

UNIVERSIDAD PRIVADA ANTENOR ORREGO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA



TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO ELECTRONICO

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE UN CONTROLADOR PARA SISTEMAS DE PRIMER ORDEN UTILIZANDO EL MÉTODO DEL DESCENSO DEL GRADIENTE

Área de investigación:

CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN DE PROCESOS INDUSTRIALES

Autor:

Br. Rivera Bardález, Juan Carlos

Jurado evaluador:

Presidente: Alva Alarcón, Jorge Luis

Secretario: Trujillo Silva, Marco Tulio

Vocal: De La Cruz Rodríguez, Oscar Miguel

ASESOR:

Ing. Saúl Linares Vértiz

Código Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-4272-974>

Fecha de sustentación: 2021/12/30

TRUJILLO - PERÚ

2021

“ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE UN CONTROLADOR PARA SISTEMAS DE PRIMER ORDEN UTILIZANDO EL MÉTODO DEL DESCENSO DEL GRADIENTE”

Elaborado Por:



Br. Rivera Bardález, Juan Carlos

Aprobado por:



Presidente
Ms. JORGE LUIS ALVA ALARCÓN
CIP 214251



Secretario
Ms. MARCO TULIO TRUJILLO SILVA
CIP 82929



Vocal
Ms. OSCAR MIGUEL DE LA CRUZ RODRIGUEZ
CIP 85598



Asesor
Ing. SAUL NOE LINARES VERTIZ
CIP 142213

DEDICATORIA

A mis padres por su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años, mucho de mis logros se los debo a ustedes, me formaron con reglas y con algunas libertades, pero al final de cuentas me motivaron constantemente para alcanzar mis anhelos.

A mi hija Andrea quién ha sido mi mayor motivación para nunca rendirme en los estudios y poder llegar a ser un ejemplo para ella.

Juan Carlos Rivera Bardalez

AGRADECIMIENTO

Con mucha gratitud, a todos los docentes ingenieros de la Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica UPAO, que compartieron conmigo sus conocimientos para hacer posible una de mis metas en mi vida profesional, especialmente al Ing. Saúl Linares Vértiz, por su paciencia, motivación y su valiosa guía y asesoramiento profesional; por haber inculcado en mí el sentido de responsabilidad y rigor académico, sin los cuales no hubiera hecho posible este trabajo de investigación, para así obtener la titulación profesional.

Muchas gracias a todos por el apoyo que me brindaron.

El Autor.

RESUMEN

El presente trabajo describe el comportamiento de un controlador PI usando el método del descenso del gradiente.

En el capítulo uno se indica el objetivo del estudio que es el de Describir el comportamiento de un controlador adaptativo que utiliza el método del descenso del gradiente en sistemas de primer orden.

En el capítulo dos se desarrolla el primer objetivo de la investigación el cual describe el método del descenso del gradiente para la minimización del error, en el capítulo tres se desarrollan los tres últimos objetivos de esta investigación, se determinan las ecuaciones que permiten el cálculo de las constantes K_p y K_i para la minimización del error, además se implementa el programa realizado en Protón en un controlador 16F877 , se toman los datos para polos que se encuentran en $s = -1, -\frac{4}{3}, -10$ y -20 con diferentes tiempos de Muestreo siendo el mínimo 3ms.

En el capítulo cuatro se realiza el análisis de los datos tomados anteriormente indicando una dependencia del tiempo de establecimiento con el tiempo de muestreo.

En el capítulo cinco se indican las conclusiones del presente trabajo.

ABSTRACT

The present work describes the behavior of a PI controller using the gradient descent method.

In chapter one the objective of the study is indicated, which is to describe the behavior of an adaptive controller that uses the gradient descent method in first-order systems.

In chapter two the first objective of the investigation is developed which describes the method of the descent of the gradient for the minimization of the error, in chapter three the last three objectives of this investigation are developed, the equations that allow the calculation of the constants K_p and K_i for the minimization of the error, in addition the program carried out in Proton is implemented in a 16F877 controller, the data is taken for poles found at $s = -1, -\frac{4}{3}, -10$ and -20 with different sampling times being the minimum 3ms.

In chapter four the analysis of the data taken previously is carried out, indicating a dependence of the establishment time with the sampling time.

In chapter five the conclusions of the present work are indicated.

PRESENTACIÓN

Señores miembros del Jurado:

De conformidad y en cumplimiento de los requisitos estipulados en el Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad Privada Antenor Orrego y el Reglamento Interno de la Carrera Profesional de Ingeniería Electrónica para obtener el Título Profesional de Ingeniero Electrónico, se pone a vuestra disposición el presente trabajo de tesis titulado: **“ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE UN CONTROLADOR PARA SISTEMAS DE PRIMER ORDEN UTILIZANDO EL MÉTODO DEL DESCENSO DEL GRADIENTE”**

Este trabajo, es el resultado de la aplicación de los conocimientos adquiridos en la formación profesional en la Universidad, excusando anticipadamente de los posibles errores involuntarios cometidos en su desarrollo.

Trujillo, diciembre del 2021

Br. Rivera Bardález, Juan Carlos.

INDICE

INDICE DE CONTENIDO	
AGRADECIMIENTO	1
RESUMEN	2
ABSTRACT	3
PRESENTACIÓN	4
INDICE	5
I. INTRODUCCION	11
1.1. El problema de investigación	11
1.1.1. Realidad Problemática	11
1.1.2. Enunciado del Problema	12
1.1.3. Formulación del problema	12
1.2. Hipótesis	13
1.3. Objetivo de la investigación	13
II. MARCO DE REFERENCIA	14
2.1. Antecedentes	14
2.2. Marco teórico	16
2.2.1. Transformada Z	16
2.2.2. Función de transferencia	18
2.2.3. Microcontrolador 16F877	19
2.3. Marco Conceptual	20
2.3.1. Descenso del gradiente	20

2.4.	Operacionalización de Variables	21
III.	METODOLOGIA	23
3.1.	Material.....	23
3.2.	Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos	23
3.2.1.	Determinación del algoritmo para el control Adaptativo.	23
3.2.2.	Circuito de prueba.....	25
3.2.3.	Programa del microcontrolador.	26
3.2.4.	Toma de datos	28
3.2.5.	Implementación del controlador adaptativo con un control de velocidad. 41	
IV.	ANÁLISIS DE DATOS.....	47
V.	RESULTADOS.....	52
VI.	CONCLUSIONES.....	55
VII.	RECOMENDACIONES.....	56
VIII.	BIBLIOGRAFIA.....	57

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Transformada Z.....	18
Figura 2. PIC16F877	19
Figura 3. Función con máximo y mínimo Local.....	21
Figura 4. Sistema Realimentado con controlador Integral	23
Figura 5. Circuito de Prueba realizado en Proteus.....	25
Figura 6. Respuesta a una excitación de 3.3v con $T_s=3,0208$ ms.....	29
Figura 7. Respuesta a una excitación de 3.3v con $T_s=4,0448$ ms.....	29
Figura 8. Respuesta a una excitación de 3.3v con $T_s=8,0384$ ms.....	30
Figura 9. Respuesta a una excitación de 3.3v con $T_s=10,0352$ ms.....	30
Figura10. Respuesta a una excitación de 3.3v con $T_s=3,0208$ ms.....	31
Figura 11. Respuesta a una excitación de 3.3v con $T_s=34,0448$ ms.....	31
Figura 12. Respuesta a una excitación de 3.3v con $T_s=8,0384$ ms.....	32
Figura 13. Respuesta a una excitación de 3.3v con $T_s=10.0352$ ms.....	32
Figura 14. Respuesta a una excitación de 3.3v con $T_s=3,0208$ ms.....	33
Figura 15. Respuesta a una excitación de 3.3v con $T_s=3,0208$ ms.....	33
Figura 16. Respuesta a una excitación de 3.3v con $T_s=8,0384$ ms.....	34
Figura 17. Respuesta a una excitación de 3.3v con $T_s=10.0352$ ms.....	34
Figura 18. Respuesta a una excitación de 3.3v con $T_s=3,0208$ ms.....	35
Figura 19. Respuesta a una excitación de 3.3v con $T_s=4,0448$ ms.....	35
Figura 26. Respuesta a una excitación de 3.3v con $T_s=3,0208$ ms.....	39

Figura 27. Respuesta a una excitación de 3.3v con $T_s=4,0448$ ms.....	39
Figura 28. Respuesta a una excitación de 3.3v con $T_s=8,0384$ ms.....	40
Figura 29. Respuesta a una excitación de 3.3v con $T_s=10.0352$ ms.....	40
Figura 30. Datos del motor DC de Proteus.	41
Figura 31. Circuito de Prueba del control de motor.....	43
Figura 32. Respuesta a una excitación de 3,3v con $T_s=10.0352$ m,.....	43
Figura 33. Respuesta a una excitación de 3,3v con $T_s=8,0384$ ms.....	44
Figura 34. Respuesta a una excitación de 3,3v con $T_s=4,0448$ ms.....	45
Figura 35. Respuesta a una excitación de 3,3v con $T_s=3,0208$ ms.....	45
Figura 36. Tiempo de duración de la Rutina del controlador.....	47
Figura 37. Grafica del polo dominante en función del tiempo de muestreo .	48
Figura 38. Grafica del Tiempo de establecimiento en función del tiempo de muestreo para polo en $s=-3,3$	48
Figura 39. Grafica del tiempo de establecimiento en función del tiempo de muestreo para polo en $s=-10$	49
Figura 40. Grafica del tiempo de establecimiento en función del tiempo de muestreo para polo $s=-20$	50
Figura 41. Grafica del tiempo de establecimiento en función del tiempo de muestreo para polo $s=-1$	50
Figura 41. Grafica del tiempo de establecimiento en función del tiempo de muestreo para motor DC.....	51
Figura 42. Grafica del polo dominante en función del tiempo de muestreo .	52

Figura 43. Grafica del Tiempo de establecimiento en función del tiempo de muestreo	53
Figura 44. Grafica del tiempo de establecimiento en función del tiempo de muestreo para motor DC	53
Figura 45. Circuito de Prueba del control adaptativo para controlar velocidad de un motor	54

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Operacionalización de la variable independiente	21
Tabla 2: Operacionalización de la variable dependiente.....	22
Tabla 3: Parámetros obtenidos de la simulación del controlador	47
Tabla 4: Datos del controlador actuando sobre un motor DC.	51

I. INTRODUCCION.

1.1. El problema de investigación.

1.1.1. Realidad Problemática.

Según Ogata (2010, p.2): “Los procesos industriales tienen una relación entre la entrada y la salida la que es llamada función de transferencia, esta es usada para determinar la estabilidad del proceso y permitir el cálculo del tiempo de establecimiento que es el parámetro crítico en los procesos industriales”. Por consiguiente, esta función de transferencia se puede calcular de forma teórica modelando la planta mediante ecuaciones diferenciales y luego pasando este sistema dinámico al plano de Laplace, esto permite al diseñador incrustar un bloque en serie con la función de transferencia para que se mejore su tiempo de respuesta, este bloque por lo general es llamado controlador de acción Proporcional, Integral y Derivativo (PID).

Realizar la sintonía de estos controladores es tediosa debido a que se desconoce por lo general el modelo de la planta, los métodos tradicionales como el de ensayo y error por lo general no llevan a una sintonización correcta y terminan logrando una estabilización relativamente aceptable; El método de Ziegler y Nichols permite la sintonía del controlador de forma experimental, pero se tiene que captar la curva de respuesta del sistema a un escalón y esto por lo general no se admite en las empresas para la sintonía del controlador ya que esto podría dañar al proceso si no se usa de manera adecuada. Una manera de realizar esta tarea es mediante

el uso de un controlador adaptativo, el cual permite variar sus parámetros para lograr minimizar el error en la variable de proceso, existen varios métodos para ello, uno de estos es el método del descenso del gradiente.

El **método del descenso del gradiente** es un algoritmo de optimización que permite converger hacia el valor mínimo de una función mediante un proceso iterativo. En aprendizaje automático básicamente se utiliza para minimizar una función que mide el error de predicción del modelo en el conjunto de datos (Analyticslane,2018). En los sistemas realimentados las plantas generalmente son de primer orden y el objetivo de los controladores es minimizar el error que se genera entre el setpoint y la variable de proceso. Se ha realizado una pesquisa sobre la utilización de este método en los sistemas realimentados de primer y segundo orden y no se ha hallado información sobre su uso, posiblemente debido a la gran complejidad que requiere su implementación en este tipo de sistemas y que no justifican su uso, o debido a que estos no logran minimizar el error en este tipo de sistemas.

