



fcfm

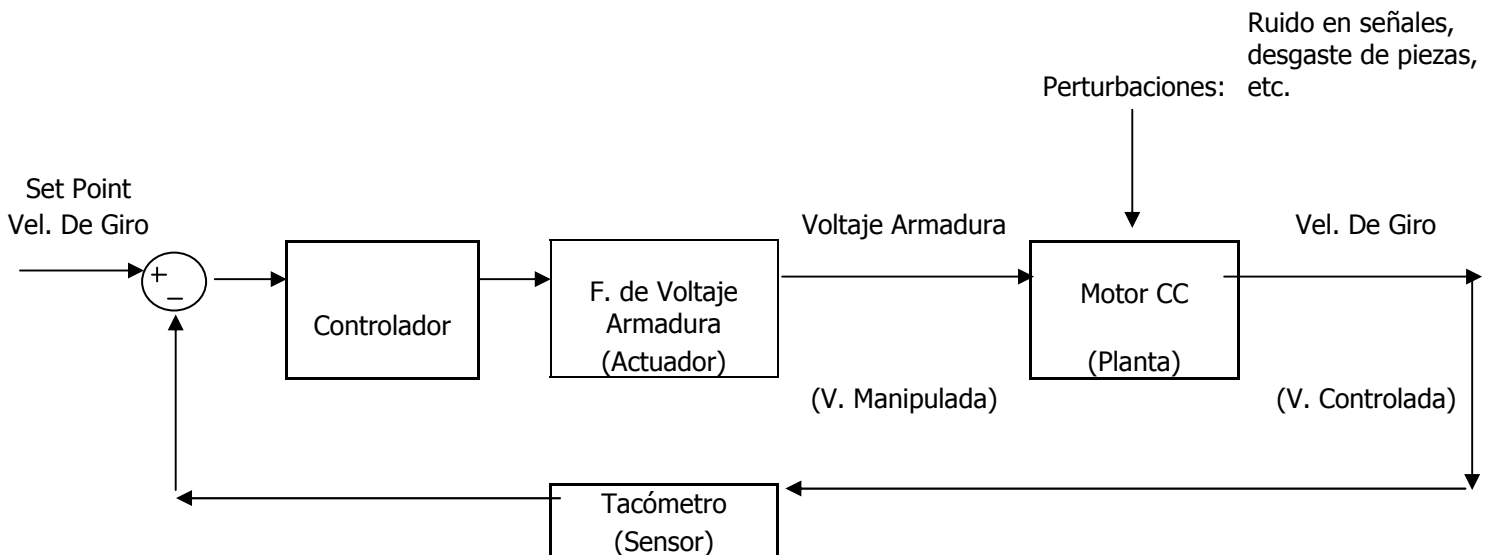
Ingeniería Eléctrica
FACULTAD DE CIENCIAS
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
UNIVERSIDAD DE CHILE

**Pauta Ejercicio 1
EL42D - Control de Sistemas**

**Profesora: Ph.D. Doris Sáez
Ayudante: Gonzalo Kaempfe (gkaempfe@ing.uchile.cl)**

Parte V.

V.1.-



V.2.-

Ecuación característica dada por el lazo cerrado con controlador PID:

$$s^2 + 0.008405(k_d + 192.75)s + 0.008405(k_p + 46.9977) = 0$$

Ecuación característica dada por los requerimientos:

$$s^2 + 1.6642s + 1.24816 = 0$$

Igualando los polinomios, se concluye que el controlador buscado es el siguiente:

$$G_C(s) = 101.504 + 5.25119s$$

V.3.-

Ecuación característica dada por los requerimientos:

$$s^2 + 0.256s + 0.046883 = 0$$

Agregándole un polo adicional (s+a):

$$s^3 + (0.256s + a)s^2 + (0.046883 + 0.256a)s + 0.046883a = 0$$

Ecuación característica dada por el lazo cerrado con controlador PI:

$$s^3 + 1.62s^2 + 0.008405(k_p + 46.9977)s + 0.008405k_i = 0$$

Igualando los polinomios, se concluye que el controlador PI buscado es el siguiente:

$$G_C(s) = 0.125084 + \frac{7.60838}{s}$$

$$a = 1.364$$

Ecuación característica dada por el lazo cerrado con controlador PID:

$$s^3 + 0.008405(k_d + 192.75)s^2 + 0.008405(k_p + 46.9977)s + 0.008405k_i = 0$$

Para encontrar los valores de las 3 constantes del controlador PID y, además, el valor del tercer polo, se necesita una ecuación adicional a las entregadas al igualar los coeficientes de los polinomios dados por el lazo cerrado y por los requerimientos.

Ziegler & Nichols usan la siguiente aproximación:

