controlador PI2

La figura 7.3.4 muestra como varía la velocidad del motor frente a las variaciones producidas en la carga utilizando el controlador PI2.

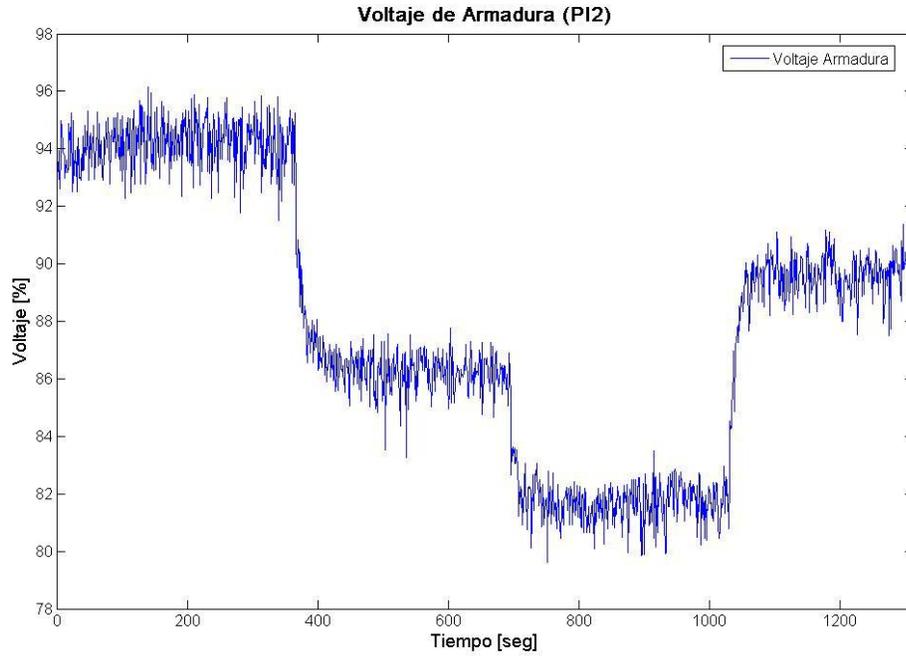
El error obtenido en esta prueba se presenta en la figura 7.3.5 y en la figura 7.3.6 se observa la acción de control aplicada por el controlador PI2.



**Figura 7.3.4: Velocidad del Motor bajo variación en la carga, controlador PI2**



**Figura 7.3.5: Error de Control en la Velocidad obtenido con controlador PI2**



**Figura 7.3.6: Voltaje de Armadura, Salida Controlador PI2**

Los índices obtenidos para el controlador PI2 se presentan en la tabla 7.3.2.

**Tabla 7.3.2: Factores control PI2, frente a variaciones en la carga**

Media	Desviación Estándar		
abs(r-y) [%]	(r-y) [%]	u [%]	du [%]
1,023	1,295	4,737	0,981

Para ambos controladores PI, se obtuvieron factores cercanos entre sí, observándose que el controlador PI1 presenta mejores resultados en el error y el controlador PI2 mejores resultados en la acción de control. Esta característica se había obtenido durante las simulaciones.

### 7.3.3 Controlador FLC1

Para el controlador FLC1, se observa en la figura 7.3.7 como la velocidad del motor se aleja de la referencia al momento de producirse una variación en la carga.

En las figuras 7.3.8 y 7.3.9 se observan el error obtenido durante la prueba y la acción de control aplicada por el controlador FLC1, respectivamente.

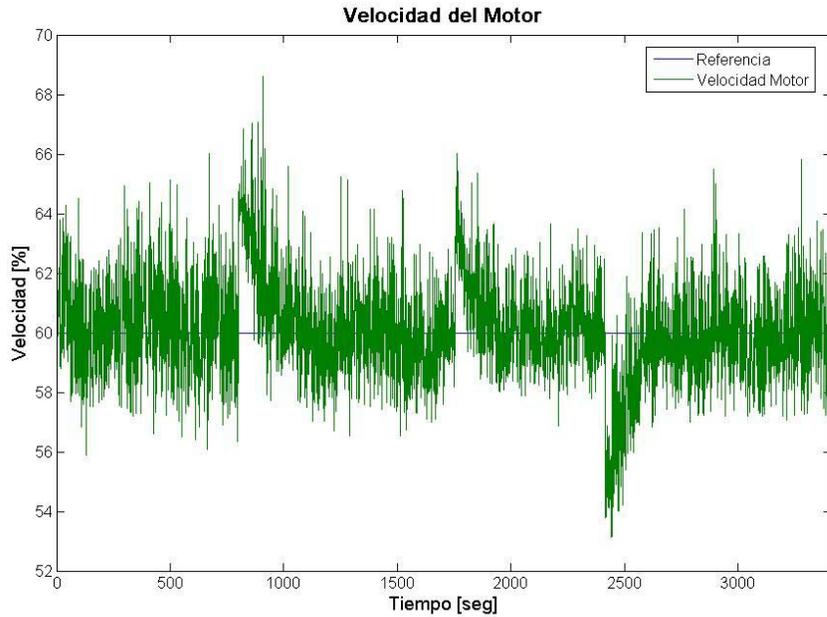


Figura 7.3.7: Velocidad del Motor bajo variación en la carga, controlador FLC1

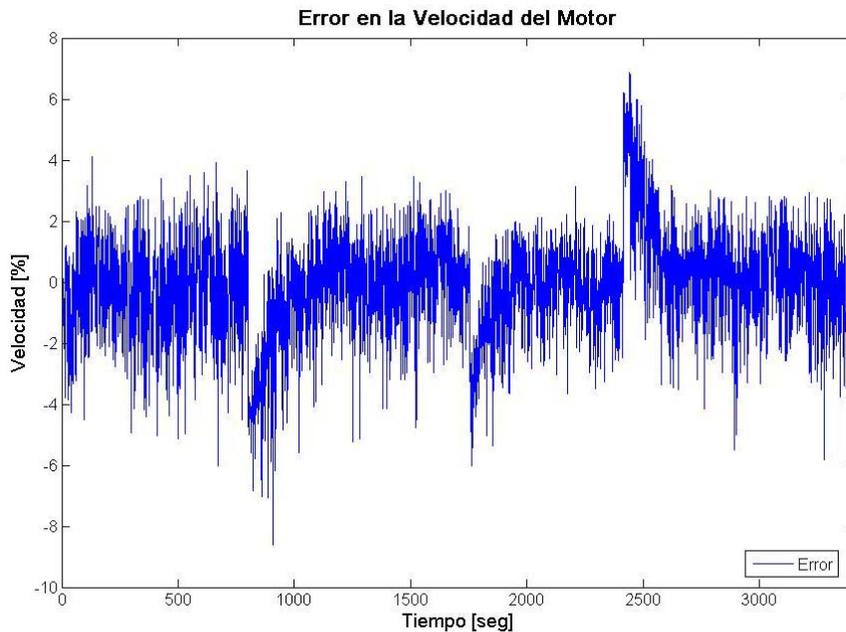
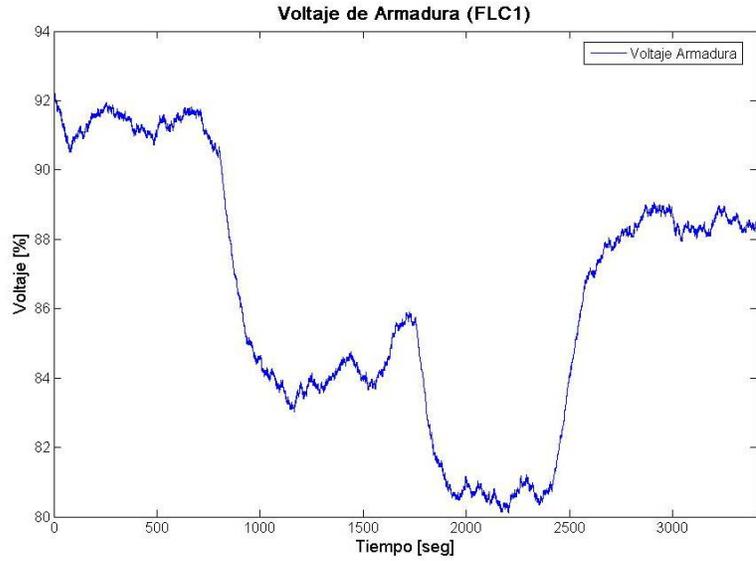