1.1.2. Enunciado del Problema.

El problema radica en el desconocimiento del comportamiento del método del descenso del gradiente en sistemas realimentados con plantas de primer orden

1.1.3. Formulación del problema.

¿Cuál es el comportamiento de un controlador adaptativo que usa el método del descenso del gradiente en sistemas de primer orden?

1.2. Hipótesis.

El Estudio del comportamiento de un controlador adaptativo que usa el método del descenso del gradiente en sistemas de primer orden permitirá determinar las ventajas y desventajas de su aplicación en los sistemas realimentados.

1.3. Objetivo de la investigación.

1.3.1. Objetivo General.

Describir el comportamiento de un controlador adaptativo que utiliza el método del descenso del gradiente en sistemas de primer orden.

1.3.2. Objetivos específicos.

- Describir el método del descenso del gradiente.
- Determinar las ecuaciones que permitan la implementación del método del descenso del gradiente para controlar sistemas de primer orden.
- Determinar el polo Dominante que genera el Controlador.
- Medir el tiempo de establecimiento.

II. MARCO DE REFERENCIA

2.1. Antecedentes.

Para validar esta investigación, se presenta los antecedentes de diversos estudios con referencia a la identificación de procesos, encontrados en tesis de grado de universidades nacionales y/o internacionales.

Según Lazo (2016), en su tesis titulada “**implementación de un controlador adaptativo por modelo de referencia para sistemas de segundo orden**” presenta la implementación de un control adaptativo por modelo de referencia para una planta de segundo orden, usando como plataforma un PLC.

Aporte. Muestra una técnica para implementar un control adaptativo por modelo de referencia en la plataforma digital (PLC)

Según Lima (2015), en su investigación titulada “**Implementación de control PID para un esterilizador a calor seco con microcontrolador PIC**”; La tesis consiste en la Implementación de un control PID en un microcontrolador PIC para un esterilizador de calor seco. El diseño contempla una interfaz de usuario para poder configurar la temperatura de esterilización, según la cual el sistema regula la temperatura mediante el control PID digital y control de potencia por PWM usando como actuador una resistencia calefactora de 700 vatios y como sensor de realimentación una termocupla tipo J, además controla el tiempo de esterilizado que también es configurable.

Aporte. nos presenta la forma de la implementación de un controlador en microcontroladores PIC, la cual es necesaria ya que el método del descenso del gradiente se implementará en un microcontrolador

Según Vivanco (2013), en su investigación titulada **“ANÁLISIS DE SISTEMAS DE CONTROL DE PRIMER Y SEGUNDO ORDEN USANDO LENGUAJES DE PROGRAMACIÓN MATLAB-SIMULINK”**, desarrolla un estudio minucioso de los controles automáticos dinámicos, empezando su análisis manifestando la relevancia del modelado matemático con lazos de control y la adecuación para su simulación en Matlab o Simulink. Vivanco, parte del estudio y análisis del comportamiento de los controles automáticos dinámicos y expone la importancia del manejo de esta competencia para mejorar la eficiencia y productividad en el sector industrial.

Aporte. Nos permite predecir el comportamiento de los sistemas realimentados de primer orden y así poder obtener la función de coste a minimizar.

Según Millán (2012), en su trabajo, **“Estudio y comparativa de diferentes algoritmos adaptativos para la identificación de sistemas”**, expone una búsqueda y clasificación de diversos algoritmos adaptativos usados en la identificación de sistemas en los que se desconozca su respuesta impulsional. En el desarrollo de su proyecto, propone la comparativa de eficiencia y rapidez de convergencia recogida de los resultados conseguidos.

Aporte. Nos da una idea de cómo determinar los parámetros que se usaran en el método del descenso del gradiente para minimizar el error.

2.2. Marco teórico.

2.2.1. Transformada Z

Según Ogata (1996, p. 142): “es una herramienta matemática muy utilizada en el análisis y la síntesis de sistemas de control en tiempo discreto es la transformada z. El papel de la transformada z en sistemas en tiempo discreto es similar al de la transformada de Laplace en sistemas en tiempo continuo”.

Por consiguiente, “el método de la transformada Z es un método operacional muy poderoso cuando se trabaja con sistemas en tiempo discreto” (Ogata, 1996, p. 143).

A continuación, se definirá la transformada Z de una función del tiempo o de una secuencia de números.

Al considerar la transformada Z de una función del tiempo $x(t)$, solo se toman en cuenta los valores muestreados de $x(t)$, esto es, $x(0)$, $x(T)$, $x(2T)$,..., donde T es el periodo de muestreo. La transformada Z de una función del tiempo $x(t)$, donde t es positivo, o de la secuencia de valores $x(kT)$, donde k adopta valores de cero o de enteros positivos y T es el periodo de muestreo, se define mediante la siguiente ecuación:

$$X(z) = Z[x(t)] = Z[x(kT)] = \sum_{k=0}^{\infty} x(kT)z^{-k} \quad ec. (2)$$

Para la mayoría de aplicaciones en ingeniería, la transformada Z unilateral (2) tendrá una solución apropiada en forma cerrada en su región de convergencia. Observe que cuando $X(z)$, una serie infinita en z^{-1} , converge fuera del círculo $|z| = R$, donde R se conoce como radio de convergencia absoluta. Al utilizar el método de la

transformada z para resolver problemas en tiempo discreto no es necesario especificar los valores de z para los cuales $X(z)$ converge. Por lo tanto, se observa que la ecuación (3) da como resultado:

$$X(z) = x(0) + x(T)z^{-1} + x(2T)z^{-2} + \dots + x(kT)z^{-k} + \dots \quad \text{ec. (3)}$$

La ecuación (3) implica que la transformada z de cualquier función en tiempo continuo $x(t)$, puede escribirse mediante inspección, en la forma de una serie. La z^{-k} en esta serie indica la posición en el tiempo en la que se presenta la amplitud $x(kT)$. De manera contraria, si $X(z)$ está dada en la forma de una serie como la que se indicó, la transformada z inversa se puede obtener por inspección como una secuencia de la función $x(kT)$ que corresponde a los valores de $x(t)$ en los valores de tiempo respectivos.

Si la transformada está dada como el cociente de dos polinomios en Z , entonces la transformada Z inversa se puede obtener mediante varios métodos diferentes, tales como el método de la división directa, el método computacional, el método de expansión de fracciones parciales y el método de la integral de inversión.

Transformada de Laplace	Función del tiempo $f(t)$	Transformada z
1	Impulso unitario $\delta(t)$	1
$\frac{1}{s}$	Escalón unitario $u_c(t)$	$\frac{z}{z-1}$
$\frac{1}{1-e^{-Ts}}$	$\delta_c(t) = \sum_{n=0}^{\infty} \delta(t-nT)$	$\frac{z}{z-1}$
$\frac{1}{s^2}$	t	$\frac{Tz}{(z-1)^2}$
$\frac{1}{s^3}$	$\frac{t^2}{2}$	$\frac{T^2z(z+1)}{2(z-1)^3}$
$\frac{1}{s^{n+1}}$	$\frac{t^n}{n!}$	$\lim_{\alpha \rightarrow 0} \frac{(-1)^n}{n!} \frac{\partial^n}{\partial \alpha^n} \left[\frac{z}{z-e^{-\alpha T}} \right]$
$\frac{1}{s+\alpha}$	$e^{-\alpha t}$	$\frac{z}{z-e^{-\alpha T}}$
$\frac{1}{(s+\alpha)^2}$	$te^{-\alpha t}$	$\frac{Tze^{-\alpha T}}{(z-e^{-\alpha T})^2}$
$\frac{\alpha}{s(s+\alpha)}$	$1-e^{-\alpha t}$	$\frac{(1-e^{-\alpha T})z}{(z-1)(z-e^{-\alpha T})}$
$\frac{\omega}{s^2+\omega^2}$	$\text{sen } \omega t$	$\frac{z \text{ sen } \omega T}{z^2 - 2z \cos \omega T + 1}$
$\frac{\omega}{(s+\alpha)^2+\omega^2}$	$e^{-\alpha t} \text{ sen } \omega t$	$\frac{ze^{-\alpha T} \text{ sen } \omega T}{z^2 - 2ze^{-\alpha T} \cos \omega T + e^{-2\alpha T}}$
$\frac{s}{s^2+\omega^2}$	$\text{cos } \omega t$	$\frac{z(z-\cos \omega T)}{z^2 - 2z \cos \omega T + 1}$
$\frac{s+\alpha}{(s+\alpha)^2+\omega^2}$	$e^{-\alpha t} \text{ cos } \omega t$	$\frac{z^2 - ze^{-\alpha T} \cos \omega T}{z^2 - 2ze^{-\alpha T} \cos \omega T + e^{-2\alpha T}}$

Figura 1: Transformada Z
Fuente: Katsuhiko Ogata

2.2.2. Función de transferencia

Según Valdivia (2012, p. 36): “La función de transferencia de un sistema lineal invariante con el tiempo se define como la transformada de Laplace de la respuesta al impulso, con todas las condiciones iniciales iguales a cero”.

Suponga que $G(s)$ denota la función de transferencia de un sistema con una entrada y una salida, con una entrada $u(t)$ y salida $y(t)$ y

respuesta del impulso $g(t)$. Entonces la función de transferencia $G(s)$ se define como:

$$G(s) = L[g(t)] \dots\dots ec. (4)$$

La función de transferencia $G(s)$ se relaciona con la transformada de Laplace de la entrada y la salida a través de la siguiente relación:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} \dots\dots\dots ec. (5)$$

2.2.3. Microcontrolador 16F877

El PIC16F877, es un microcontrolador de la familia de Microchip de gama media que tiene entre sus principales características.

- Módulo Analógico
- Módulo de comunicación serial Síncrona y asíncrona
- Módulo PWM
- 5 puertos digitales
- Frecuencia de trabajo máximo 20Mhz

En la gráfica siguiente mostramos el Pin-Out del PIC 16F877 (ver figura 1)

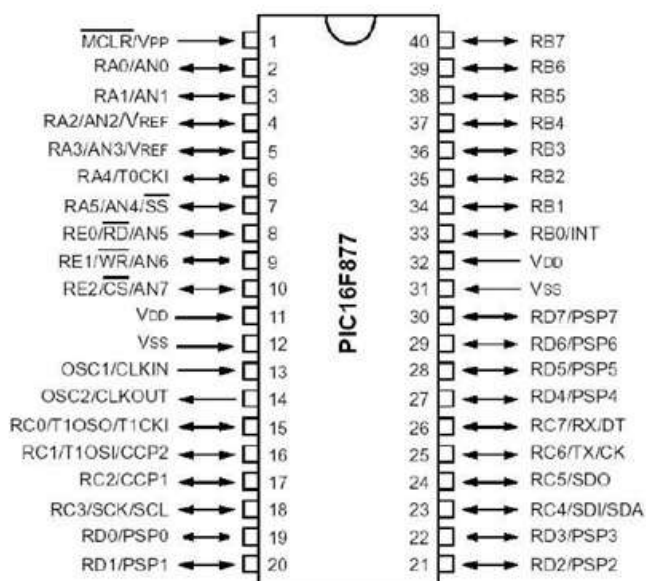


Figura 2. PIC16F877

Fuente: hoja de datos PIC16F877 – MICROCHIP

2.3. Marco Conceptual

2.3.1. Descenso del gradiente.

Este método se basa en la teoría matemática de la derivada direccional, sabemos por matemática de pre grado que el gradiente es la máxima derivada direccional, en otras palabras, el gradiente indica la dirección en la que se debe desplazar para aumentar el valor de la función

$$\vec{\nabla}f = \text{Max}\{D_{\vec{u}}\}$$
$$\vec{\nabla}f = \frac{\partial f}{\partial x}\vec{i} + \frac{\partial f}{\partial y}\vec{j} + \frac{\partial f}{\partial z}\vec{k}$$

Si nos movemos en la dirección contraria al gradiente, lograremos que ubicarnos en puntos en la cual la función disminuye su valor, a esta estrategia se denomina descenso del gradiente.