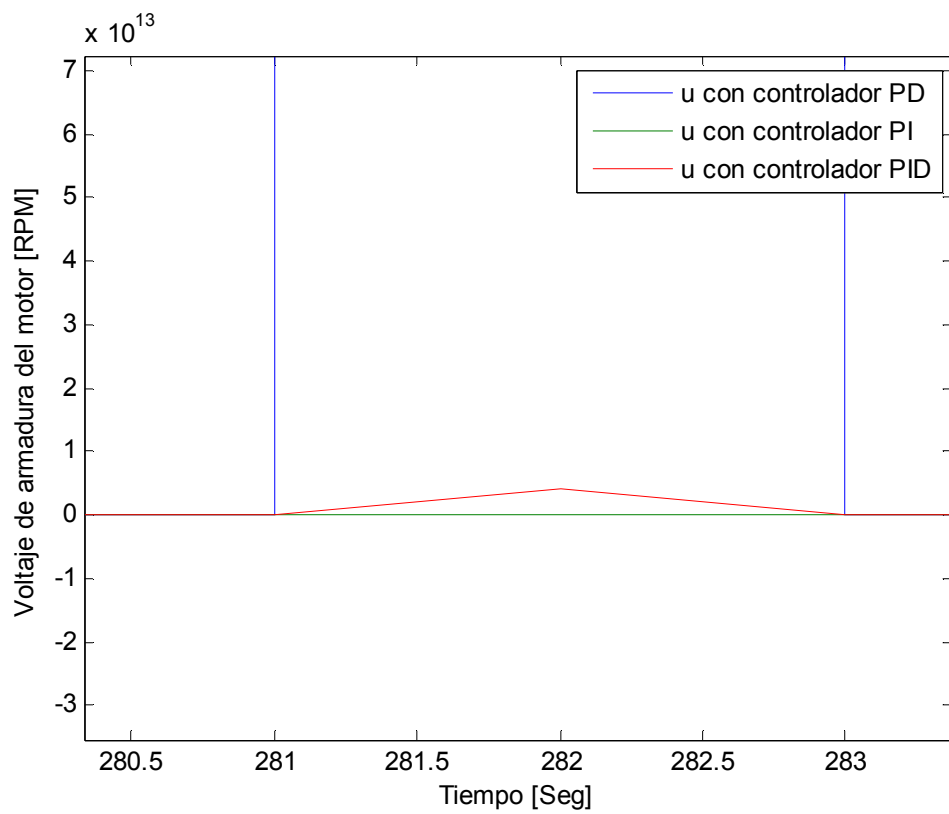
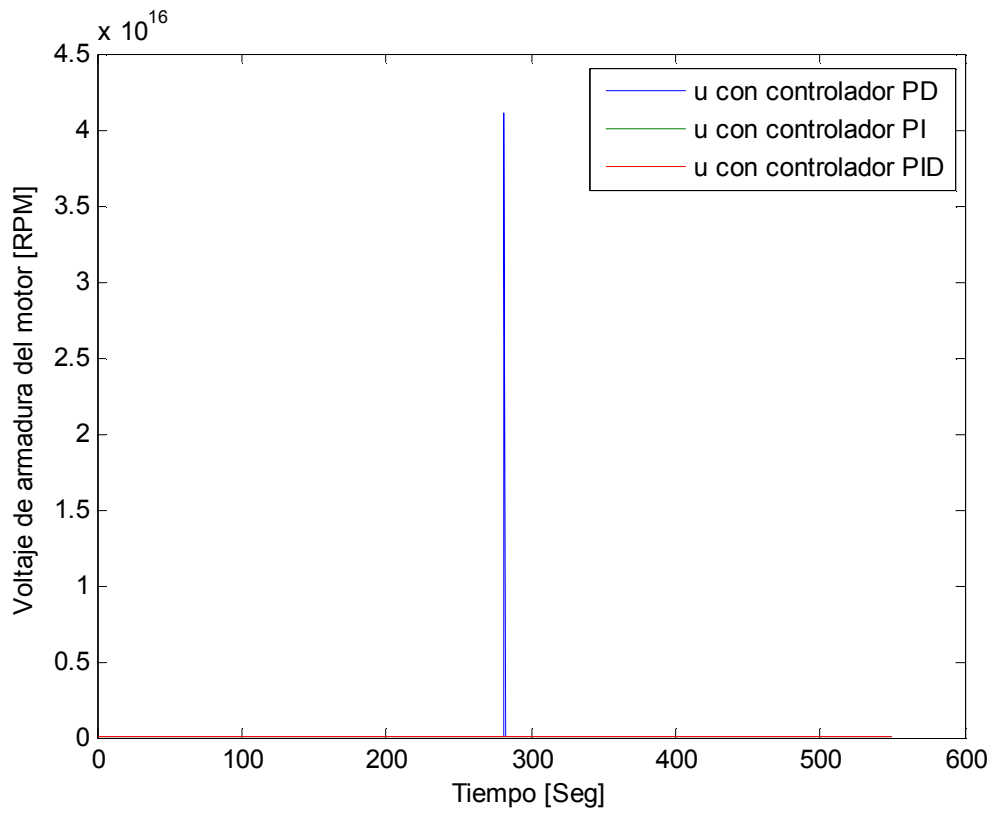
$$T_i = 4T_d \Rightarrow k_p^2 = 4k_i k_d$$

Utilizando MATLAB, se puede encontrar la solución. Se debe probar cada una en simulink. Solo sirve la siguiente:

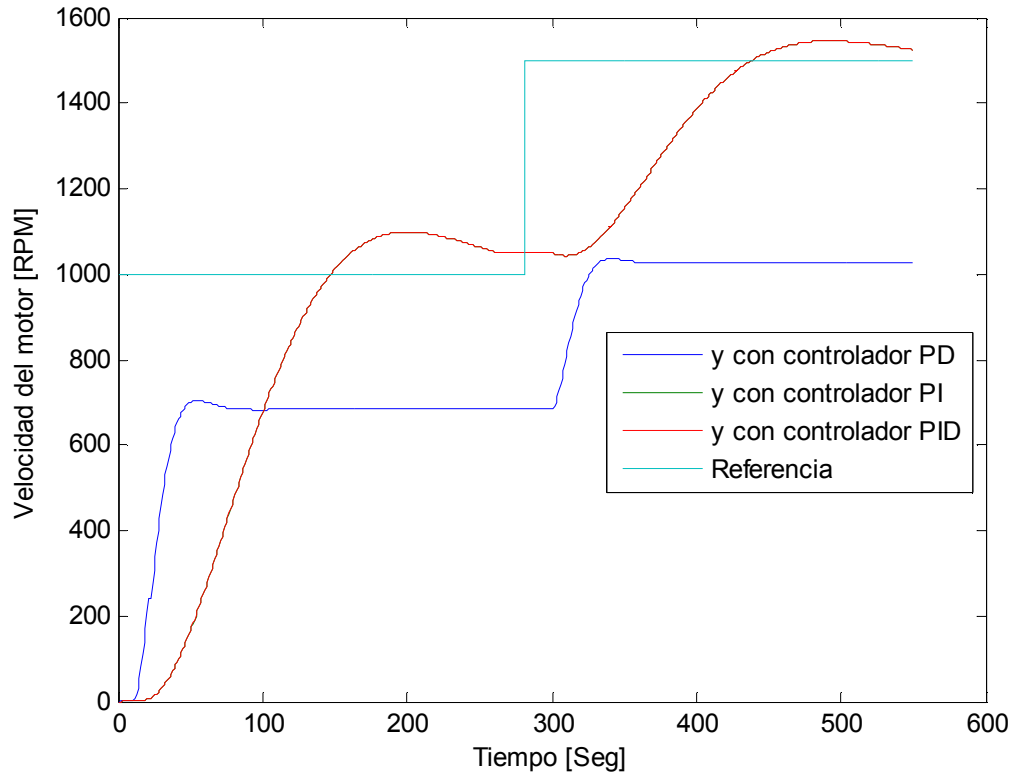
$$G_C(s) = 0.127126 + \frac{7.60874}{s} + 0.000531k_d$$