Figura 7.3.8: Error de Control en la Velocidad obtenido con controlador FLC1



**Figura 7.3.9: Voltaje de Armadura, Salida Controlador FLC1**

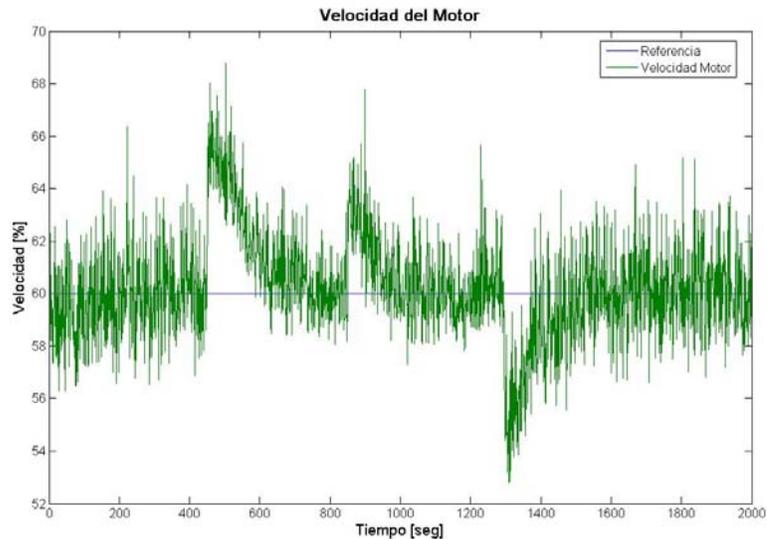
La tabla 7.3.3 presenta los índices obtenidos para el controlador MPC1 en esta prueba.

**Tabla 7.3.3: Índices para controlador FLC1, frente a variaciones en la carga**

Media	Desviación Estándar		
abs(r-y) [%]	(r-y) [%]	u [%]	du [%]
1,374	1,773	3,753	0,100

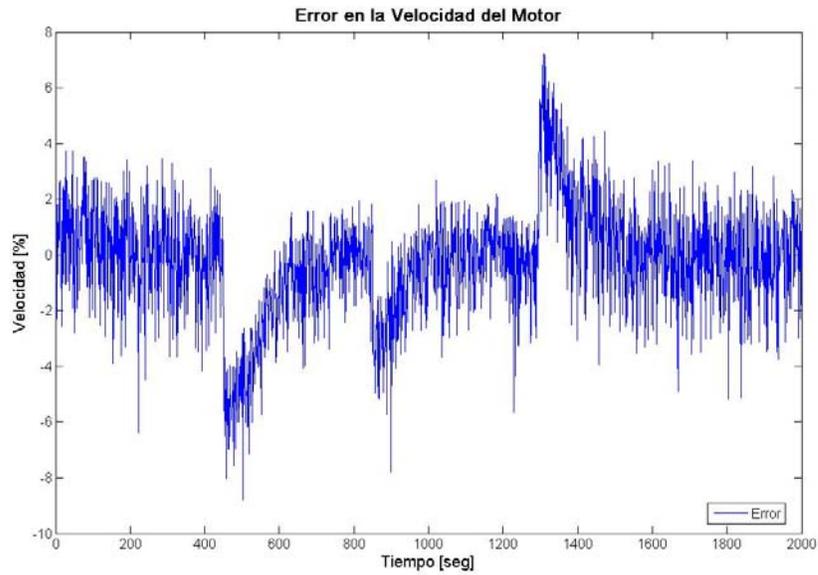
### 7.3.4 Controlador FLC2

En la figura 7.3.10 se observa como el controlador FLC2 actúa sobre la velocidad del motor tratando de mantenerla en una referencia del 60%, mientras se producen variaciones en la carga del generador.

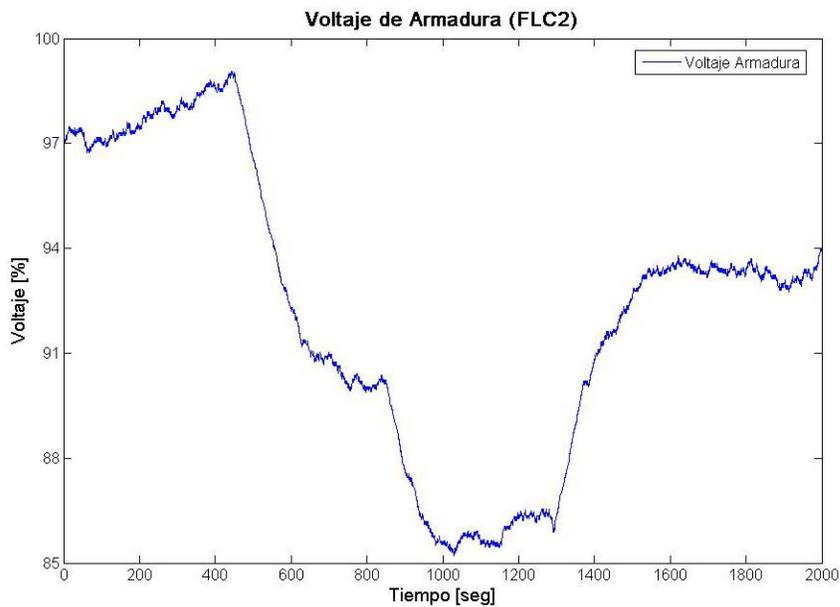


**Figura 7.3.10: Velocidad del Motor bajo variación en la carga, controlador FLC2**

Las figuras 7.3.11 y 7.3.12 se observan el error y la acción de control aplicada, respectivamente.



**Figura 7.3.11: Error de Control en la Velocidad obtenido con controlador FLC2**



**Figura 7.3.12: Voltaje de Armadura, Salida Controlador FLC2**

Los índices obtenidos en esta prueba para el controlador FLC1 se observan en la tabla 7.3.4.

**Tabla 7.3.4: Índices para controlador FLC2, frente a variaciones en la carga**

Media	Desviación Estándar		
abs(r-y) [%]	(r-y) [%]	u [%]	du [%]
1,553	2,047	4,173	0,084

### 7.3.5 Controlador MPC1

En las figuras 7.3.13 y 7.3.14 se observa la velocidad del motor y el error obtenido, respectivamente, cuando el motor se ve enfrentado a cambios en la carga mientras el controlador MPC1 debe mantener la velocidad en la referencia deseada.

La figura 7.3.15 muestra la acción de control aplicada por el controlador MPC1, para mantener la velocidad del motor en la referencia deseada a pesar de las variaciones que se producen en la carga.