Lo interesante es determinar la función que se quiere minimizar y a partir de ella determinar los nuevos valores de las variables involucradas que permitan minimizar a la función.

Se requiere que la función tenga al menos un mínimo para que las variables puedan converger, en la figura 2 se muestra una función con máximo y mínimo local, si nos desplazamos hacia la derecha hasta el punto 1.5 obtendremos el mínimo local de esta función.

Es importante indicar que si tomamos valores del dominio de la función menores a -1,5 esta no determinara el mínimo local.

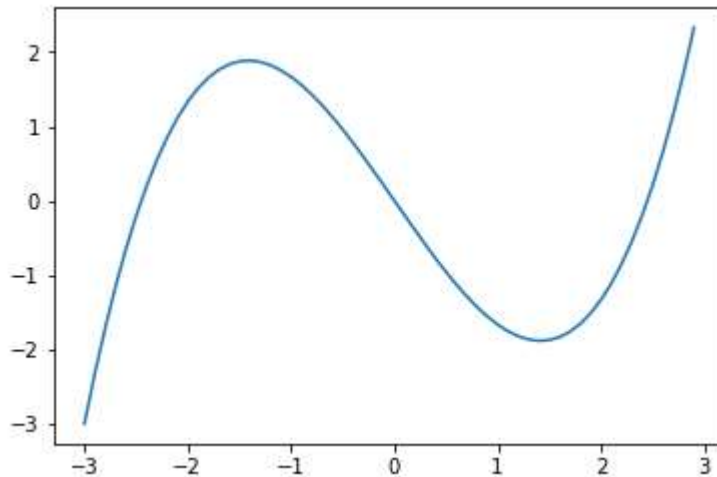


Figura 3. Función con máximo y mínimo Local
Fuente Elaboración propia

2.4. Operacionalización de Variables

Variable independiente: Método Descenso del Gradiente

Variable dependiente: Comportamiento en Sistemas de primer orden

Operacionalización de Variables

Tabla 1: Operacionalización de la variable independiente

VARIABLE	DEFINICION CONCEPTUAL	INDICADORES	TIPO	TÉCNICA	INSTRUMENTO
Método Descenso del Gradiente	Controlador que adapta sus parámetros al sistema para minimizar una función de coste	Factor de convergencia	Escalar	Observación	Reporte de simulación
		Variables a modificar	Escalar	Observación	Reporte de simulación

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Tabla 2: Operacionalización de la variable dependiente

VARIABLE	DEFINICION CONCEPTUAL	INDICADORES	TIPO	TÉCNICA	INSTRUMENTO
Comportamiento del controlador en Sistemas de primer orden	Error generado entre la variable de proceso y su consigna	Error Porcentual	Escalar	Observación	Reporte de simulación
		Tiempo de establecimiento	Segundos	Observación	

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

III. METODOLOGIA

3.1. Material

3.1.1. Población

Sistemas de primer orden

3.1.2. Muestra

Sistemas de primer orden

3.1.3. Métodos

3.1.3.1. Diseño de Contrastación

$$G \rightarrow X \rightarrow O$$

X: proceso a controlar.

G: controlador adaptativo.

O: respuesta en el tiempo de la variable controlada.

3.2. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

3.2.1. Determinación del algoritmo para el control Adaptativo.

Sea el siguiente sistema realimentado conformado por un controlador de tipo Proporcional e integral como se muestra en la figura 4.



Figura 4. Sistema Realimentado con controlador Integral
Fuente Elaboración propia

Calculamos el error del sistema realimentado de la figura 4

$$Error = S_p - Error \left(\frac{K_i F(s)}{s} \right) G(s) \quad (1)$$

$$Error = \frac{S_p}{1 + \left(\frac{K_i F(s)}{s} \right) G(s)} \quad (2)$$

Se realiza la derivación parcial del error con respecto a K_i

$$\frac{\partial Error(s)}{\partial K_i} = - \frac{S_p}{\left[1 + \frac{K_i F(s)}{s} G(s) \right]^2} \frac{F(s)G(s)}{s}$$

$$\frac{\partial Error(s)}{\partial K_i} = - \frac{(Error)^2 F(s)G(s)}{S_p s} \quad (3)$$

Se despeja el denominador de la ecuación 2.

$$1 + \left(\frac{K_i F(s)}{s} \right) G(s) = \frac{S_p}{Error}$$

Reemplazando $Error = S_p - V_p$ en la ecuación anterior se obtiene.

$$\left(\frac{K_i F(s)}{s} \right) G(s) = \frac{S_p}{S_p - V_p} - 1 = \frac{V_p}{Error}$$

Despejando.

$$\frac{F(s)G(s)}{s} = \frac{V_p}{Error K_i}$$

Reemplazamos la ecuación anterior en la ecuación 3

$$\frac{\partial Error(s)}{\partial K_i} = - \frac{(Error)^2 V_p}{S_p Error K_i}$$

Obtenemos la derivada parcial del error con respecto a K_i dicho de otra manera el gradiente del error en la dirección K_i

$$\frac{\partial Error(s)}{\partial K_i} = - \frac{Error V_p}{S_p K_i}$$

Por el método del descenso del gradiente debemos movernos en dirección contraria al gradiente para minimizar la función.

Por lo tanto, el cálculo de la constante integral tendrá la siguiente ecuación.

$$K_{ifinal} = K_{iinicial} + \beta_i \frac{Error}{S_p} \frac{V_p}{K_{iinicial}}$$

Si adicionamos al controlador una acción proporcional se tendrá de manera similar

$$K_{pfinal} = K_{pinicial} + \beta_p \frac{Error}{S_p} \frac{V_p}{K_{pinicial}}$$

Probaremos este algoritmo en un microcontrolador PIC16F877

3.2.2. Circuito de prueba.

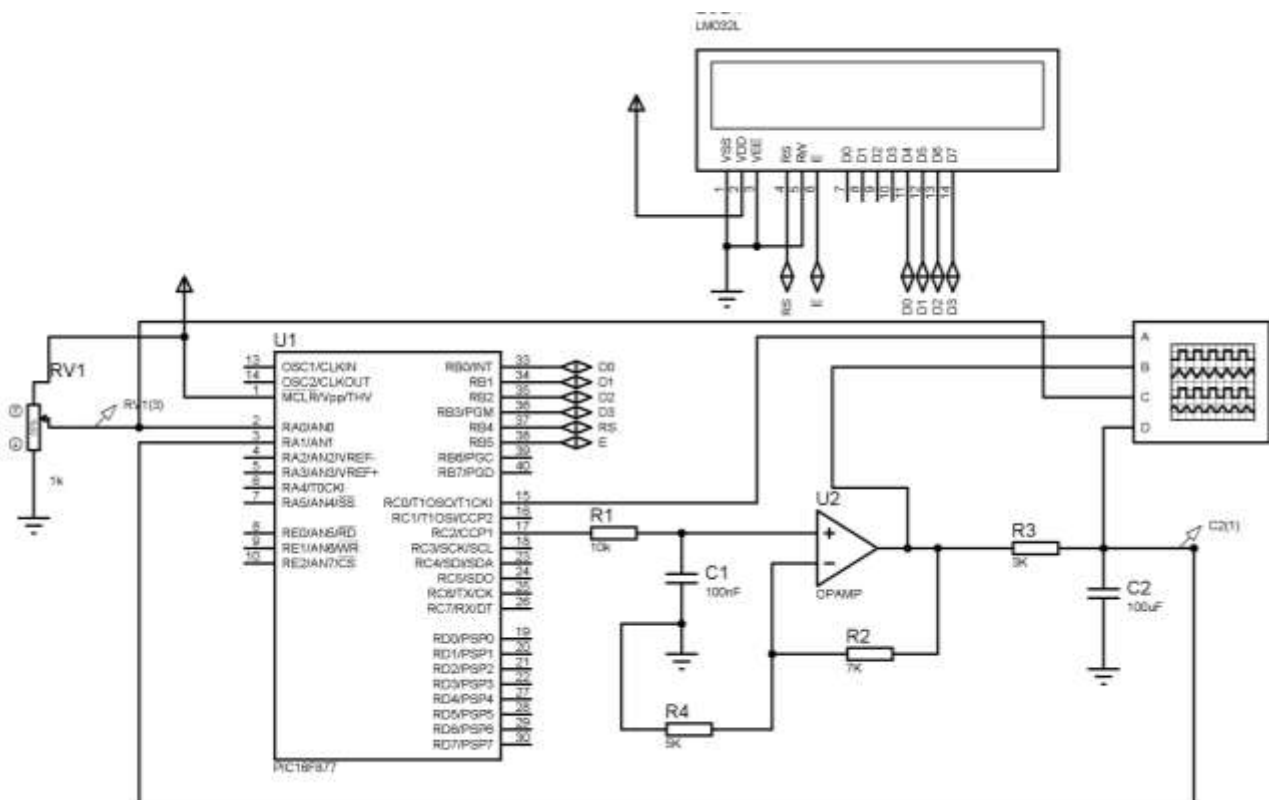


Figura 5. Circuito de Prueba realizado en Proteus

Fuente Elaboración propia

El polo del sistema de primer orden se encuentra determinado por valores de R3 y C2

$$F(s) = \frac{\frac{1}{R_3 C_2}}{s + \frac{1}{R_3 C_2}}$$

$$F(s) = \frac{\frac{10}{3}}{s + \frac{10}{3}}$$

Como la realimentación es unitaria $G(s) = 1$

El circuito conformado por R1, R4, R2 y C1 permiten la salida del controlador con una amplitud máxima de 12 voltios.

3.2.3. Programa del microcontrolador.

```
Device=16F877
EData 10
Xtal 20
Declare Adin_Res = 10 ' 10-bit result required
Declare Adin_Tad = FRC ' RC OSC chosen
Declare Adin_Stime = 50
Declare Hserial_Baud = 9600 ' Set baud rate to 9600
Declare Hserial_RCSTA = %10010000 ' Enable continuous receive
Declare Hserial_TXSTA = %00100000 ' Enable transmit and
asynchronous mode
Declare Hserial_Clear = On
Declare CCP1_Pin PORTC.2
Declare CCP2_Pin PORTC.1
Declare LCD_DTPin PORTB.0
Declare LCD_ENPin PORTB.5
Declare LCD_RSPin PORTB.4
Declare LCD_Interface 4
Declare LCD_Lines 2
On_Hardware_Interrupt GoTo salta
INTCON=$A0
OPTION_REG=7
ADCON1 = $80
TRISA=7
```

```

TRISD=$00
TRISC.5=1
TRISC.0=0
Dim x As Word
Dim y As Word
Dim SP As Float
Dim VP As Float
Dim EROR0 As Float
Dim EROR1 As Float
Dim KI0 As Float
Dim KI1 As Float
Dim CI0 As Float
Dim CI1 As Float
Dim KP0 As Float
Dim KP1 As Float
Dim PI As Float
Dim Ts As 0.0100352
Dim ALFAI As 0.1
Dim ALFAP As 0.1
Dim I As Byte
KI0=1
KP0=1
EROR0=0
CI0=0
INICIO:
    Print At 1,1,Dec KI0," ",At 1,10,Dec EROR0," "
    Print At 2,1,Dec CI1," ",At 2,8,Dec I," ",Dec KP0," "
GoTo INICIO
salta:
Context Save
    PORTC.0=1
    INTCON=$A0
    TMR0=197' (256-x)256/5=tiempo de muestreo en Us
197=3.0208ms

```

```

x=ADIn 0
y=ADIn 1
SP=x*5/1023
VP=y*5/1023
EROR1=EROR0
KI1=KI0
KP1=KP0 'NUEVO
EROR0=SP-VP
CI1=KI0*Ts*EROR1
CI0=CI0+CI1
PI=CI0+KP0*EROR0 'NUEVO
KI0=KI1+ALFAI*eror0*VP/(SP*KI1)
KP0=KP1+ALFAP*eror0*VP/(SP*KP1) 'NUEVO
If KI0<90 Then KI0=90
If KP0<90 Then KP0=90
If CI0>253 Then CI0=253
If CI0<0 Then CI0=0
If PI>253 Then PI=253 'NUEVO
If PI<0 Then PI=0 'NUEVO
I=PI
I=PI
HPWM 1,I,20000
PORTD=I
PORTC.0=0
Context Restore