$$a = 1.36406$$

Análisis

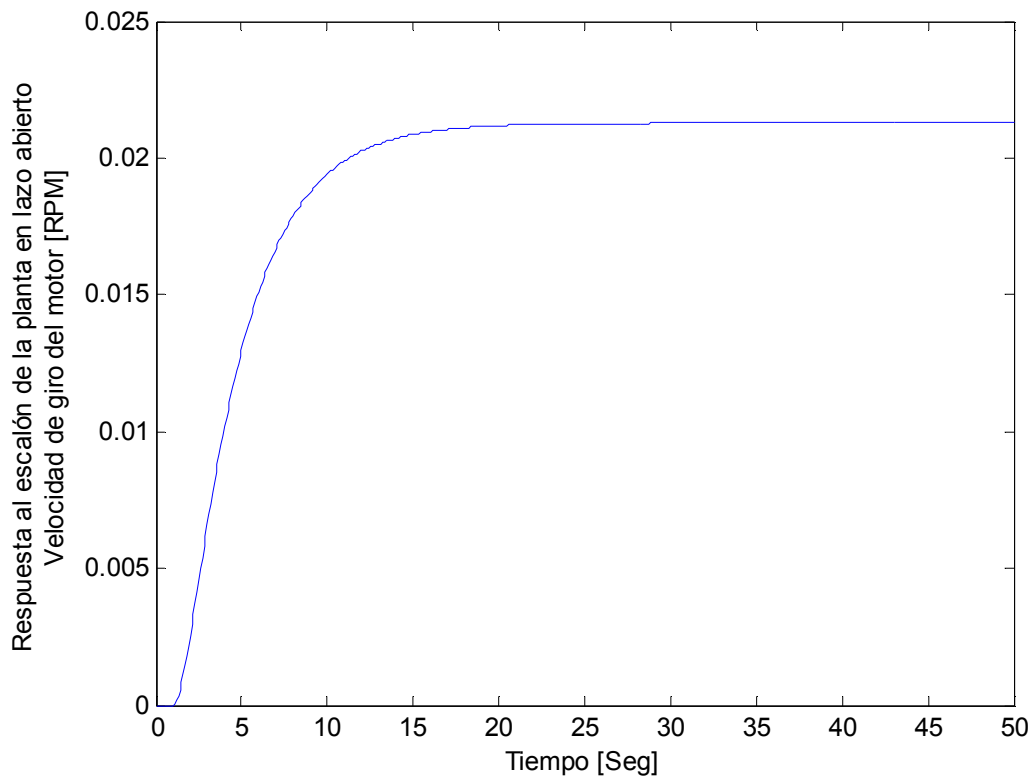


Claramente excede los 50[V] que soporta el motor. Se observa que este efecto es aún peor en el caso del controlador PD. Claramente se requiere de un saturador, un filtro antiwindup o una mejor modelación fenomenológica de la planta.



Se observa que los controladores PI y PID cumplen perfectamente los requerimientos. En el caso del controlador PD, este solo cumple el requerimiento de tiempo de estabilización, presentando un error permanente de proporciones.

V.4.-



Del dibujo, se concluye que los valores necesarios para los cálculos son los siguientes:

$$K = 0.021$$

$$L = 0.48$$

$$T = 4.838$$

Por lo tanto, los controladores buscados son los siguientes:

$$G_c(s) = \left(\frac{T}{L}\right) = 10.079$$

(Controlador P)

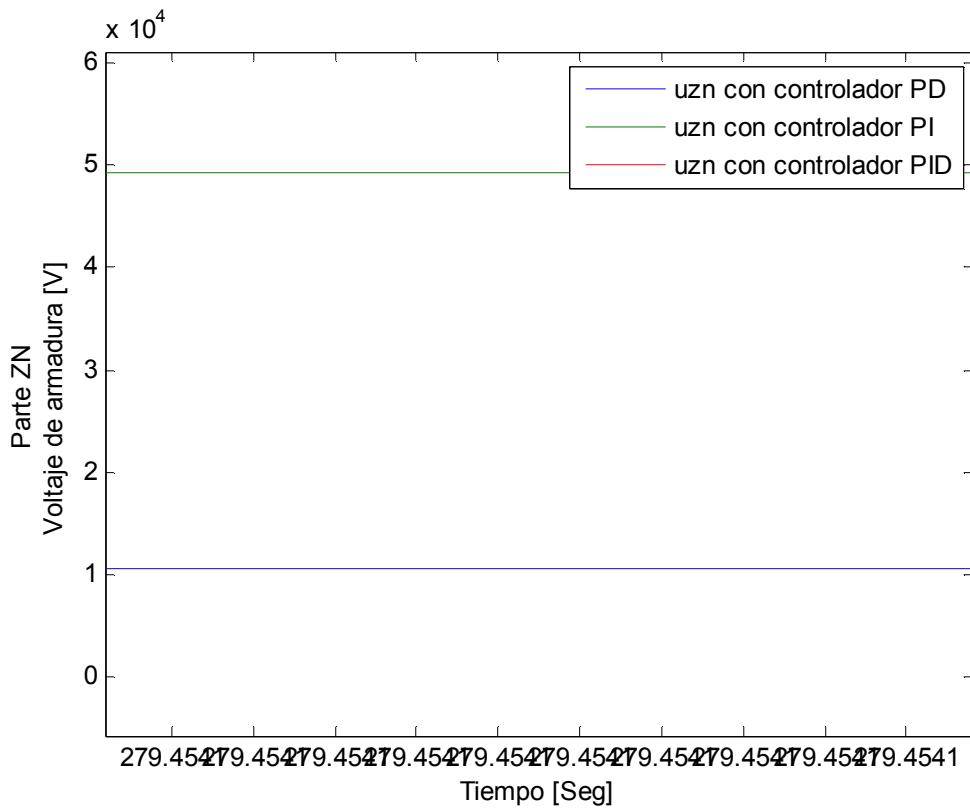
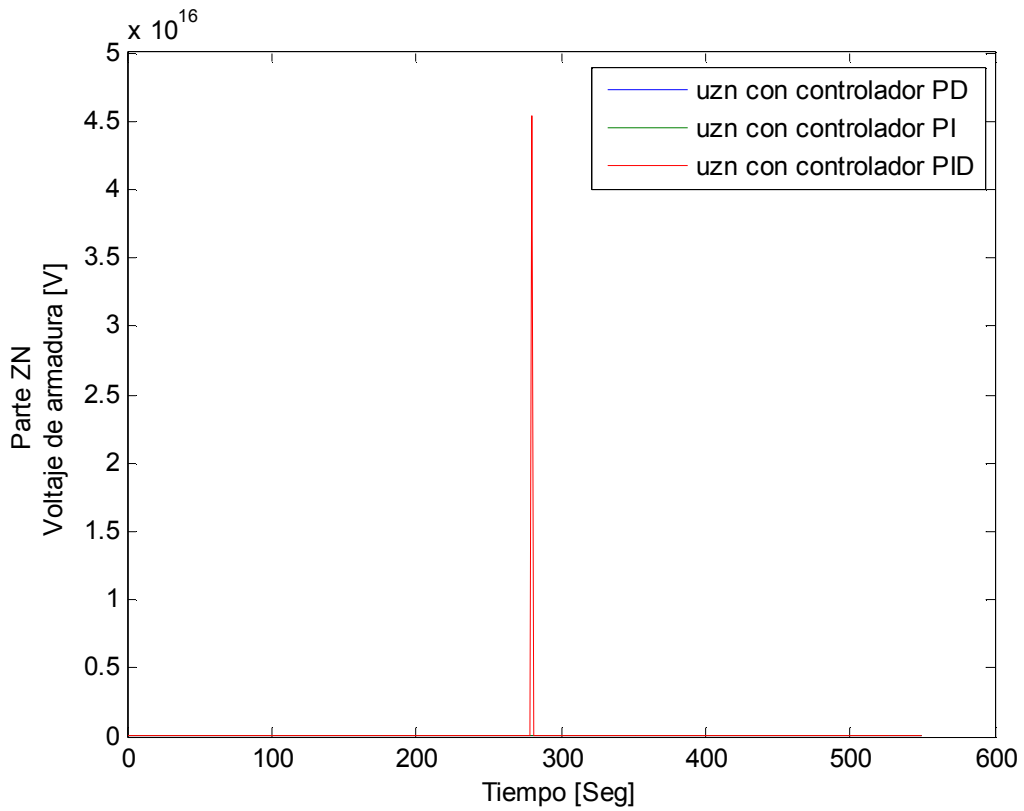
$$G_c(s) = 0.9\left(\frac{T}{L}\right) + 0.27\left(\frac{T}{L^2}\right)\left(\frac{1}{s}\right) = 9.071 + \frac{5.6695}{s}$$