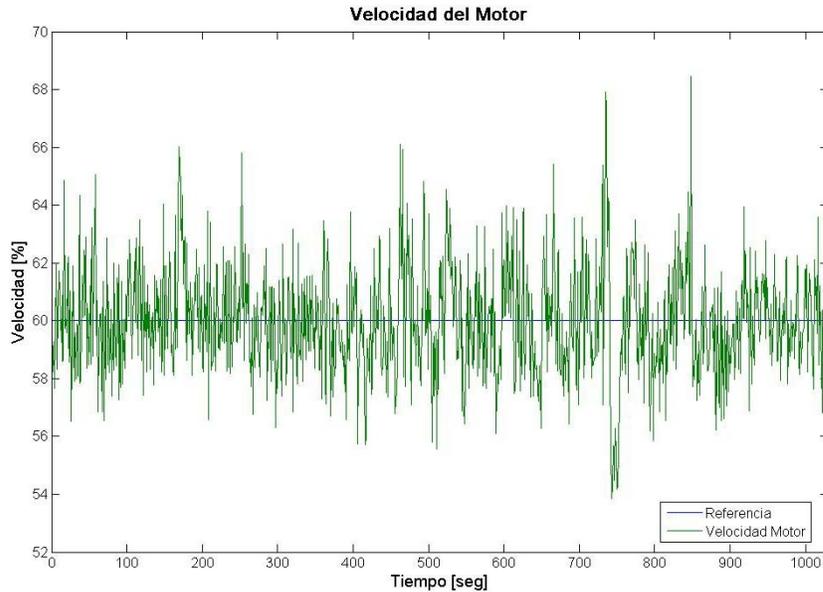


Figura 7.3.13: Velocidad del Motor bajo variación en la carga, controlador MPC1

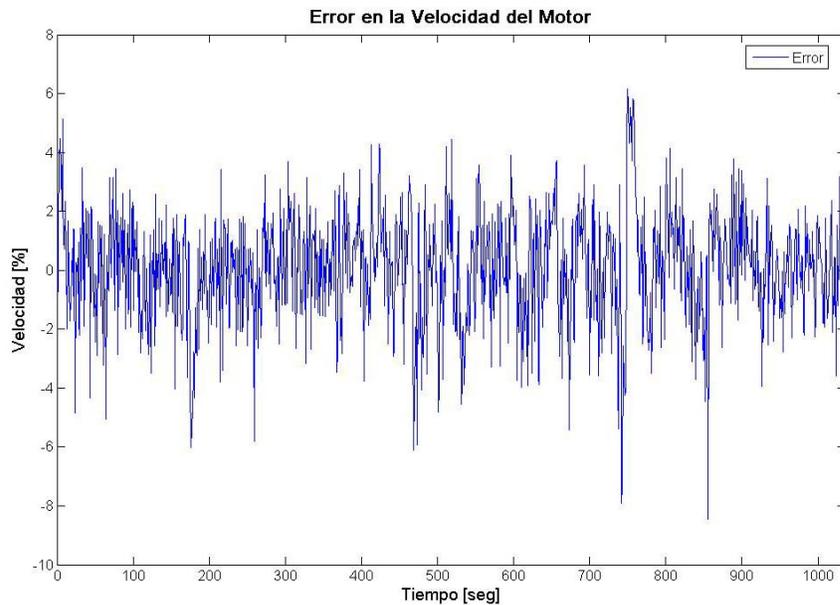
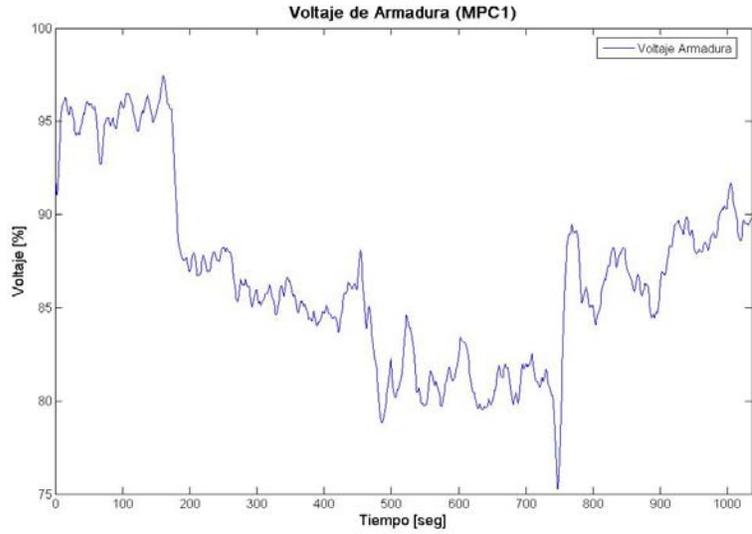


Figura 7.3.14: Error de Control en la Velocidad obtenido con controlador MPC1



**Figura 7.3.15: Voltaje de Armadura, Salida Controlador MPC1**

En la tabla 7.3.5 se observan los índices obtenidos para este controlador.

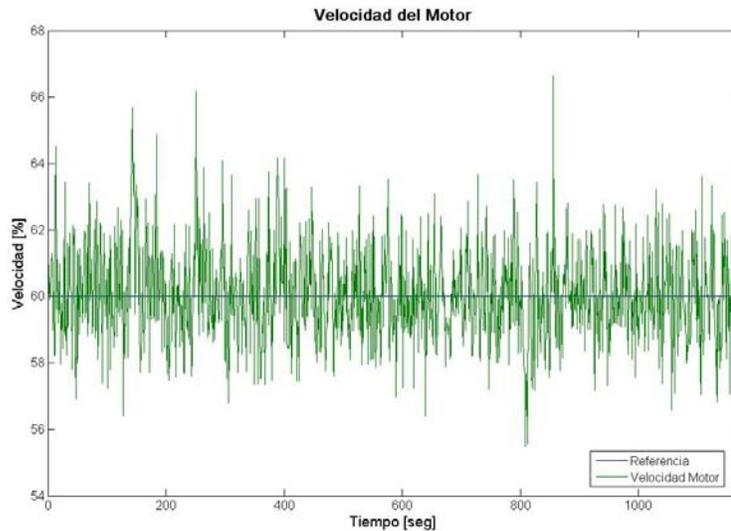
**Tabla 7.3.5: Índices para controlador MPC1, frente a variaciones en la carga**

Media	Desviación Estándar		
abs(r-y) [%]	(r-y) [%]	u [%]	du [%]
1,517	1,935	4,919	0,273

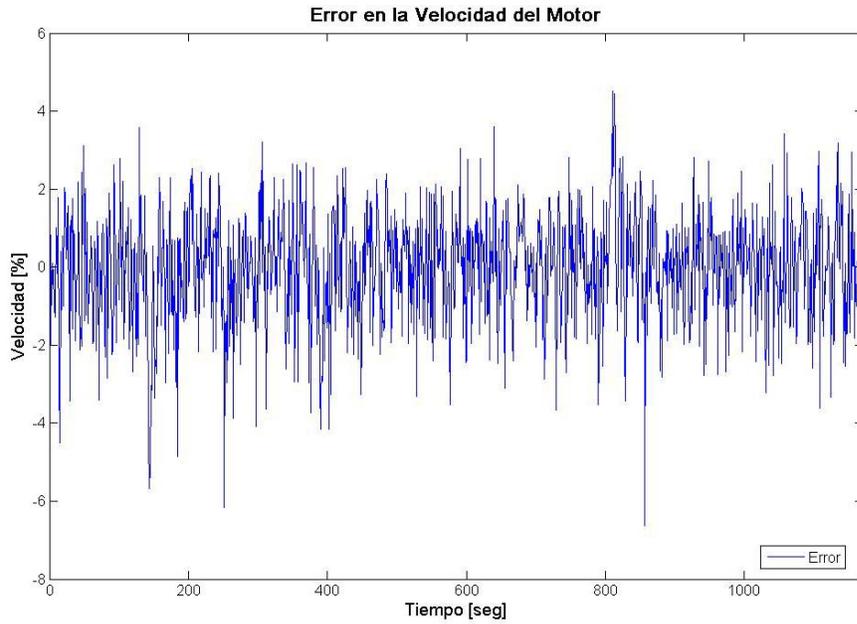
### 7.3.6 Controlador MPC2

La figura 7.3.16 muestra la velocidad del motor obtenida con el controlador MPC2.