```

3.2.4. Toma de datos

A. $.Sp=3.3v$ $R = 3k$ $C = 100\mu F$ $\beta_i = \beta_p = 0.1$

$$F(s) = \frac{\frac{10}{3}}{s + \frac{10}{3}}$$

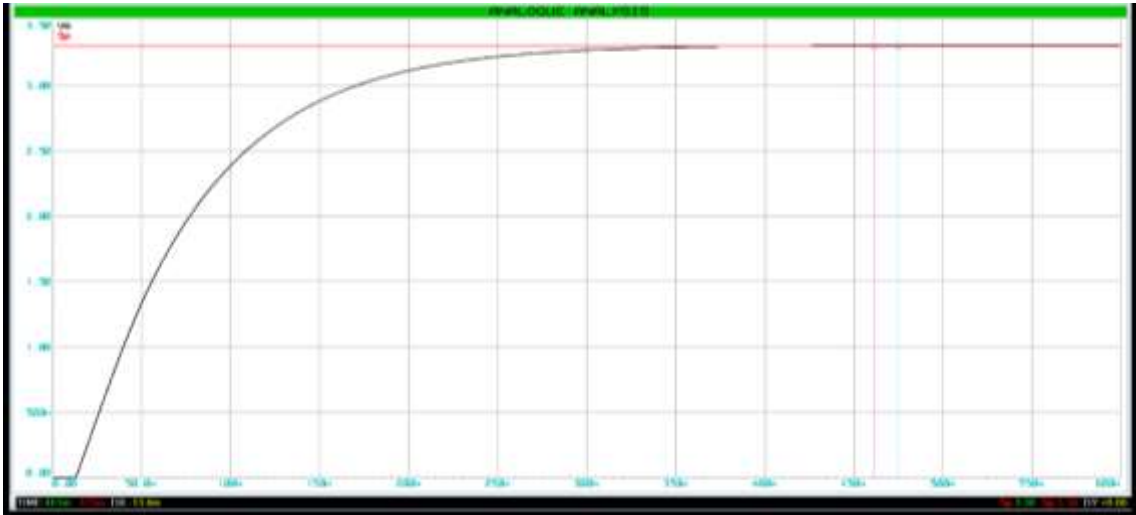


Figura 6. Respuesta a una excitación de 3.3v con $T_s=3.0208$ ms.
Fuente Elaboración propia

Tiempo de establecimiento 370 ms, Tiempo de muestreo 3.0208 ms

polo dominante en $Polo = -\frac{5}{0.37} = -13.5$

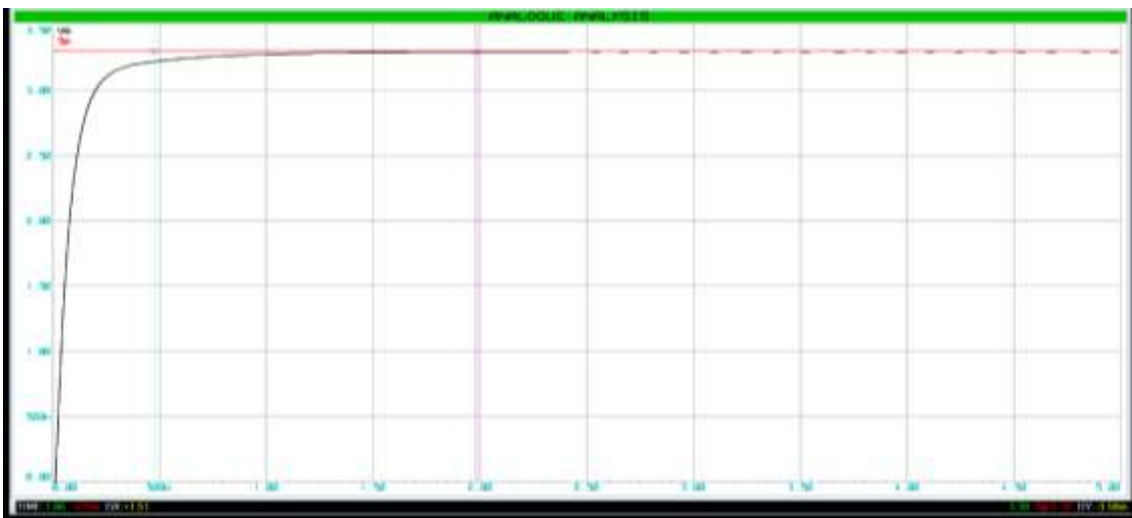


Figura 7. Respuesta a una excitación de 3.3v con $T_s=4.0448$ ms.
Fuente Elaboración propia

Tiempo de establecimiento 2s, Tiempo de muestreo 4.0448 ms

polo dominante en $Polo = -\frac{5}{2} = -2.5$

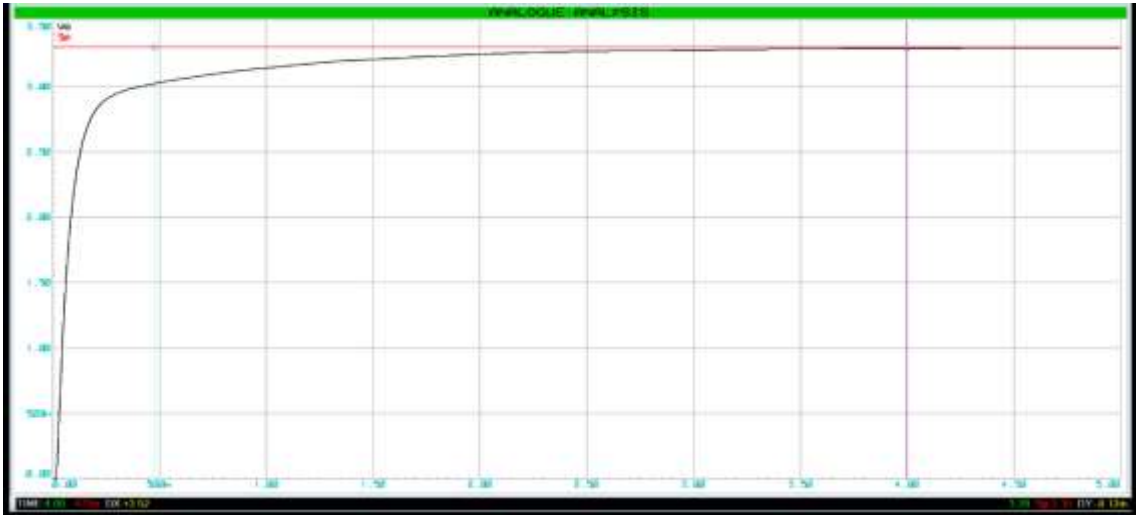


Figura 8. Respuesta a una excitación de 3.3v con $T_s=8.0384$ ms.
Fuente Elaboración propia

Tiempo de establecimiento 4s, Tiempo de muestreo 8.0384 ms polo dominante en $Polo = -\frac{5}{4} = -1.25$



Figura 9. Respuesta a una excitación de 3.3v con $T_s=10,0352$ ms.
Fuente Elaboración propia

Tiempo de establecimiento 5.5s, Tiempo de muestreo 10.0352ms polo dominante en $Polo = -\frac{5}{5.5} = -0.909$

B. $V_{sp}=3.3v$ $R = 1k$ y $C = 100\mu F$ $\beta_i = \beta_p = 0.1$

$$F(s) = \frac{10}{s + 10}$$



Figura 10. Respuesta a una excitación de 3.3v con $T_s=3,0208$ ms.

Fuente Elaboración propia

Tiempo de establecimiento 1.67s, Tiempo de muestreo 3.0208ms

polo dominante en $Polo = -\frac{5}{1.67} = -2.99$

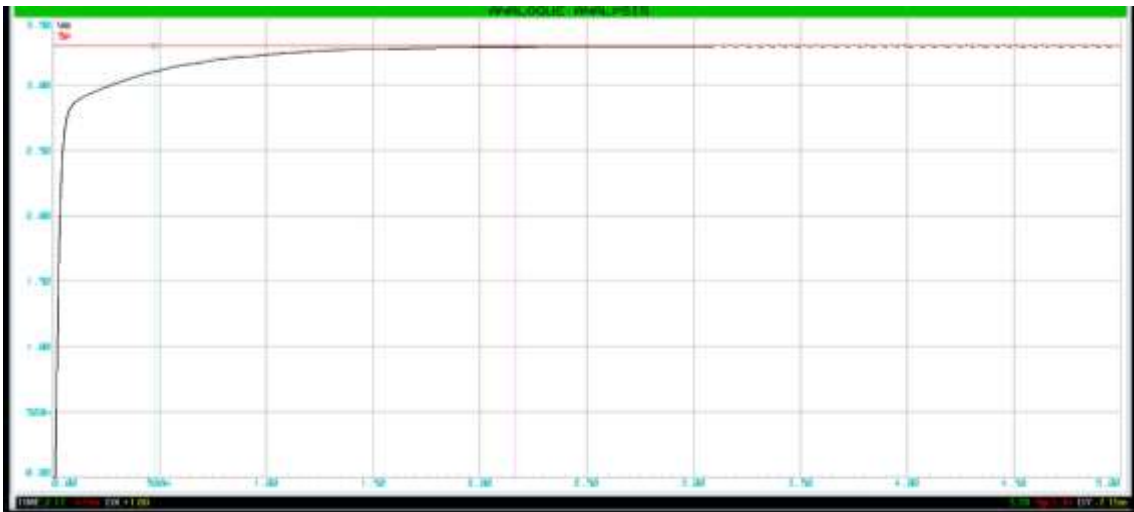


Figura 11. Respuesta a una excitación de 3.3v con $T_s=34.0448$ ms.

Fuente Elaboración propia

Tiempo de establecimiento 2.17s, Tiempo de muestreo 4.0448 ms

$$\text{polo dominante en } Polo = -\frac{5}{2.17} = -2.3$$



Figura 12. Respuesta a una excitación de 3.3v con $T_s=8,0384$ ms.

Fuente Elaboración propia

Tiempo de establecimiento 4.5s, Tiempo de muestreo 8.0384ms

$$\text{polo dominante en } Polo = -\frac{5}{4.5} = -1.11$$



Figura 13. Respuesta a una excitación de 3.3v con $T_s=10.0352$ ms.

Fuente Elaboración propia

Tiempo de establecimiento 4.7s, Tiempo de muestreo 10.0352ms

$$\text{polo dominante en } Polo = -\frac{5}{4.7} = -1.0638$$

C. $V_{sp}=3.3v$ $R = 10k$ $C = 100\mu F$ $\beta_i = \beta_p = 0.1$

$$F(s) = \frac{1}{s + 1}$$

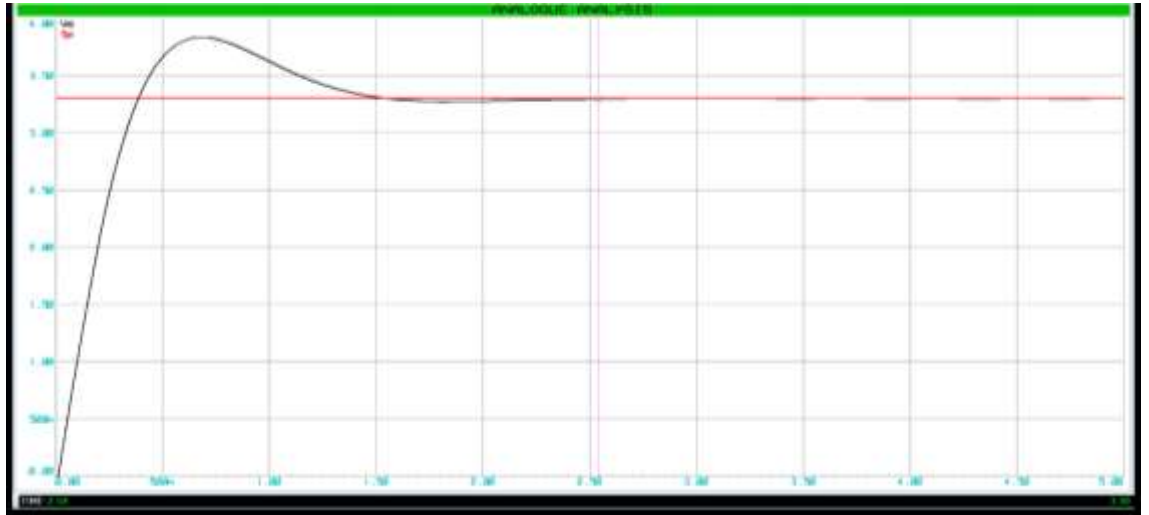


Figura 14. Respuesta a una excitación de 3.3v con $T_s=3,0208$ ms.