(Controlador PI)

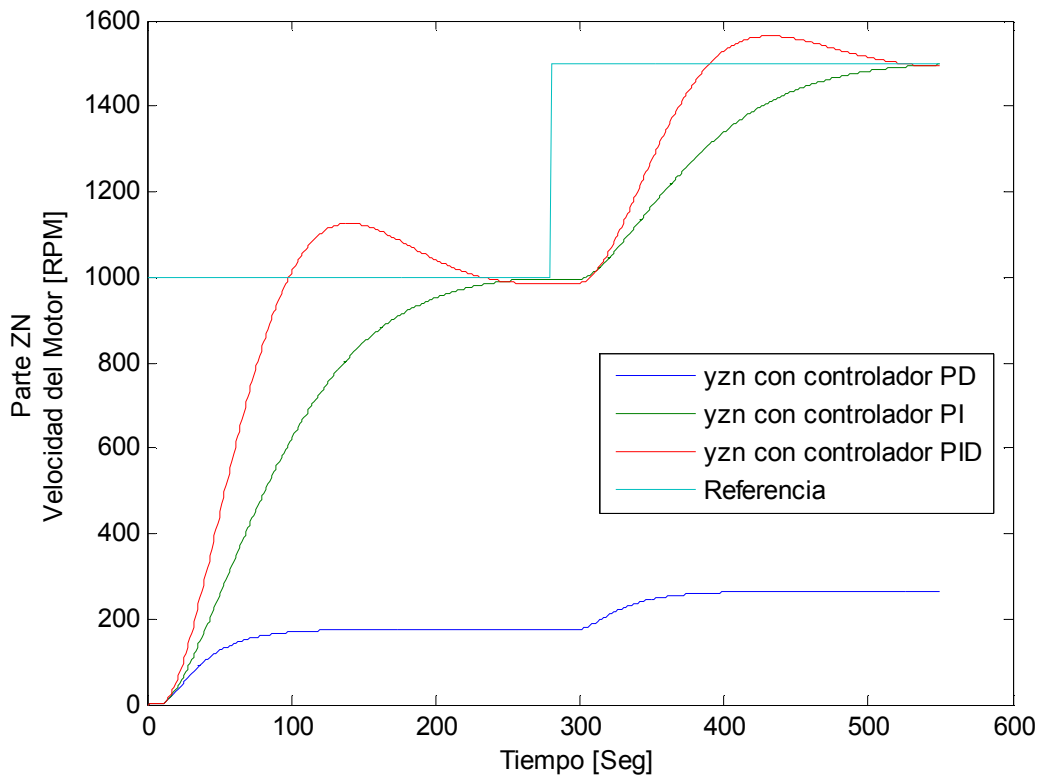
$$G_c(s) = 1.2\left(\frac{T}{L}\right) + 0.6\left(\frac{1}{s}\right)\left(\frac{T}{L}\right) + 0.6Ts = 12 + \frac{12.6}{s} + 2.9s$$

(Controlador PID)

A continuación se muestran las salidas de los lazos cerrados, con cada uno de los controladores diseñados:



Se observa un comportamiento análogo al casi analógico, excepto que ahora, el peor caso, en cuanto a la amplitud de la variable manipulada, es el controlador PID.



Se observa que el que mejor se ajusta a los requerimientos y referencia deseada, es el controlador PID. El controlador PD es bastante deficiente.

V.5.

El funcionamiento del controlador PI diseñado en forma analítica es mucho mejor que el diseñado con técnicas gráficas. Se debe a que el primero se diseñó para que cumpliera requerimientos específicos.

V.6.

$$G(z) = \frac{0.000152(z + 0.89765577)}{(z - 0.941764133)(z - 0.767973867)}$$

V.7.

Ecuación característica dada por requerimientos:

$$z^2 - 1.67459z + 0.716883 = 0$$

Agregándole un polo adicional:

$$z^3 + (a - 1.67459)z^2 + (0.716883 - 1.67459a)z + 0.716883a = 0$$

Ecuación dada por el lazo cerrado con controlador PD:

$$z^3 + 0.000152(k_d + k_p - 11248.3)z^2 - 0.000016(k_d - 8.77093(k_p + 5300.72))z - 0.000136k_d = 0$$

Dependiendo de la cantidad de decimales utilizada y, el instrumento utilizado para calcular, se podían obtener diversos resultados posibles, entre ellos, los siguientes:

$$G_c(Z) = 25.419153 + 91.557966(1 - z^{-1}) \quad , \quad a = -0.173695$$

$$G_c(Z) = 98.59 + 59.63(1 - z^{-1}) \quad , \quad a = -0.0113$$

Se debía escoger el con menor parte derivativa.