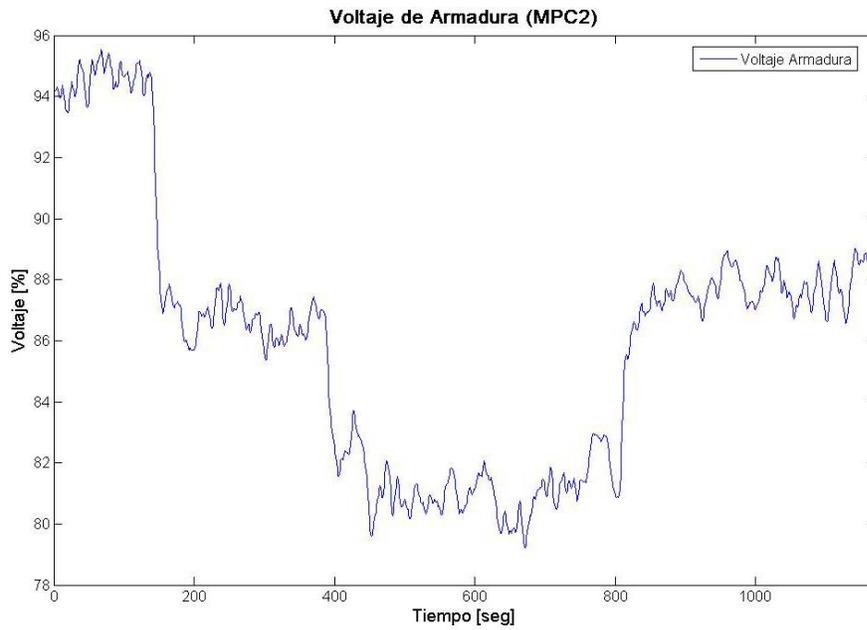
En las figuras 7.3.17 y 7.3.18 se observan el error obtenido y la acción de control aplicada por el controlador, respectivamente.



**Figura 7.3.16: Velocidad del Motor bajo variación en la carga, controlador MPC2**



**Figura 7.3.17: Error de Control en la Velocidad obtenido con controlador MPC2**



**Figura 7.3.18: Voltaje de Armadura, Salida Controlador MPC2**

La tabla 7.3.6 presenta los índices obtenidos en esta prueba para el controlador MPC2.

**Tabla 7.3.6: Índices para controlador MPC2, frente a variaciones en la carga**

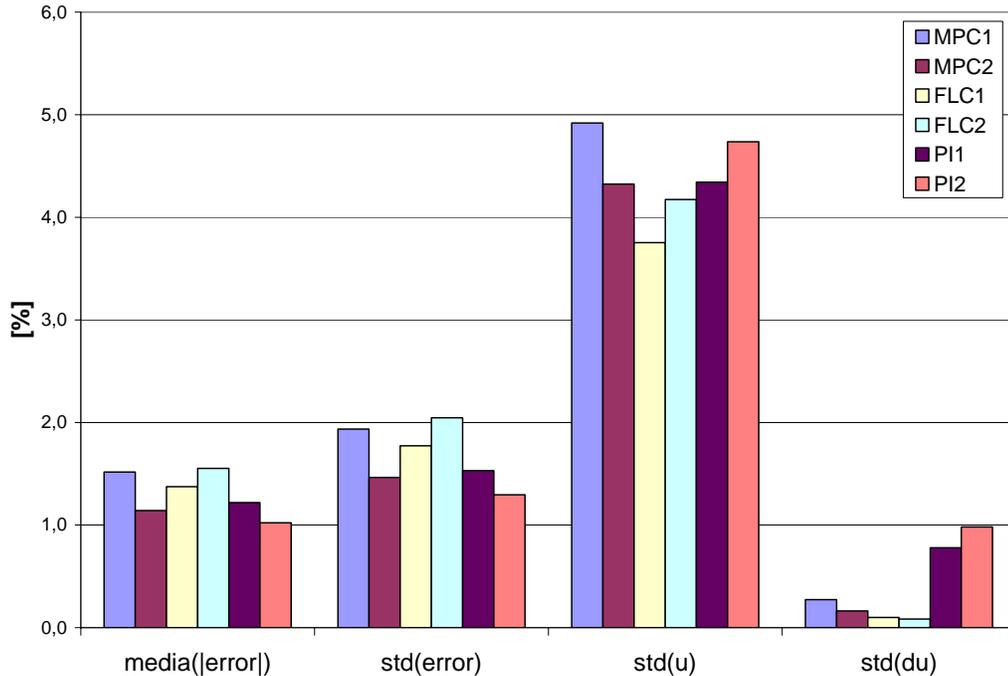
Media	Desviación Estándar		
abs(r-y) [%]	(r-y) [%]	u [%]	du [%]
1,141	1,464	4,324	0,163

### 7.3.7 Análisis de Resultados

A partir de las tablas 7.3.1 a 7.3.6, se pueden observar en la tabla 7.3.7 los índices obtenidos durante esta prueba y en la figura 7.3.19 se presenta una representación gráfica de estos valores.

**Tabla 7.3.7: Resumen Factores para Variación en la Carga**

	media( error ) [%]	std(error) [%]	std(u) [%]	std(du) [%]
MPC1	1,517	1,935	4,919	0,273
MPC2	1,141	1,464	4,324	0,163
FLC1	1,374	1,773	3,753	0,100
FLC2	1,553	2,047	4,173	0,084
PI1	1,218	1,531	4,343	0,779
PI2	1,023	1,295	4,737	0,981



**Figura 7.3.19: Resultados Variación en la Carga**

De los resultados presentados en la tabla 7.3.7 y de la representación gráfica expuesta en la figura 7.3.19, se observa que el controlador MPC2 presentó el mejor desempeño, considerando el esfuerzo de control realizado y el error obtenido en la salida.

En esta prueba se obtuvieron los mejores resultados para los controladores FLC, logrando tener desempeños similares a los obtenidos por los controladores MPC.

Para los controladores PI, a pesar de mantener un nivel bajo para el error, se observa que poseen un esfuerzo en la acción de control muy elevado.

## VIII Conclusiones

En este trabajo se diseñaron estrategias de control avanzado basadas en las teorías de lógica difusa y control predictivo, utilizando el sistema de control distribuido DeltaV. En particular, se aplicaron al control de velocidad de un motor de corriente continua.

La implementación de las estrategias de control en el sistema de control DCS DeltaV para controlar la velocidad de un motor de corriente continua, permitió observar el comportamiento de estas estrategias, a nivel regulatorio, frente a las diversas pruebas que se plantearon.

Los primeros resultados obtenidos consideraron el tiempo de levantamiento de las estrategias de control para llevar la velocidad del motor a la referencia deseada, y su tiempo de asentamiento. Estas pruebas establecieron que el controlador basado en lógica difusa (FLC) tomaba el mayor tiempo en ambos casos, debido a que la variación de la acción de control durante cada muestreo se encuentra limitada al valor establecido en su diseño, correspondiente a 0.1% del valor de alimentación de la armadura.

Al aplicar un cambio de referencia en la velocidad del motor C.C., se obtuvo que el controlador predictivo (MPC) logra un buen comportamiento en cuanto al error y al esfuerzo de control. El controlador difuso logró mantener un esfuerzo de control relativamente bajo debido a su limitante en la acción de control pero esto provoca que el error obtenido sea mayor con respecto a las otras estrategias de control. En cambio, el controlador PI logra mantener un error bajo en la salida, pero el esfuerzo de control es elevado.

La última prueba que consiste en mantener la velocidad en un valor fijo a pesar de variaciones que se producen en la carga, muestra como el controlador PI realiza un gran esfuerzo en la acción de control para lograr mantener la velocidad en un valor constante, a pesar de mantener un error cercano a las otras estrategias. En cambio las estrategias MPC y FLC lograron un comportamiento similar, destacándose el controlador MPC2, que utiliza el horizonte de control máximo permitido por la herramienta *DeltaV Predict*.

Dentro de los controladores utilizados para cada estrategia no se logró observar una diferenciación notable con los distintos valores de sintonización utilizados. Sin embargo, los controladores predictivos en la última prueba entregaron el mejor desempeño dado que se tiene un mayor conocimiento sobre las futuras acciones de control.

Las estrategias basadas en control predictivo siempre se encontraron dentro de los mejores resultados durante todas las pruebas. Para el controlador difuso se observó que el tiempo de subida era mayor lo cual se reflejó en errores más elevados.

Como se observó durante todas las pruebas, el controlador PI, con los parámetros seleccionados, entrega buenos resultados cuando se desea llevar al proceso a una referencia deseada, pero el esfuerzo de control realizado es muy elevado, lo que muestra la deficiencia frente a la necesidad de optimizar el proceso. Sin embargo, tanto las estrategias de control predictivo como las estrategias de lógica difusa presentaron un esfuerzo mucho menor al realizado por el controlador PI.