Fuente Elaboración propia

Tiempo de establecimiento 2.67s, Tiempo de muestreo 3.0208ms

polo dominante en $Polo = -\frac{5}{2,67} = -1.872$



Figura 15. Respuesta a una excitación de 3.3v con $T_s=3,0208$ ms.

Fuente Elaboración propia

Tiempo de establecimiento 2s, Tiempo de muestreo 4.0448ms

Polo dominante en $Polo = -\frac{5}{2} = -2.5$



Figura 16. Respuesta a una excitación de 3.3v con $T_s=8,0384$ ms.
Fuente Elaboración propia

Tiempo de establecimiento 3.65s, Tiempo de muestreo 8.0384ms

$$\text{Polo dominante en } Polo = -\frac{5}{3.65} = -1.369$$



Figura 17. Respuesta a una excitación de 3.3v con $T_s=10.0352$ ms.
Fuente Elaboración propia

Tiempo de establecimiento 2.69s, Tiempo de muestreo 10.0352 ms

$$\text{Polo dominante en } Polo = -\frac{5}{2.69} = -1.858$$

D. $S_p=3.3v$ $R = 1k$ $C = 50\mu F$ $\beta_i = \beta_p = 0.1$

$$F(s) = \frac{20}{s + 20}$$

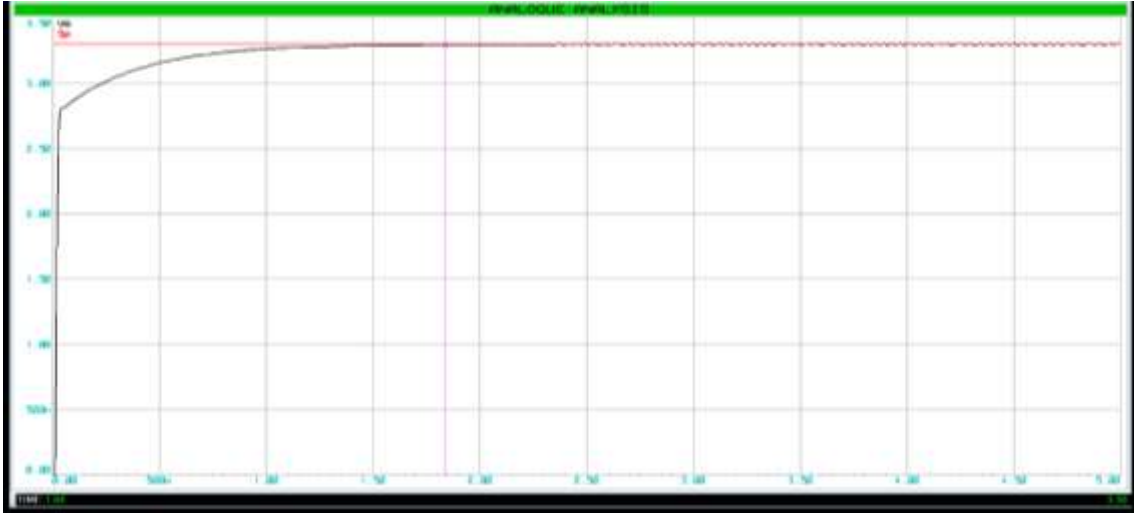


Figura 18. Respuesta a una excitación de 3.3v con $T_s=3,0208$ ms.

Fuente Elaboración propia

Tiempo de establecimiento 1.84s, Tiempo de muestreo 3.0208ms

Polo dominante en $Polo = -\frac{5}{1.84} = -2.717$

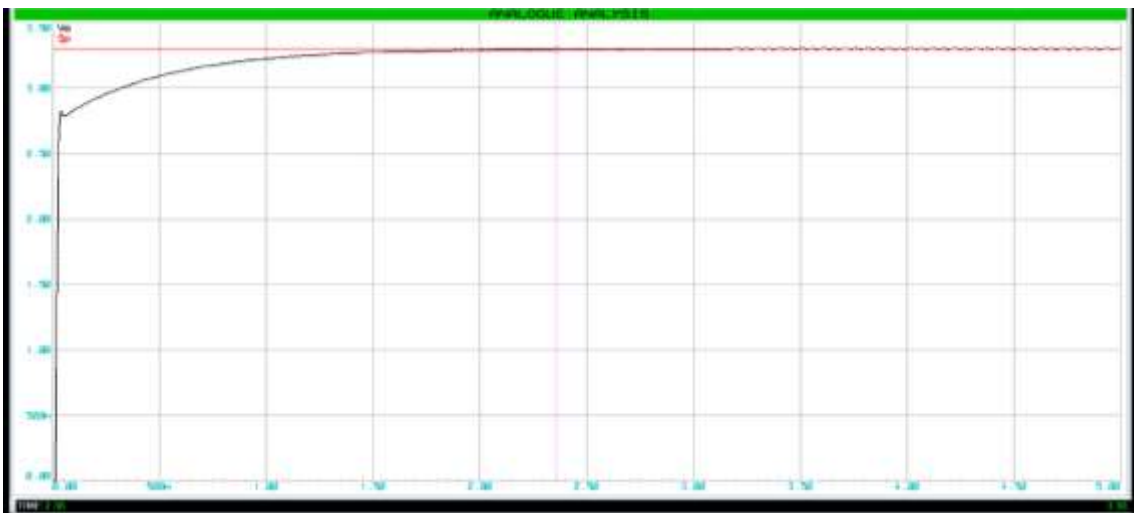


Figura 19. Respuesta a una excitación de 3.3v con $T_s=4,0448$ ms.

Fuente Elaboración propia

Tiempo de establecimiento 2.36s, Tiempo de muestreo 4.0448ms

Polo dominante en $Polo = -\frac{5}{2.36} = -2.119$



Figura 20. Respuesta a una excitación de 3.3v con $T_s=8,0384$ ms.
Fuente Elaboración propia

Tiempo de establecimiento 4.37s, Tiempo de muestreo 8.0384ms

Polo dominante en $Polo = -\frac{5}{4.37} = -1.14$

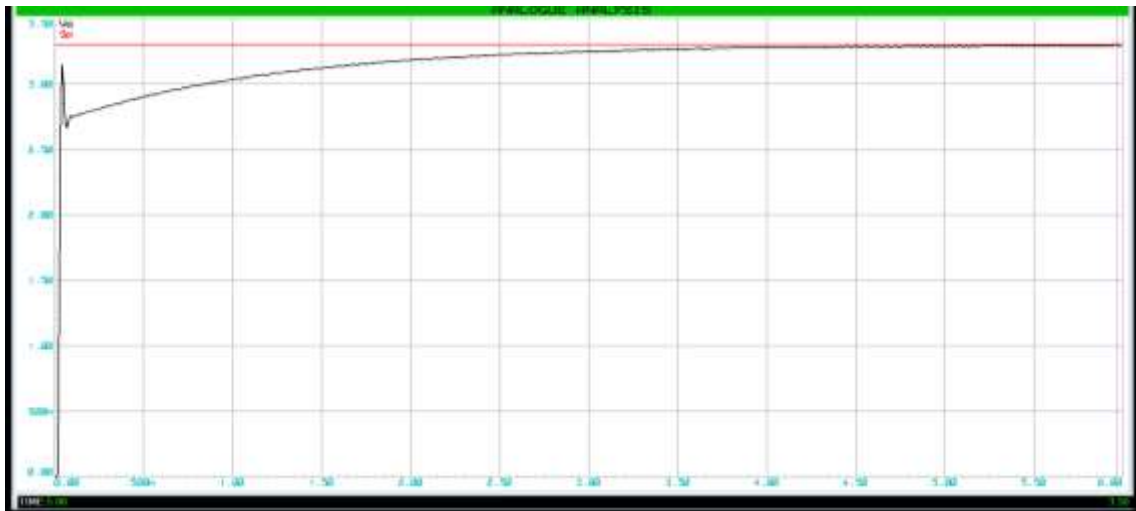


Figura 21. Respuesta a una excitación de 3.3v con $T_s=10,0352$ ms.
Fuente Elaboración propia

Tiempo de establecimiento 5.96s, Tiempo de muestreo 10.0352ms

Polo dominante en $Polo = -\frac{5}{5.96} = -0.839$

E. $V_{sp}=3.3v$ $R = 3k$ $C = 100\mu F$ $\beta_i = \beta_p = 0.01$

$$F(s) = \frac{\frac{10}{3}}{s + \frac{10}{3}}$$

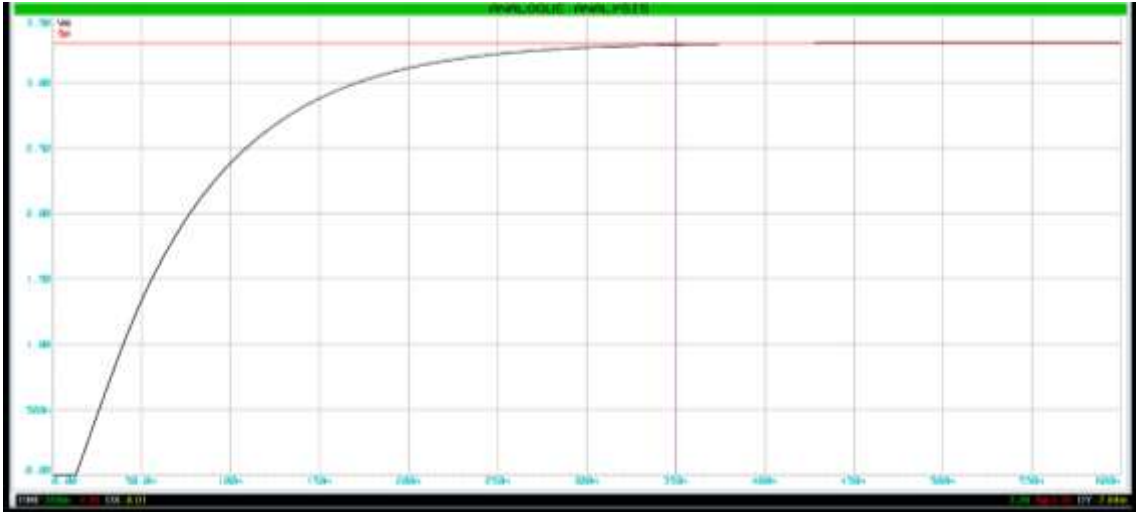


Figura 22. Respuesta a una excitación de 3.3v con $T_s=3,0208$ ms.

Fuente Elaboración propia

Tiempo de establecimiento 370ms, Tiempo de muestreo 3.0208ms

Polo dominante en $Polo = -\frac{5}{0.37} = -13.5$

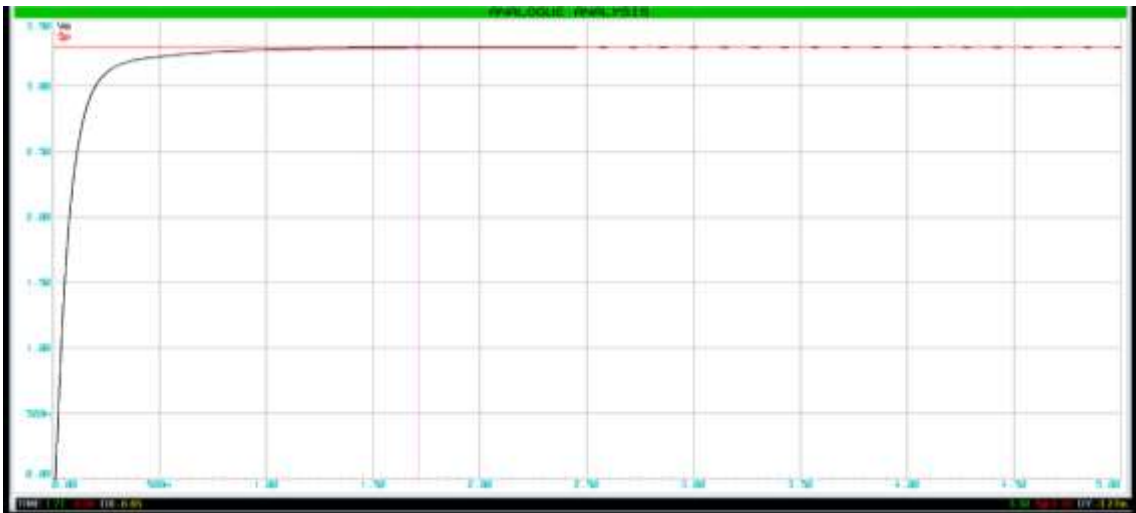


Figura 23. Respuesta a una excitación de 3.3v con $T_s=4,0448$ ms.