V.8.

Ecuación característica dada por requerimientos:

$$z^2 - 1.94826z + 0.950088 = 0$$

Agregándole un polo adicional:

$$z^3 + (a - 1.94826)z^2 + (0.950088 - 1.94826a)z + 0.950088a = 0$$

Ecuación dada por el lazo cerrado con controlador PI:

$$z^3 + 0.000152(k_i + k_p - 17827.2)z^2 + 0.000136(k_i - 0.114013(k_p - 156398))z - 0.000136(k_p + 5300.72) = 0$$

Dependiendo de la cantidad de decimales utilizada y, el instrumento utilizado para calcular, se podían obtener diversos resultados posibles, entre ellos, los siguientes:

$$G_c(Z) = 0.12 + \frac{1.52}{1 - z^{-1}} \quad , \quad a = -0.758544$$

$$G_c(Z) = 0.97 - \frac{1.75}{1 - z^{-1}}$$

Ecuación dada por el lazo cerrado con controlador PID:

$$z^4 + 0.000152(k_p + k_i + k_d - 17827.2)z^3 - 0.000168(k_d - 0.814315(k_i - 0.114013(k_p - 156398)))z^2 - 0.000121(k_d + 1.12868(k_p + 5300.72))z + 0.000136k_d = 0$$

Debe usarse la misma aproximación que en el caso del PID continuo:

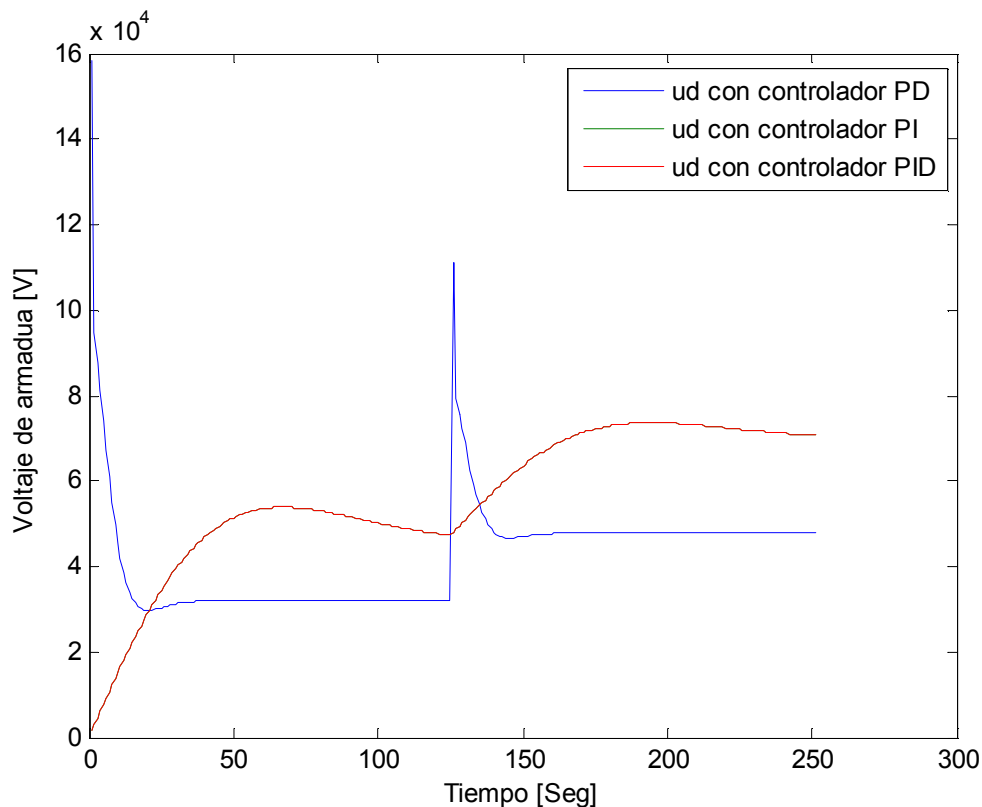
$$T_i = 4T_d \Rightarrow k_p^2 = 4K_i k_d$$

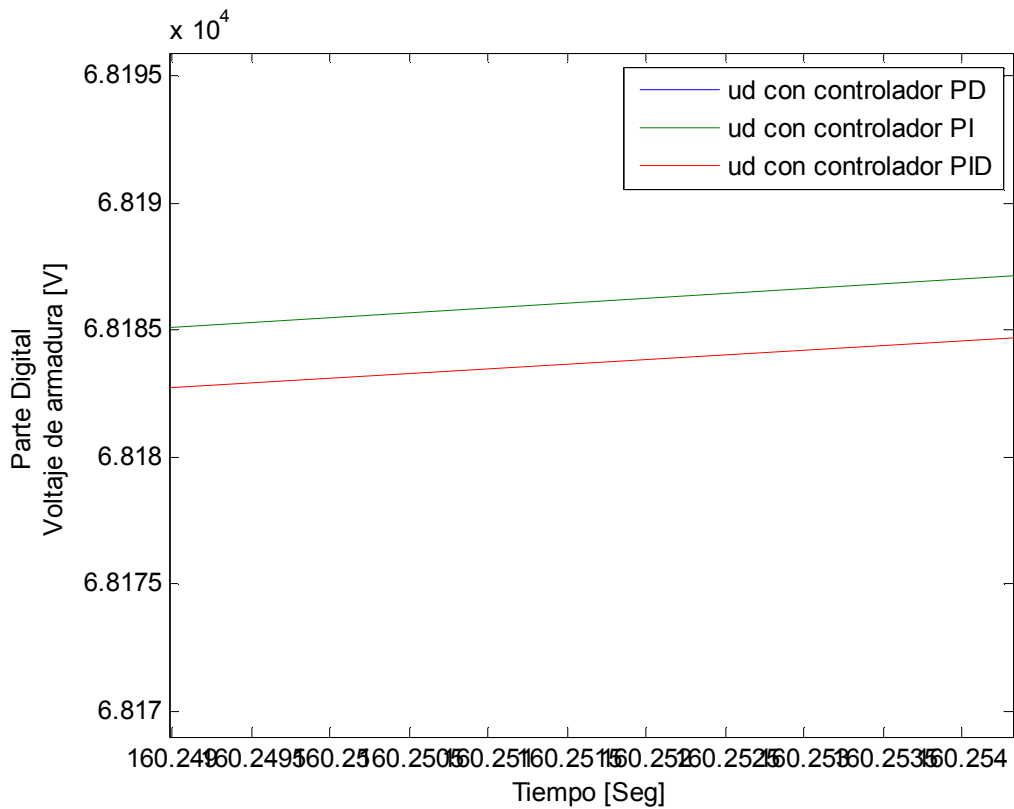
Dependiendo de la cantidad de decimales utilizada, de la aproximación utilizada y, el instrumento utilizado para calcular, se podían obtener diversos resultados posibles, entre ellos, los siguientes:

$$G_c(Z) = 174.6586 + \frac{2.0583}{1 - z^{-1}} + 3705(1 - z^{-1}) \quad , \quad a = -0.85 \cdot 10^{-1}$$