A su vez, la ventaja que posee el controlador predictivo (conocimiento de las predicciones futuras) permite que las acciones de control realizadas logren el mejor desempeño observado en este trabajo.

Se debe notar que, los resultados obtenidos para cada estrategia pueden ser mejorados, con una sintonización más fina de sus parámetros. Por ejemplo, realizar una sintonización para cada prueba y no una sintonización general, que fue la planteada para realizar este trabajo.

Las conclusiones observadas para el motor C.C. se pueden generalizar a otros procesos industriales, considerando cada una de las características de respuesta deseada analizadas en este trabajo. Por lo tanto, para analizar el desempeño de un proceso, se debe considerar que el controlador difuso logra acotar la acción de control y el controlador predictivo incluye el conocimiento de las predicciones. Ambas características permiten mejorar el desempeño.

## IX Bibliografía

- [1] A. Cipriano, D. Sáez. **Fuzzy Generalized Predictive Control and its Application to an Inverted Pendulum.** Proceedings of the 22nd Annual International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation, IECON'96, Taipei, Taiwán, August 5-10, pp. 1966-1971.
- [2] Aiping Jiang, Arthur Jutan. **Response Surface Tuning Methods in Dynamic Matrix Control of a Pressure Tank System.** Ind. Eng. Chem. Res. 2000, 39, 3835-3843.
- [3] Chuen Chien Lee. **Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller – Part I.** IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 20, N° 2, March/April 1990.
- [4] Chuen Chien Lee. **Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller – Part II.** IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 20, N° 2, March/April 1990.
- [5] D. Sáez, A. Cipriano. **Design of Fuzzy model based Predictive Controllers and its Application to an Inverted Pendulum.** Proceedings of the Sixth IEEE International Conference on Fuzzy Systems, FUZZ-IEEE'97, Barcelona, July 1-5, pp. 915-919
- [6] E. Camacho and C. Bordons. **Model Predictive Control.** Springer, 1999.
- [7] E. Camponogara, D. Jia, B. Krogh, S. Talukdar. **Distributed Model Predictive Control.** IEEE Control Systems Magazine, February 2002, pp. 44-52.
- [8] F. Martin McNeill, Ellen Thro. **Fuzzy Logic, A Practical Approach.** AP Professional, 1994.
- [9] F. Milla, D. Sáez. **Estrategia de Control Supervisor Difuso para la Turbina a Gas de una Central Termoelectrónica de Ciclo Combinado.** XVI Congreso de la Asociación Chilena de Control Automático, 2-4 Noviembre, Santiago.
- [10] F. Rubio, M. Berenguer, E. Camacho. **Fuzzy Logic Control of a Solar Power Plant.** IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Vol. 3, N° 4, November 1995, pp. 459-468.
- [11] F. Torres, C. Muñoz, I. Velásquez, C. Shene. **Control Difuso para una Planta Piloto de Secado por Lecho Fluidizado.** Revista Fac. de Ingeniería, U.T.A. (Chile), Vol. 1, 2003, pp. 49-53.
- [12] **Getting Started with Your DeltaV Automation Software.** Fisher-Rosemount, 2000.
- [13] Gonzalo Reyes. **Introducción a los Sistemas DCS's.** Apuntes del Curso “Tópicos de Control”, Facultad Tecnológica USACH, 2000.
- [14] James B. Rawlings. **Tutorial Overview of Model Predictive Control.** IEEE Control Systems Magazine, June 2000, pp. 38-52.

- [15] Jerry M. Mendel. **Fuzzy Logic Systems for Engineering: A Tutorial**. Proceedings of the IEEE, Vol. 83, N° 3, March 1995.
- [16] Katsuhiko Ogata. **Ingeniería de Control Moderna, Tercera Edición**. Prentice Hall, 1998.
- [17] M. Goodrich, G. Stirling, R. Frost. **Model Predictive Satisficing Fuzzy Logic Control**. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Vol. 7, N° 3, June 1999.
- [18] M. Rodríguez, J. Perdomo, M. Strefezza, W. Colmenares. **Control de una Extrusora de Plástico usando un Control PI Difuso Adaptado con el Error de Predicción del Modelo**. Revista Ciencia e Ingeniería, Vol. 25, N° 1, 2004.
- [19] M. Sánchez, R. Garduño, S. De Lara, L. Castelo. **Control Difuso de Turbinas de Gas en Centrales de Ciclo Combinado**. Boletín IIE, noviembre-diciembre 2001.
- [20] **Publicación C/5, Máquinas Eléctricas**. Of. de Publicaciones Docentes Departamento de Ing. Eléctrica, Univ. De Chile, 1996.
- [21] Robin M.C. De Keyser. **Basic Principles of Model Based Predictive Control**. European Control Conference, Grenoble, Francia, 1991.
- [22] Rodrigo Carrasco, Aldo Cipriano. **Sistema de Guiado para un Robol Móvil, Basado en Lógica Difusa**. XV Congreso de la Asociación Chilena de Control Automático, Octubre 2002.
- [23] Stamatios V. Kartalopoulos. **Understanding Neural Networks and Fuzzy Logic**. IEEE Press, 1996.
- [24] T. Blevins, G. McMillan, W. Wojsznis, M. Brown. **Advanced Control Unleashed, Plant Performance Management for Optimun Benuedit**. ISA, 2003.
- [25] **DeltaV Books Online**. Edición para DeltaV Versión 5.3, Fisher-Rosemount Systems, Inc., 2001.
- [26] **DeltaV, Home Page**. <http://www.easydeltav.com>

## X Anexos

### 10.1 Obtención del Modelo ARX

Para obtener un modelo ARX de la planta se debió realizar una toma de datos para un entrada variable tal como se muestra en las siguientes figuras<sup>13</sup>.

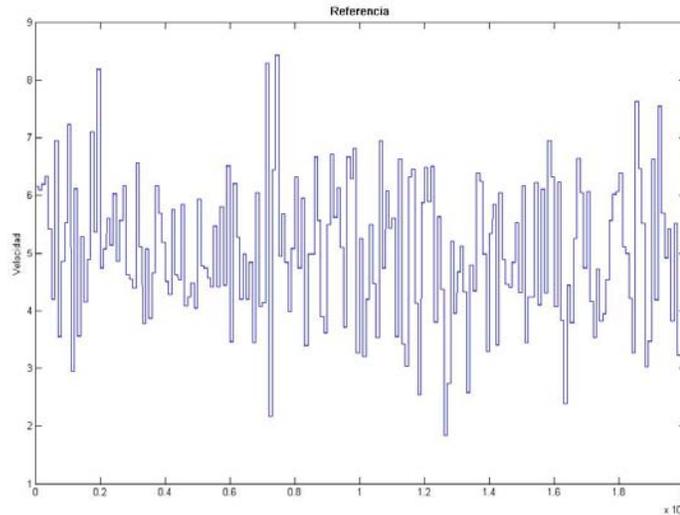


Figura 10.1.1: Señal de Referencia

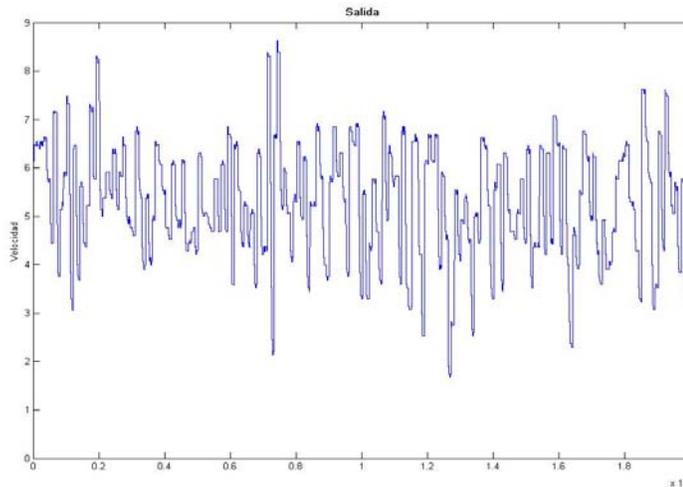


Figura 10.1.2: Señal de Salida

La identificación ARX nos entrega el siguiente modelo:

$$U(Z) = \left( \frac{-0.3174 \cdot Z^{-4} + 0.6745 \cdot Z^{-3} + 0.1075 \cdot Z^{-2} + 0.00266 \cdot Z^{-1}}{0.04581 \cdot Z^{-4} - 0.09214 \cdot Z^{-3} - 0.07117 \cdot Z^{-2} - 0.4312 \cdot Z^{-1} + 1} \right) \cdot Y(Z)$$

---

<sup>13</sup> Se tomaron 2000 datos con un tiempo de muestreo de 0,05 seg.