Fuente Elaboración propia

Tiempo de establecimiento 2s, Tiempo de muestreo 4.0448ms

Polo dominante en $Polo = -\frac{5}{2} = -2.5$

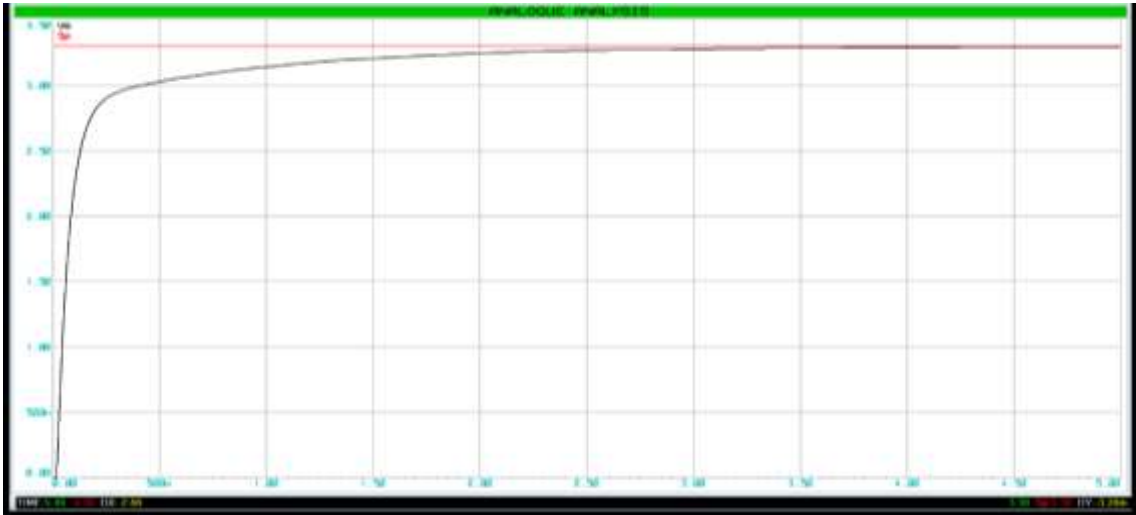


Figura 24. Respuesta a una excitación de 3.3v con $T_s=4,0384$ ms.
Fuente Elaboración propia

Tiempo de establecimiento 4s, Tiempo de muestreo 8.0384ms

Polo dominante en $Polo = -\frac{5}{4} = -1.25$

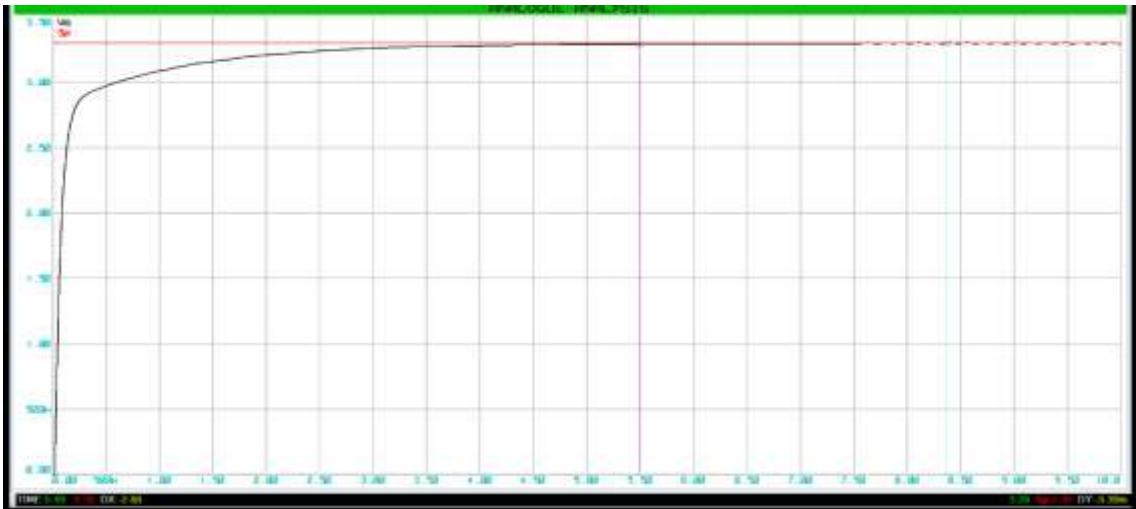


Figura 25. Respuesta a una excitación de 3.3v con $T_s=10,0352$ ms.
Fuente Elaboración propia

Tiempo de establecimiento 5.5s, Tiempo de muestreo 10.0352ms

Polo dominante en $Polo = -\frac{5}{5.5} = -0.909$

F. $V_{sp}=3.3v$ $R = 3k$ $C = 100\mu F$ $\beta_i = \beta_p = 1$

$$F(s) = \frac{\frac{10}{3}}{s + \frac{10}{3}}$$

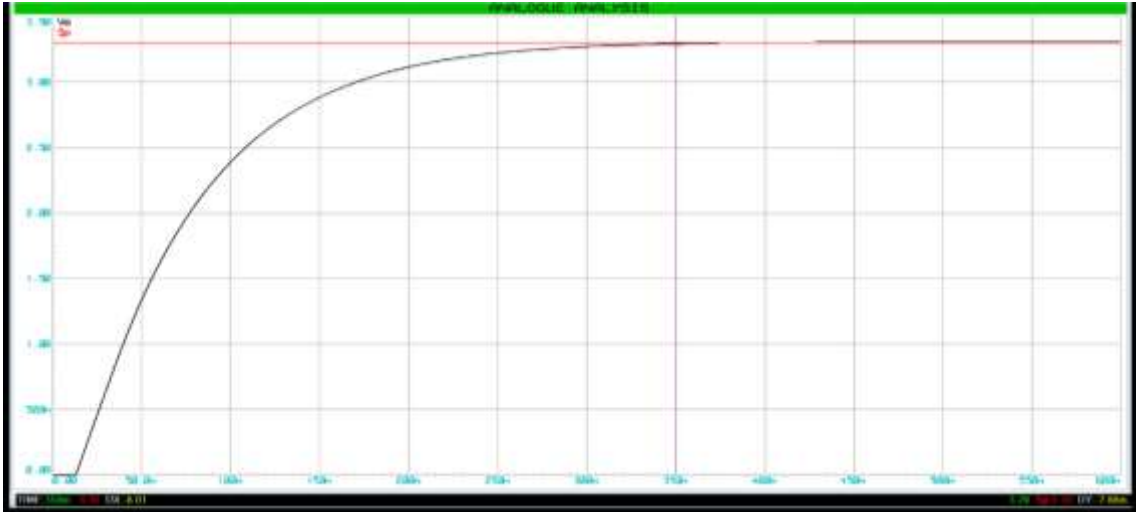


Figura 26. Respuesta a una excitación de 3.3v con $T_s=3,0208$ ms.

Fuente Elaboración propia

Tiempo de establecimiento 370ms, Tiempo de muestreo 3.0208ms

Polo dominante en $Polo = -\frac{5}{0.37} = -13.5$

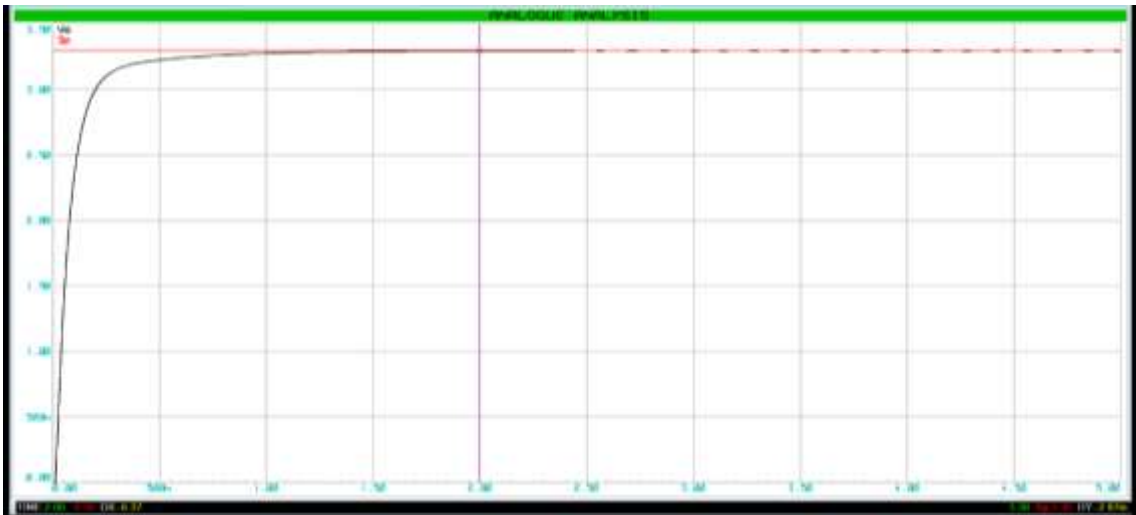


Figura 27. Respuesta a una excitación de 3.3v con $T_s=4,0448$ ms.

Fuente Elaboración propia

Tiempo de establecimiento 2s, Tiempo de muestreo 4.0448ms

Polo dominante en $Polo = -\frac{5}{2} = -2.5$

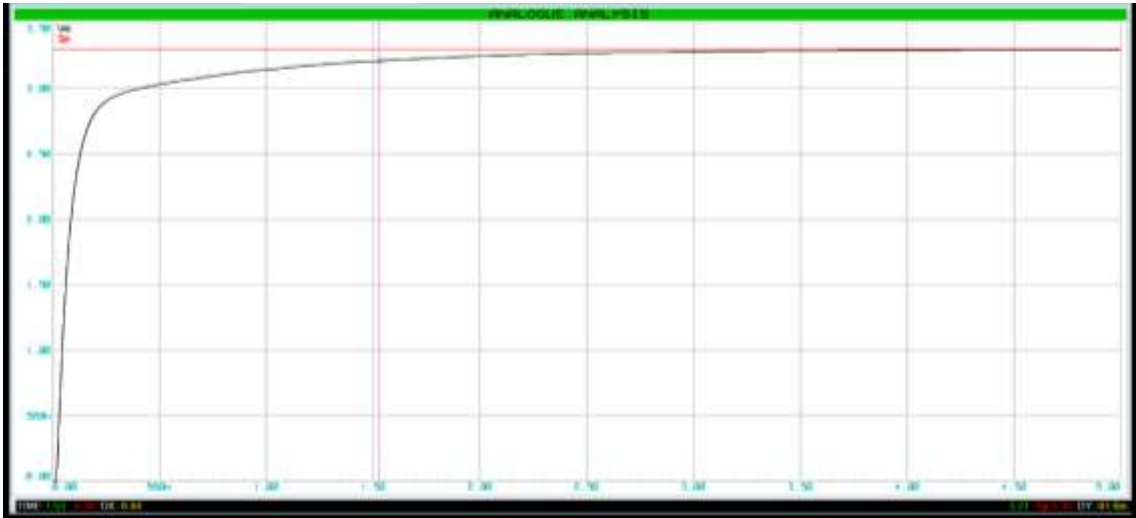


Figura 28. Respuesta a una excitación de 3.3v con $T_s=8,0384$ ms.

Fuente Elaboración propia

Tiempo de establecimiento 4s, Tiempo de muestreo 8.0384ms

Polo dominante en $Polo = -\frac{5}{4} = -1.25$



Figura 29. Respuesta a una excitación de 3.3v con $T_s=10.0352$ ms.