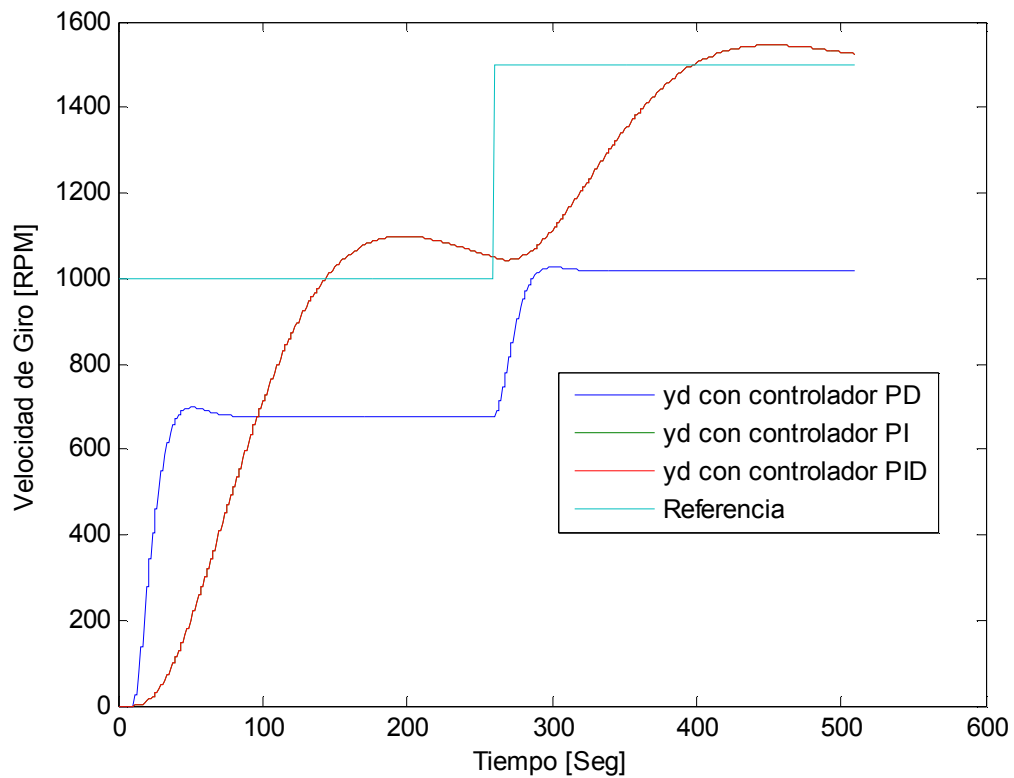
$$G_c(Z) = 0.12 + \frac{1.52}{1 - z^{-1}} + 0.13(1 - z^{-1}) \quad , \quad a = -0.000025$$

Análisis





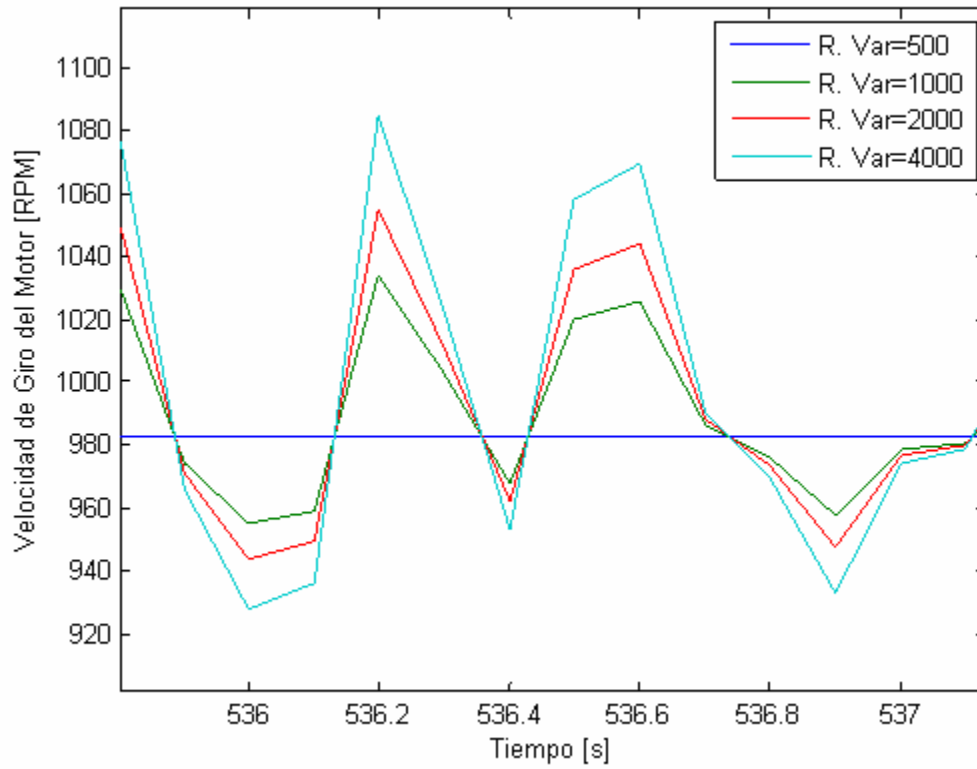
Se observa que los controladores PI y PID funcionan casi de la misma forma, cumpliendo los requerimientos, bastante mejor que el controlador PD, en cuanto a la forma y valores de la variable manipulada.