Y una *performance* de un 83.39%.

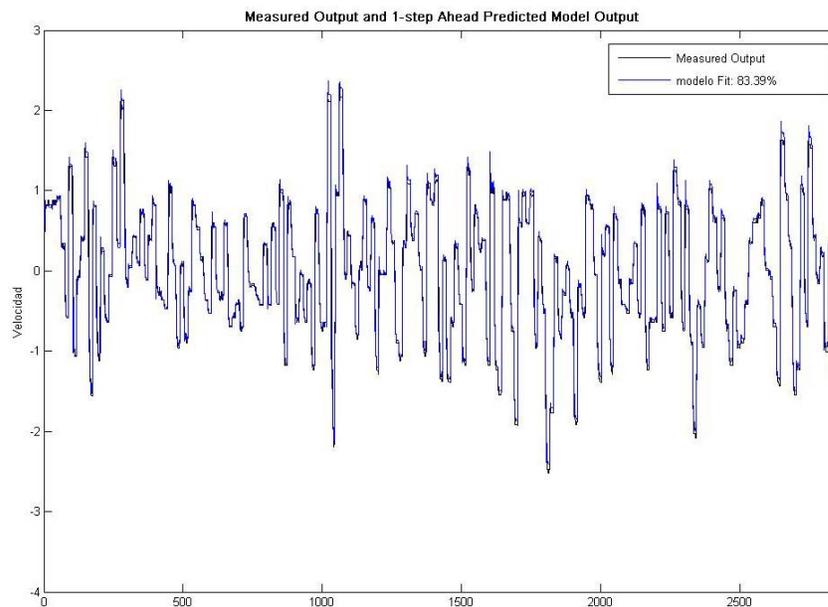


Figura 10.1.3: Desempeño del modelo ARX

Se utilizó el siguiente código para la obtención del modelo.

```
function modeloarx_norm(x,p)
out=x(:,1);
in=x(:,2);
n=length(out);

z=[out in];
nn=struc(0:p,0:p,0:p);
v = arxstruc(z,z,nn);
nn=selstruc(v,0);
modelo=arx(z,nn);
figure(1)
compare (iddata(out, in), modelo, 1);
present(modelo);
end
```

El parámetro  $p$  de la función acota la regresión máxima a utilizar, en este caso se utilizó  $p=4$ .

## 10.2 Diseño de Estrategias en el Sistema de Control DeltaV

La programación de las estrategias de control se realizó utilizando la herramienta Control Studio, a través de los bloques funcionales.

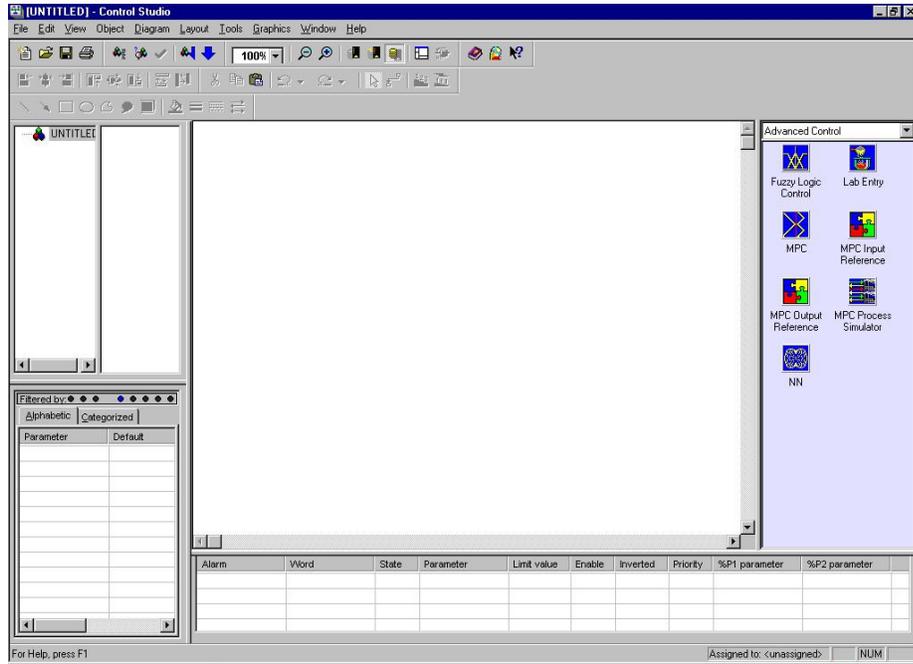


Figura 10.2.1: Interfaz Herramienta Control Studio

Se diseñó inicialmente un bloque personalizado, en que se realizó la conexión de entradas y salidas que se utilizarán en todas las estrategias.

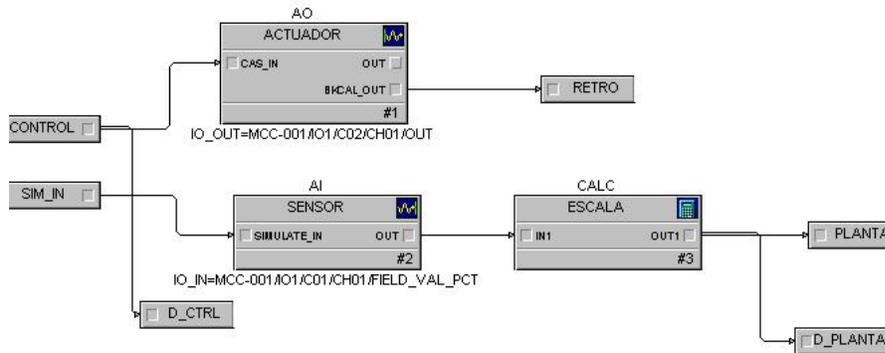


Figura 10.2.2: Bloque de conexión IO\_MAX

En la figura anterior, se tiene el esquema utilizado para conectar las estrategias con el proceso, a través de la salida analógica (AO: Actuador) y la entrada analógica (AI: Sensor). Los bloques AO y AI son comisionados a los canales de los módulos I/O correspondientes.

En el capítulo 5, se describió la planta y sus componentes. De ahí tenemos que la salida de actuador esta en el rango 0-3V y la entrada del conversor es de 0-10V, esto produce que para la máxima velocidad del motor la salida del conversor no corresponda a 20mA (valor máximo en el protocolo 4-20mA) sino a un valor cercano a los 6mA. Por esta razón es necesario ajustar la señal de entrada recibida en el DeltaV (entrada analógica) sea ajustada a la escala correspondientes, es decir para una entrada de 4mA sea representada como 0% y los 6mA como 100%.

El escalamiento que se realiza en la entrada produce que el error que existe en la señal también sea modificado (se amplifica su valor).

Para obtener la relación entre el nivel de la velocidad que tiene el motor y lo que se envía al controlador, se tomaron datos recibidos recorriendo desde el 0 al 100% (aumentando en 5%), y se obtuvo una ecuación a través de una regresión lineal entre estos datos.