Fuente Elaboración propia

Tiempo de establecimiento 5.5s, Tiempo de muestreo 10.0352ms Polo

dominante en $Polo = -\frac{5}{5.5} = -0.909$

3.2.5. Implementación del controlador adaptativo con un control de velocidad.

3.2.5.1. Datos del motor:

En la figura 30 se observa los datos del motor utilizado en Software de Proteus.

The image shows the 'Edit Component' dialog box in Proteus. The dialog is titled 'Edit Component' and has a question mark icon and a close icon in the top right corner. It contains several input fields and checkboxes for configuring a motor component. The parameters are as follows:

Property	Value	Hide All
Part Reference:		<input type="checkbox"/>
Part Value:		<input type="checkbox"/>
Element:		<input type="checkbox"/>
LISA Model File:	ENCMOTOR	<input type="checkbox"/>
Nominal Voltage:	12V	<input type="checkbox"/>
Coil Resistance:	12	<input type="checkbox"/>
Coil Inductance:	100mH	<input type="checkbox"/>
Zero Load RPM:	360	<input type="checkbox"/>
Load/Max Torque %:	1	<input type="checkbox"/>
Effective Mass:	0.01	<input type="checkbox"/>
Pulses per Revolution:	200	<input type="checkbox"/>

Other Properties:

Exclude from Simulation Attach hierarchy module
 Exclude from PCB Layout Hide common pins
 Exclude from Current Variant Edit all properties as text

Buttons: OK, Help, Hidden Pins, Cancel

Figura 30. Datos del motor DC de Proteus.

Fuente Elaboración propia

3.2.5.2. Circuito sensor de velocidad.

Este circuito está conformado por un Microcontrolador 16F88, y una red RC para extraer el valor de la velocidad en forma analógica esto se muestra en la figura 31. A continuación, se

presenta el Programa del microcontrolador realizado en el software Protón.

```
Device=16F88
EData 10
Xtal 20
Declare CCP1_Pin PORTB.0
T1CON=%00001011 'configura el TMR1 POR B6
TMR1L=0
TMR1H=0
TRISB=$44
Dim X[3] As Word
Dim w[41]As Byte
Dim T As Byte
For T=0 To 40
    w[T]=0
Next T
On_Hardware_Interrupt GoTo salta
INTCON=$A0
OPTION_REG=7
T=0
inicio:

GoTo inicio

salta:
Context Save
PORTB.1=1
INTCON=$A0
TMR0=60 '(256-x)256/5=tiempo de muestreo en Us 10.0352ms
X[1]=0
For T=0 To 38
    w[39-T]=w[38-T]
    X[1]=X[1]+w[39-T]
Next T
w[0]=TMR1L
TMR1L=0
X[1]=X[1]+w[0]
X[2]=X[1]*25/48
HPWM 1,X[2],20000
PORTB.1=0
Context Restore
```

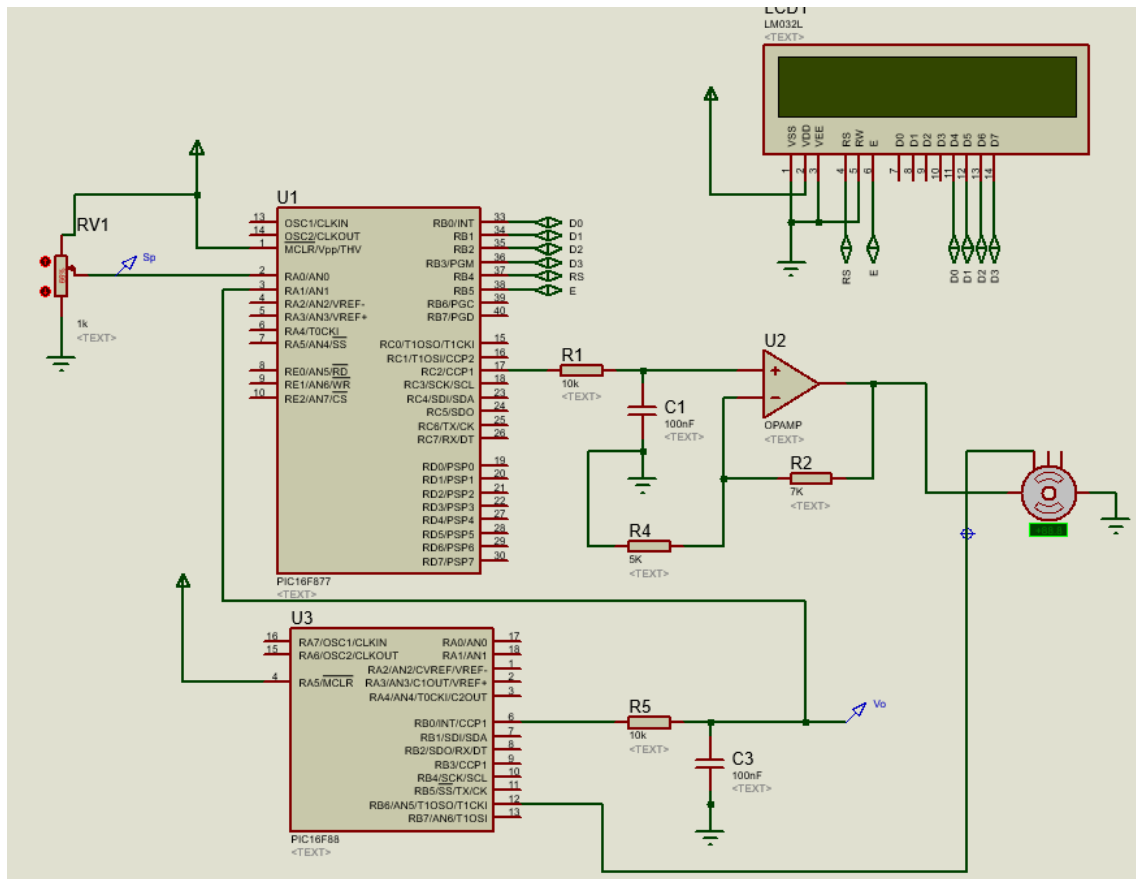


Figura 31. Circuito de Prueba del control de motor
Fuente Elaboración propia

En la figura 32 se muestra el comportamiento del motor en función de tiempo para un tiempo de muestreo de 10,0352ms.

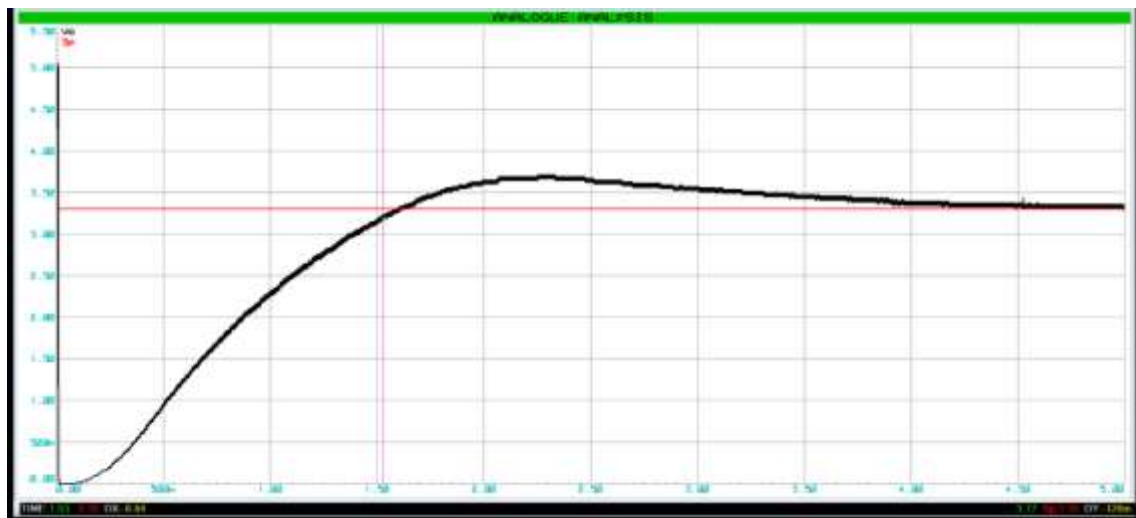


Figura 32. Respuesta a una excitación de 3,3v con $T_s=10.0352$ ms.

Fuente Elaboración propia

Tiempo de establecimiento 5s, Tiempo de muestreo 10.0352 ms polo

dominante en $Polo = -\frac{5}{5} = -1$

En la figura 33 se muestra el comportamiento del motor en función de tiempo para un tiempo de muestreo de 8,0384 ms.



Figura 33. Respuesta a una excitación de 3,3v con $T_s=8,0384$ ms.

Fuente Elaboración propia

Tiempo de establecimiento 4,3s, Tiempo de muestreo 8,0384 ms polo

dominante en $Polo = -\frac{5}{4.3} = -1,162$

En la figura 34 se muestra el comportamiento del motor en función de tiempo para un tiempo de muestreo de 4.0488 ms.



Figura 34. Respuesta a una excitación de 3,3v con $T_s=4,0448$ ms.
Fuente Elaboración propia

Tiempo de establecimiento 4.5s, Tiempo de muestreo 4.0448ms polo dominante en:

$$Polo = -\frac{5}{4.5} = -1,11 \text{ y frecuencia } f_{osc} = 0.388\text{Hz}$$

En la figura 35 se muestra el comportamiento del motor en función de tiempo para un tiempo de muestreo de 3.0208 ms.

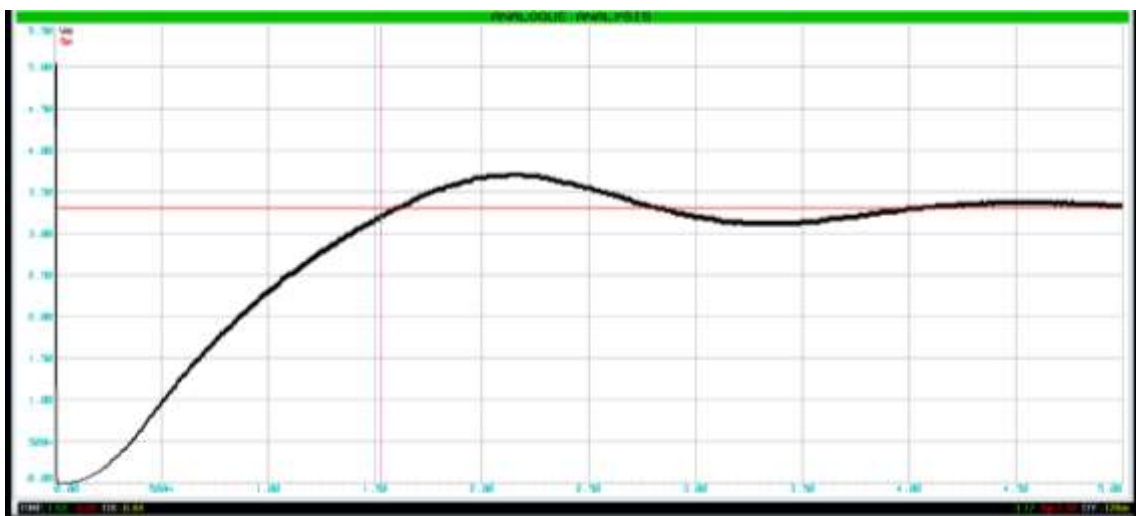


Figura 35. Respuesta a una excitación de 3.3v con $T_s=3.0208$ ms.
Fuente Elaboración propia

Tiempo de establecimiento 5s, Tiempo de muestreo 3.0208ms polo dominante en $Polo = -\frac{5}{5} = -1$ y frecuencia $f_{osc} = 0.408hz$

IV. ANÁLISIS DE DATOS

En la tabla 3 se muestra los datos obtenidos de las pruebas realizadas.