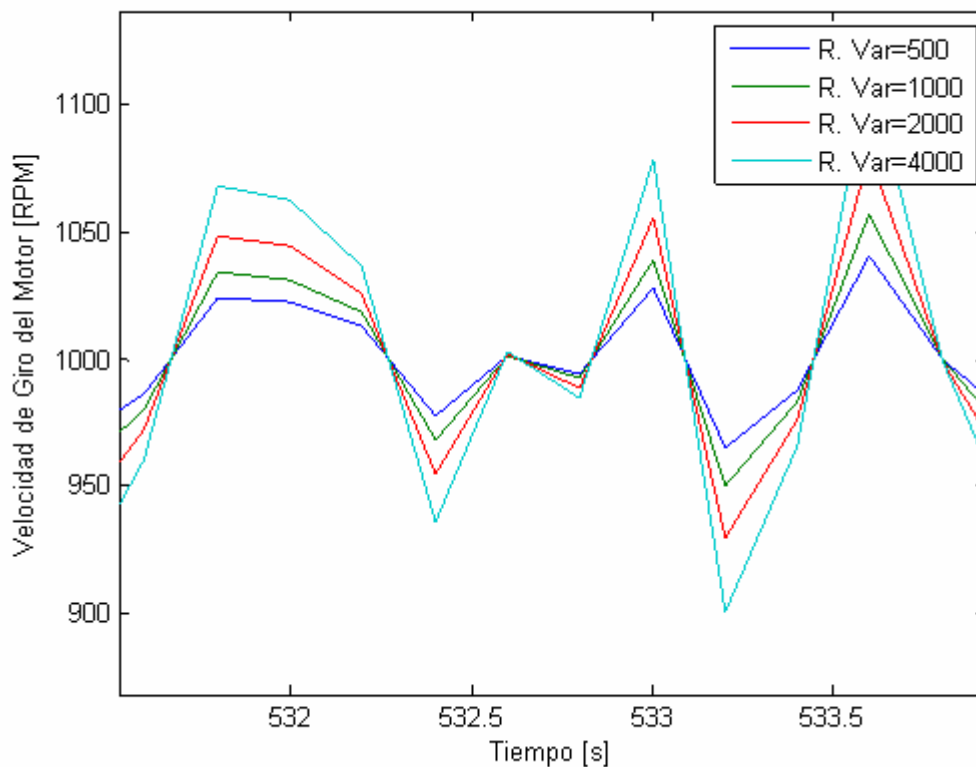
Se observa un comportamiento casi idéntico, con respecto al de los controladores analógicos.

V.9.

A continuación, se muestran los resultados de la salida del lazo cerrado, con un controlador PID analógico.



A continuación, se muestran los resultados de la salida del lazo cerrado, con un controlador PID digital.



Se puede apreciar que la presencia de ruido retarda bastante la acción del controlador en la planta. Por otro lado, a medida de que aumenta la varianza del ruido, crece bastante la sobreoscilación del sistema, por lo que debe prestarse extremo cuidado a la presencia de éste. Esta reacción adversa se hace más dramática en el caso de los controladores PD.

V.9.

El controlador PD análogo y el digital cumplen con los requisitos de diseño, pero presentan una gran diferencia entre la referencia y el nivel real en que el controlador estabiliza la salida del sistema, es decir, un gran error estacionario.

El controlador PI análogo cumple con los requerimientos y no presenta error permanente. Sin embargo, el controlador PI discreto desestabiliza completamente el sistema, por lo que se deben probar nuevos tiempos de discretización para esta planta.

El controlador PID análogo y el discreto funcionan bastante bien, cumpliendo casi a cabalidad los requerimientos de diseño.

Los controladores discretos muestran reaccionar más inestablemente que los análogos, y en forma bastante menos suave.

V.10.

- ¿Cómo afecta el valor de los polos adicionales, que se deben añadir en algunos casos, al desempeño del controlador?

Si el valor de este polo resulta ser positivo, inestabiliza al sistema. Si el valor es negativo, pero menor que el de los valores de los otros polos del sistema, modifica el comportamiento de este.

- Si no fuera posible aislar el ruido presente en las señales del motor, ¿cuál(es) controlador(es) se debería(n) descartar?

Se deberían descartar los controladores PD y PID, ya que incrementan el ruido del sistema.

- Si el sistema presenta cierto grado de inestabilidad en lazo abierto, ¿cuál(es) controlador(es) se debería(n) descartar?

Se deberían descartar los controladores PI y PID, ya que modifican los polos del sistema, incrementando su inestabilidad, debido a la parte integrativa. Por otro lado, no se debería utilizar la técnica de Ziegler & Nichols, debido a que ésta exige un sistema estable.

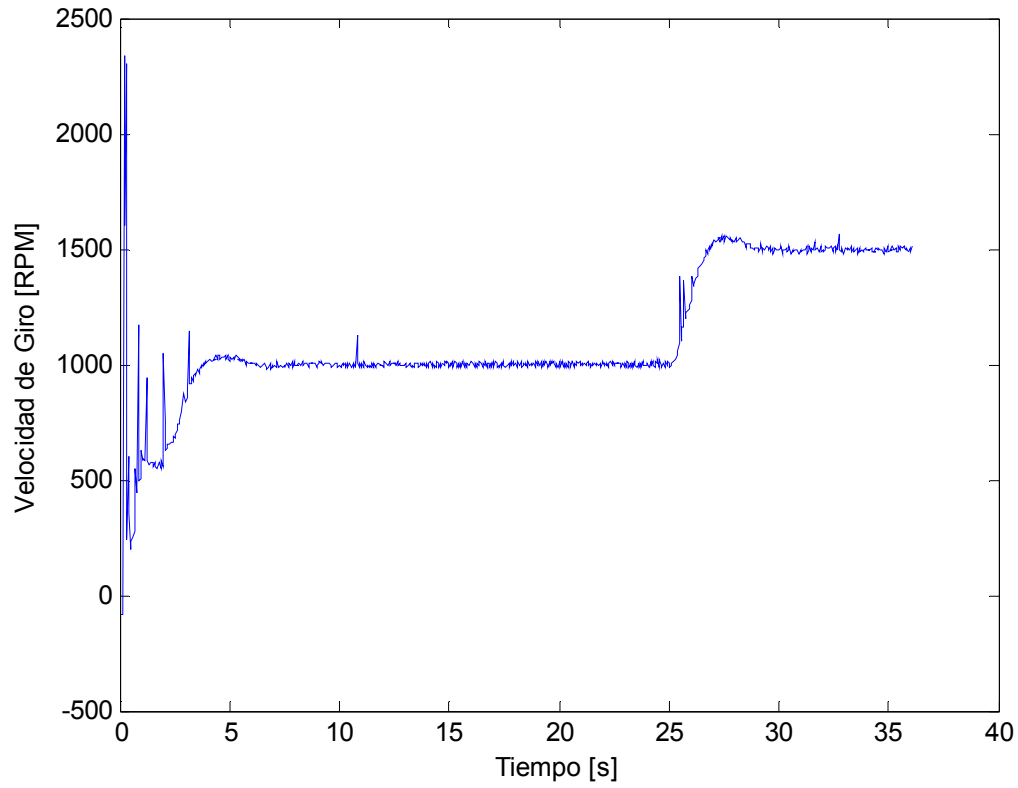
- ¿Es posible diseñar en forma analítica un controlador proporcional para esta planta? ¿Cuál(es) requerimiento(s) se necesitarían?