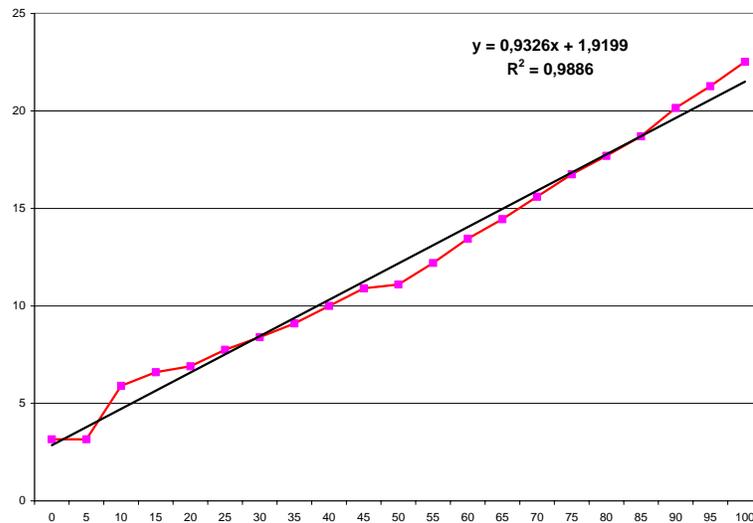


Figura 10.2.3: Regresión Lineal

La ecuación (10.2.1) muestra la ecuación obtenida a través de la regresión lineal, la cual muestra la relación que se tiene entre el valor de velocidad deseado y el valor de velocidad obtenido.

$$y = 0.9326 \cdot x + 1.9199 \quad (10.2.1)$$

De la ecuación (10.2.1) se despeja la variable  $x$ , se tiene:

$$x = \frac{(y - 1.9199)}{0.9326} \quad (10.2.2)$$

El bloque *ESCALA* (figura 10.2.2) utiliza la ecuación (10.2.2)<sup>14</sup> para realizar el escalamiento de la señal proveniente del bloque de entrada analógica *SENSOR*.

<sup>14</sup> Amplificada por 4,54. Ya que para la velocidad máxima ( $y = 22,52$ ) se tiene que  $x = 22,089$  y al amplificarlo por 4,54 se obtiene que  $x = 100,284$ , lo que permite interpretar el valor máximo como 100%.

Para el control PI se utilizó el siguiente esquema:

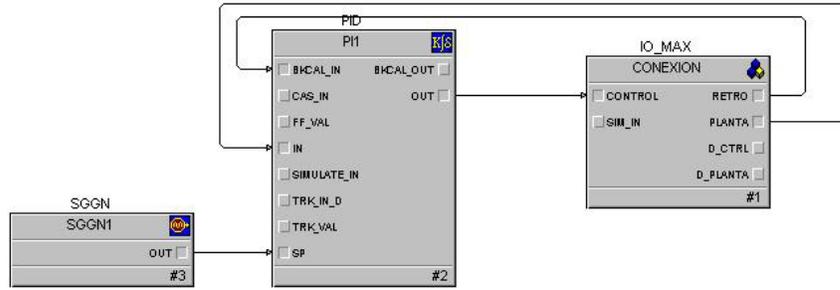


Figura 10.2.4: Esquema Control PI

Donde el bloque SGGN, corresponde a un generador de funciones (cuadrática, rampa o sinusoidal) que se utiliza para establecer el Set-Point deseado para cada una de las pruebas que se utilizaran.

El esquema utilizado para control difuso es similar al PI, tal como se observa en la siguiente figura, con excepción que se utiliza el bloque FLC en vez del PID.

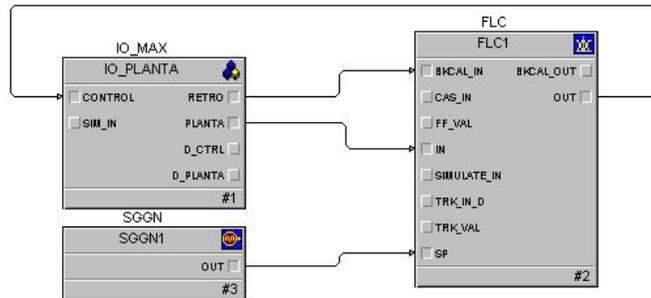


Figura 10.2.5: Esquema Control FLC

Finalmente, en la figura 10.3.6 se tiene el esquema utilizado para realizar el control predictivo.

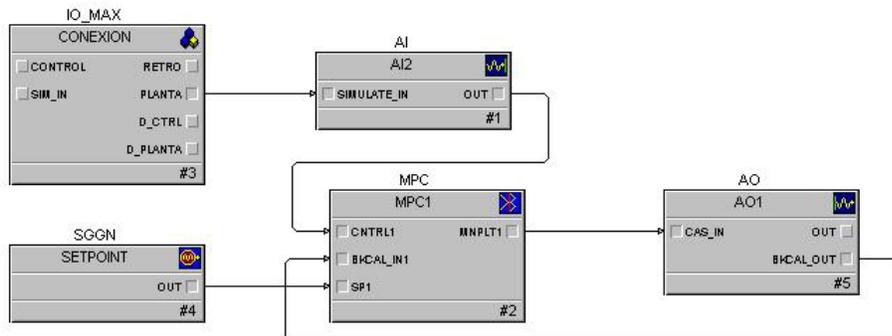


Figura 10.2.6: Esquema Control MPC

Estos tres esquemas son los utilizados para implementar las estrategias de control PI, Difuso y Predictivo, respectivamente, en el controlador DeltaV.

### 10.3 Diseño de Estrategias en Matlab-Simulink

La realización de las simulaciones para cada una de las estrategias se realizó a través de la herramienta Matlab-Simulink, en la cual se diseñaron las estrategias de control lo más similar posible a las estrategias utilizadas en el sistema DeltaV.

La planta se simuló utilizando el modelo obtenido en la identificación ARX y se sumó ruido blanco a la salida de la planta para obtener una representación más real de la planta.

Para el control PI se utilizó el siguiente esquema:

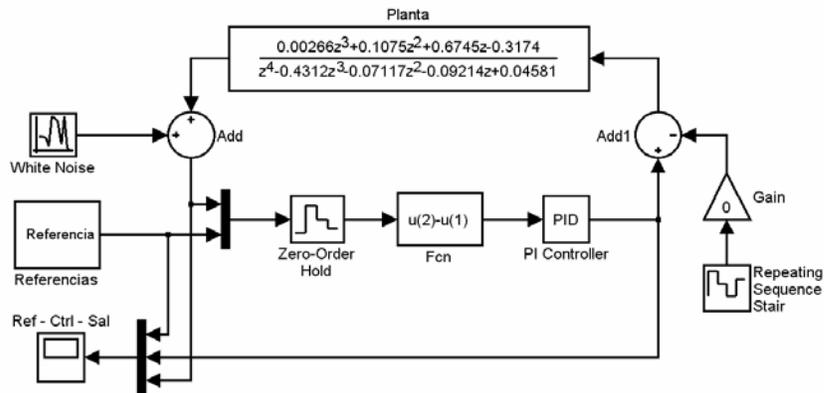


Figura 10.3.1: Esquema control PI

Para simular la variación de carga se utilizó una señal secuencial (Repeating Sequence Stair).

El bloque Referencias de la figura anterior (que será utilizado también en las estrategias restantes) permite optar por las dos referencias utilizadas en esta memoria: una referencia fija y una variable.

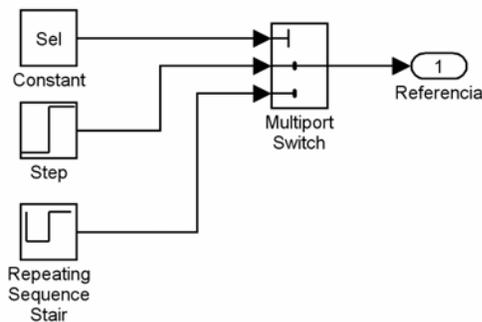


Figura 10.3.2: Bloque Referencias

El esquema que se presenta a continuación corresponde al utilizado para control difuso.