Se debe dar un tiempo de estabilización. Con este dato, es posible diseñar un controlador proporcional.

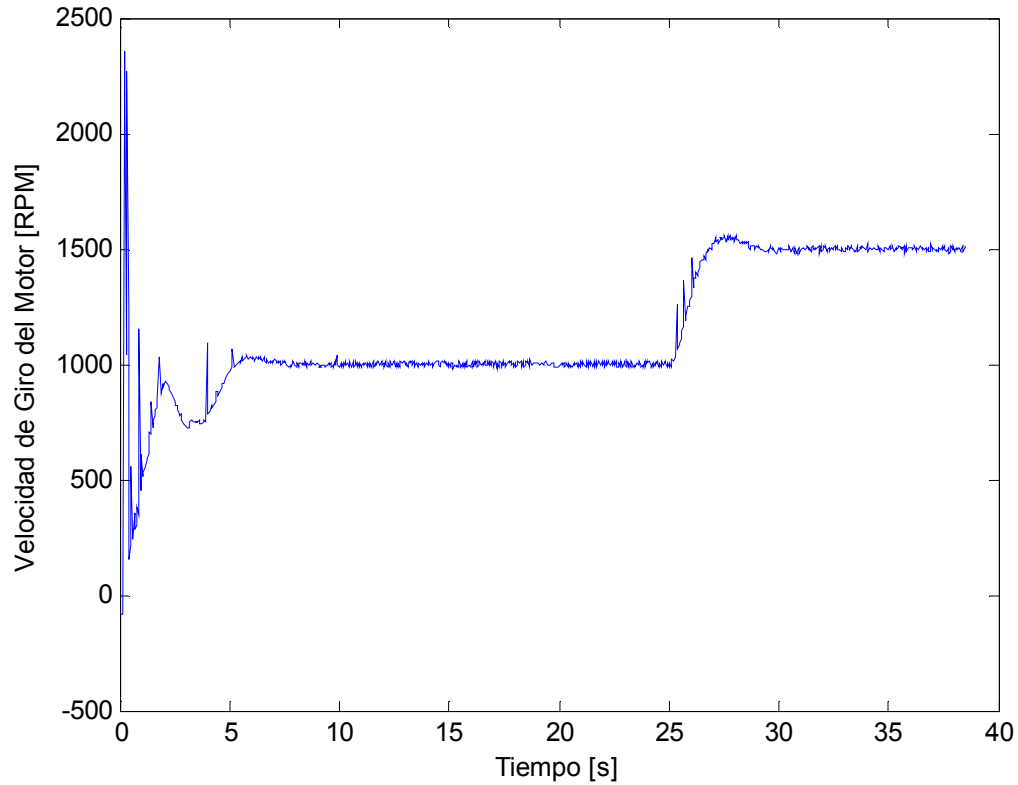
Parte VI (Experimental)

1. A continuación se muestran algunos de los resultados obtenidos experimentalmente.

Lazo cerrado, con controlador PI, ante cambio de referencia



Lazo cerrado, con PID, ante cambio de referencia



2.

Algunas perturbaciones del sistema son el roce entre las piezas del motor y el eje, el desgaste natural de las escobillas, posible corrimiento del neutro de conmutación, mala calibración del tacómetro o del opto, influencia de las variables ambientales, etc.

Se aprecia mucho ruido en la partida del motor, el que se debe al alto valor del torque y corriente de partida, además del ruido que ingresa el sensor a las señales. Se debería aplicar un filtro pasa bajos para mejorar la señal. Otra opción es optimizar la función de transferencia dada, lo cual, se podía concluir al observar los valores de la variable manipulada, que eran gigantescos e irreales. Para ello, se debe aplicar un algoritmo de identificación a las señales utilizadas, como por ejemplo, uno recursivo de regresión por pasos.

Los controladores analógicos funcionaron sensacionalmente bien, como se esperaba, con algo de sobre-oscilación. Los controladores digitales funcionaron aún mejor, sin sobre-oscilación y, con menos ruido en las señales. Todo salió como se esperaba, de acuerdo a las simulaciones realizadas, excepto la gran robustez y la nula sobre-oscilación observada en la acción de control de los controladores discretos. De todas formas, la gran sensibilidad de los resultados obtenidos al uso de cierto número de decimales o de dispositivos, indica que siempre se debe simular el funcionamiento de la planta en simulink, por ejemplo, y luego, probarla en la planta real.

Puntajes

▪ **Informe 1 (Diseño de Controladores)**

Punto Base	1.0
Parte 1	0.3
Parte 2	0.3
Parte 3	0.3
Parte 4	0.6
Parte 5	0.6
Parte 6	0.3
Parte 7	0.3
Parte 8	0.3
Parte 9	0.3
Parte 9	0.6
Parte 10	0.6
Análisis y Conclusiones ¹	1.5

Ponderaciones	Nota Final Pauta Anterior	70%
	Formato (según pauta proporcionada)	30%

▪ **Informe 2 (Parte Experimental)**

Punto Base	1.0
Formato	1.0
Imágenes ²	2.0
Análisis	3.0

En el análisis se debía incluir lo siguiente:

- Análisis entre controladores simulados y experimentales, además de analógicos y digitales (0.5).
- Se debía concluir que los controladores digitales eran mejores, ya que no presentan sobre-oscilación y son más robustos que los analógicos (0.5).
- Explicar a qué puede deberse el gigantesco transiente observado en las señales experimentales: se debía al gran valor del torque de partida del motor, al ruido ingresado por el sensor, etc. (0.5)
- Mencionar perturbaciones que afecten a la planta (0.5) y la sensibilidad de la cantidad de decimales utilizada en el diseño de controladores (0.5), para explicar las diferencias observadas entre la señal simulada y la real. Percatarse que la simulación es solo una aproximación del comportamiento real de la planta, que por lo general es más complejo (0.5).

¹ En esta parte, si no se ponen "imágenes que ayuden a la comprensión del problema", es un máximo de 0.8

² Las imágenes deben ser 4, con la referencia, la señal simulada y la señal obtenida experimentalmente. Se fue descontando puntaje, a medida de que las imágenes insertadas se alejaban del objetivo.