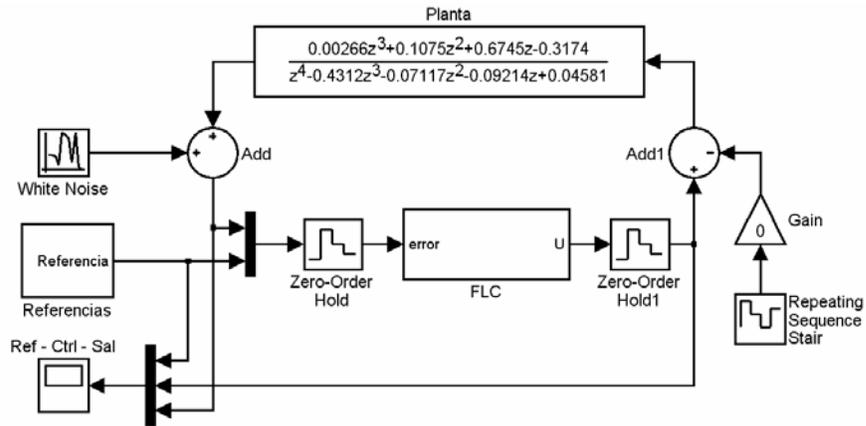


Figura 10.3.3: Esquema control Difuso

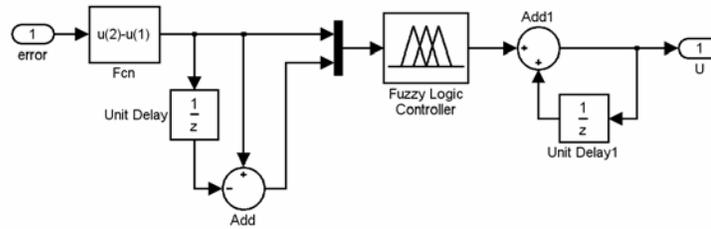


Figura 10.3.4: Bloque FLC

El control Difuso utilizado en el DeltaV corresponde a un PI-Difuso, que utiliza como señales de entrada el error y la variación del error y como salida entrega la variación en la acción de control, esto queda representado en el bloque FLC utilizado en el esquema de control.

Finalmente, en la siguiente figura se observa el esquema utilizado para el control MPC.

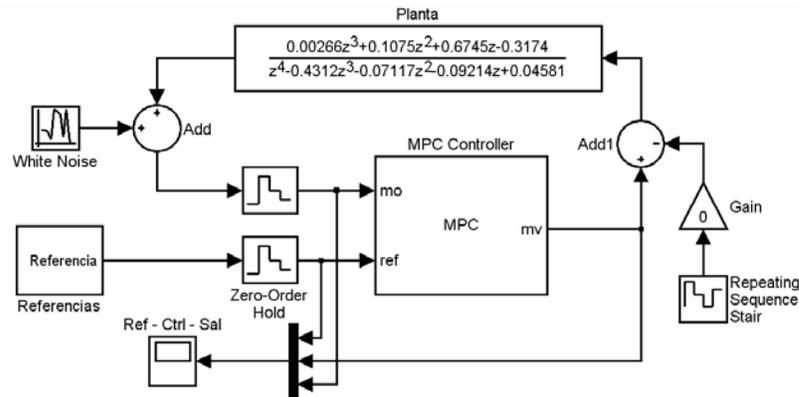


Figura 10.3.5: Esquema control Predictivo

## **10.4 Problemas encontrados**

Una de las cosas que no se mencionan dentro de los capítulos anteriores fueron las actividades previas para realizar este trabajo, como la instalación del software de control y la conexión del controlador con la planta. Aspectos que se consideraron simples de realizar, pero en la práctica no resultan ser así.

En este anexo se quiere mostrar los pasos iniciales realizados para utilizar el sistema de control distribuido y los problemas que aparecieron durante el desarrollo de este trabajo. Se realizara una reseña de lo sucedido desde la instalación del software de control hasta el momento en que se deja toda la planta en perfecto funcionamiento.

El primer paso realizado corresponde a la instalación del software del sistema de control DeltaV, el cual no presenta ninguna dificultad pues el ambiente del programa de instalación es muy amigable con el usuario, indicando paso a paso lo que se debe hacer para instalar la configuración deseada.

Una vez terminada la instalación del software, se realizó la conexión de la estación de trabajo con el controlador, a través de la red LAN. Previamente se habían conectado las señales de entrada y salida de la planta al controlador.

Una vez conectado todos los elementos, se realizaron pruebas de comunicación y funcionamiento, lo que a medida del transcurso de esta labor surgieron los siguientes problemas:

1. Conflictos en la red LAN del laboratorio.  
Este problema se produjo debido a la duplicación del nombre de la red con el nombre de la Estación de Trabajo (ambos tenían de nombre AUTOMATICA), lo que producía conflictos en la red, impidiendo un trabajo adecuado dentro del laboratorio.  
Para solucionar esto, se decidió reinstalar todo el sistema operativo y el software que se necesita para el software de control, teniendo en cuenta el cambio de nombre para impedir que existiera un nuevo conflicto por duplicación de nombre (esto enfocado directamente a los computadores que se encuentran en el laboratorio, ya que se conocía que el problema se debía a que la Estación de Trabajo tenía el mismo nombre de la Red del Laboratorio).
2. Reinstalación del software  
Debido a una falla en una herramienta del software utilizado para el diseño de estrategias de control y comunicación con el DCS, se debió reinstalar el software.
3. Conflictos de comunicación entre la Estación de Trabajo y el DCS DeltaV  
Se encontró una inestabilidad en la comunicación entre la Estación de Trabajo y el DCS, perdiendo la comunicación (perdidas de segundos y hasta minutos) o perdiendo la comunicación completamente.  
Esta inestabilidad imposibilitaba realizar el estudio deseado, teniendo en consideración que el DCS funciona correctamente sin la comunicación con la Estación de Trabajo pero no se puede observar como actúan las estrategias de control implementadas.

Se cambió de red de comunicación, en vez de utilizar la red presente en el Laboratorio de Automática se conectó directamente la Estación de Trabajo con el DCS. Con este cambio se solucionó satisfactoriamente este problema.

#### 4. Desconocimiento de la obtención de Datos

El software con el que se dispone no entrega de manera directa un registro histórico de los datos que se obtienen del DCS, sólo los manipula para mostrar gráficos o valores específicos (como valor actual y valor medio).

El software utiliza un programa independiente que realiza la labor de administrar los registros (PI Data Archive System), con lo que el problema consistía en saber como leer los datos que almacena este programa. Se encontró un software (PI Datalink) que permite tomar los valores que se encuentran en el servidor de datos y entregar datos en una planilla de cálculo (Microsoft Excel).

Los problemas 1 y 3 han sido, más que nada, provocados por no considerar aspectos básicos que son necesarios para el funcionamiento de un sistema de control, por ejemplo el problema con el nombre del PC siendo un problema básico en cualquier tipo de configuración de una red de computadores no fue considerado al momento de instalar el software, donde lo primero que hay que considerar son estos problemas de duplicidad de nombre o de dirección dentro de una red. Y el segundo caso, se pensaba que la red interna del laboratorio, que es utilizada para realizar control a varias plantas a través de PLC y que existe mucho tráfico de datos debido a las transmisiones de información tanto interna como de Internet, serviría para utilizarla y no presentaría ningún problema, a pesar de que se recomienda que las redes de control sean lo más dedicadas y omitir cualquier otro servicio que no sea necesario para controlar el proceso.

Un aspecto importante, del cual no se tenía conocimiento, era como obtener los datos a través del software de control. En un principio se pensaba que el software los entregaba de maneja natural para poder ser manipulados como uno desea, pero en la realidad eso no es así, ya que en la industria es de suma importancia que el proceso sea controlado y de buena forma, lo cual los software de control no se encarga de administrar los datos históricos, ya que le significa realizar otros procesos que podrían, eventualmente, saturar la red de control o la estación de trabajo; para esto se utiliza un componente dentro del sistema de control distribuido que se encargue de la administración de todos los datos.

De estos problemas, el que causó mayores complicaciones fue el último, la imposibilidad de contar con los datos provocó un gran atraso en el desarrollo de este trabajo. Pero gracias a estos problemas se logró conocer más este tipo de sistemas de control, también que es necesario considerar todos los pasos necesarios que deben existir para que estos sistemas funcionen adecuadamente y conocer lo que realmente se puede hacer y no con un sistema de control.