Polo en	Polo dominante	Tiempo de Establecimiento (s)	Tiempo de muestreo (ms)	Factor de convergencia			
				0.1	0.01	1	10
3.3	13.50	0.37	3.02	0.1	0.01	1	10
	2.5	2	4.0448				
	1.25	4	8.0384				
	0.909	5.5	10.0352				
10	2.99	1.67	3.02				
	2.3	2.17	4.0448				
	1.11	4.5	8.0384				
	1.0638	4.7	10.0352				
1	1.87	2.67	3.02				
	2.5	2	4.0448				
	1.369	3.65	8.0384				
	1,858	2.69	10.0352				
20	2.717	1.84	3.02				
	2.119	2.36	4.0448				
	1.144	4.37	8.0384				
	0.839	5.96	10.0352				

Tabla 3: Parámetros obtenidos de la simulación del controlador

En la tabla anterior se observa que el tiempo de establecimiento mejora cuando el tiempo de muestreo es menor, no se tomó tiempos de muestreo menores a 3.02 milisegundos debido a que el tiempo que tarda el microcontrolador en realizar la rutina es de 2.4 milisegundos esto se aprecia en la figura.36



Figura 36. Tiempo de duración de la Rutina del controlador.

Fuente Elaboración propia

En la tabla 3 se observa que el factor de convergencia no afecta al tiempo de establecimiento.

Se observa que el controlador genera un polo dominante que está en función del tiempo de muestreo, pero este se aleja del eje imaginario cuando el tiempo de muestreo disminuye esto se evidencia en la gráfica de la figura 37.

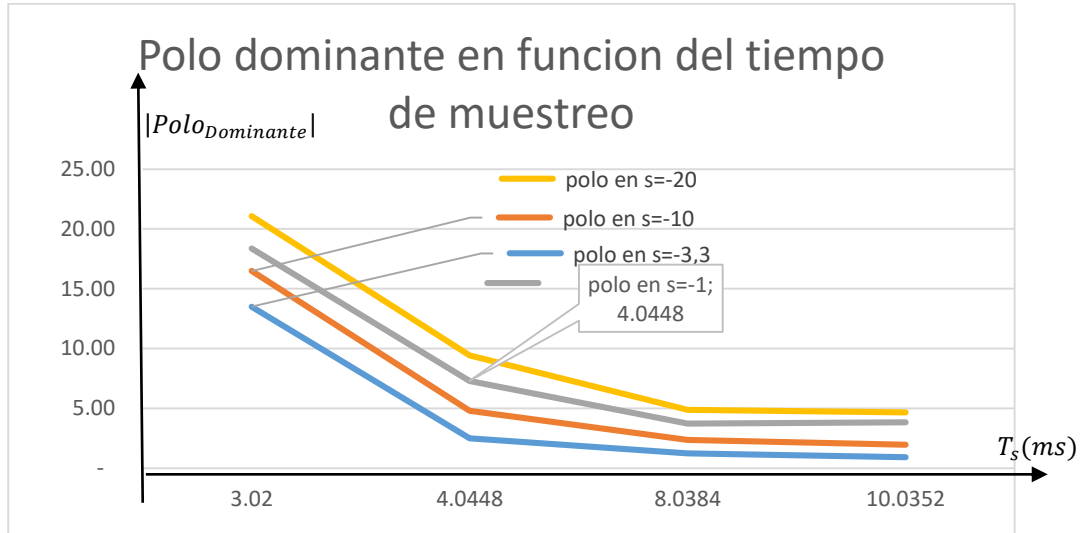


Figura 37. Gráfica del polo dominante en función del tiempo de muestreo
Fuente Elaboración propia

En el gráfico de la figura 38 se observa la dependencia del tiempo de muestreo con el tiempo de establecimiento para el polo ubicado en $s = -3,3$ y la dependencia lineal de este.

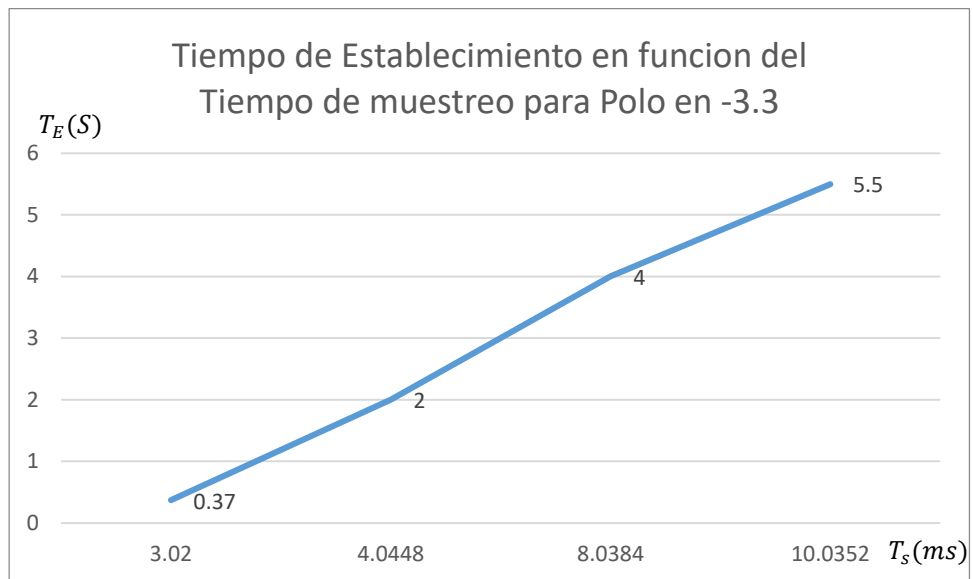


Figura 38. Gráfica del Tiempo de establecimiento en función del tiempo de muestreo para polo en $s=-3.3$

Fuente Elaboración propia

Para el polo ubicado en $s = -10$ se observa el mismo comportamiento, que el tiempo de establecimiento disminuye, cuando disminuye el tiempo de muestreo, pero no lo hace de forma proporcional esto se observa en la figura 39.

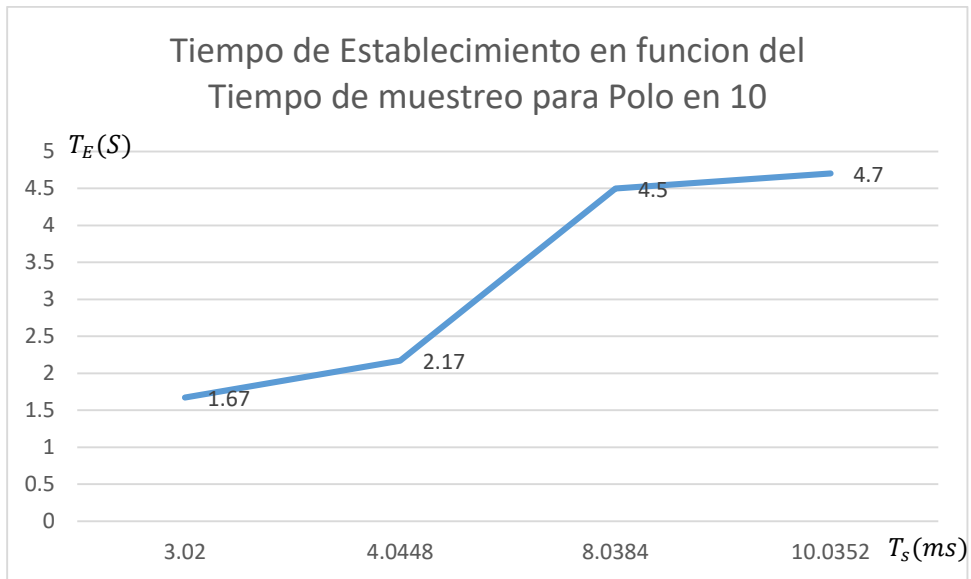


Figura 39. Gráfica del tiempo de establecimiento en función del tiempo de muestreo para polo en $s=-10$

Fuente Elaboración propia

Para el polo ubicado en $s = -20$ se observa el mismo comportamiento, que el tiempo de establecimiento disminuye cuando disminuye el tiempo de muestreo, pero no lo hace de forma proporcional esto se evidencia en la figura 40.

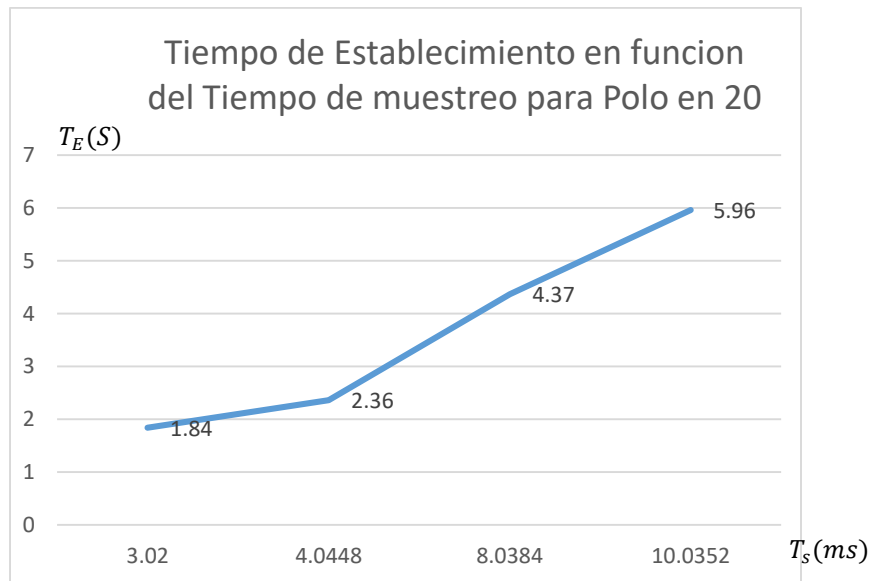


Figura 40. Gráfica del tiempo de establecimiento en función del tiempo de muestreo para polo $s=-20$

Fuente Elaboración propia

Para el polo ubicado en $s = -1$ se observa, que el tiempo de establecimiento disminuye y aumenta cuando el tiempo de muestreo aumenta, tiene un comportamiento oscilatorio pero con pendiente positiva, esto se observa en la siguiente ecuación aproximada $T_E = mT_s + b + A \sin(cT_s)$ para la gráfica 41.

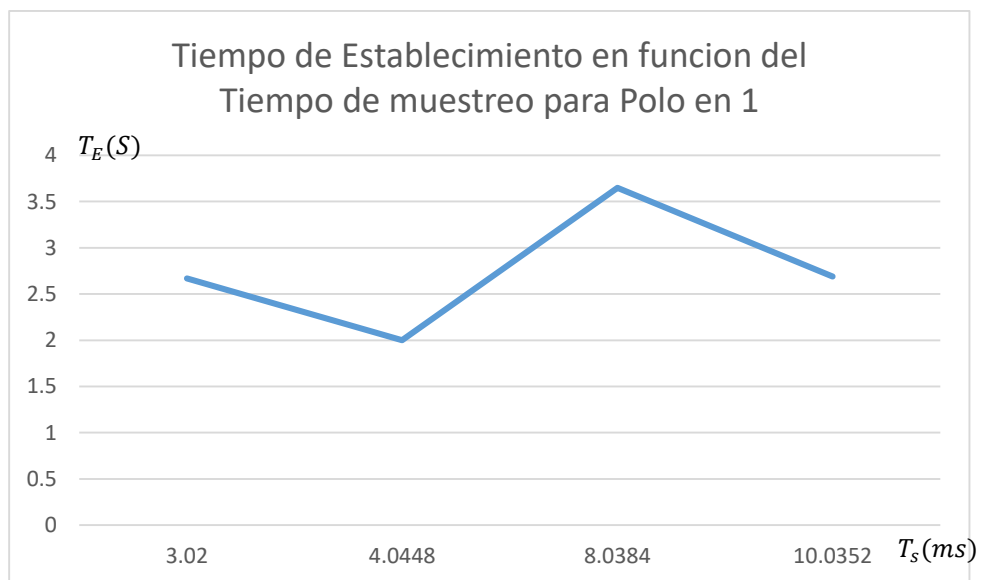


Figura 41. Gráfica del tiempo de establecimiento en función del tiempo de muestreo para polo $s=-1$

Fuente Elaboración propia

En la siguiente tabla se muestra el comportamiento del controlador sometido a un proceso clásico de control de velocidad, conformado por un motor DC de 12 voltios y un encoder de 200 pulsos por revolución.

Polo en	Polo dominante	Tiempo de Establecimiento	Tiempo de muestreo	Frecuencia
Motor	1.00	5	3.02	0.408
	1.11	4.5	4.0448	0.388
	1.16	4.3	8.0384	0
	1.00	5	10.0352	0

Tabla 4: Datos del controlador actuando sobre un motor DC.

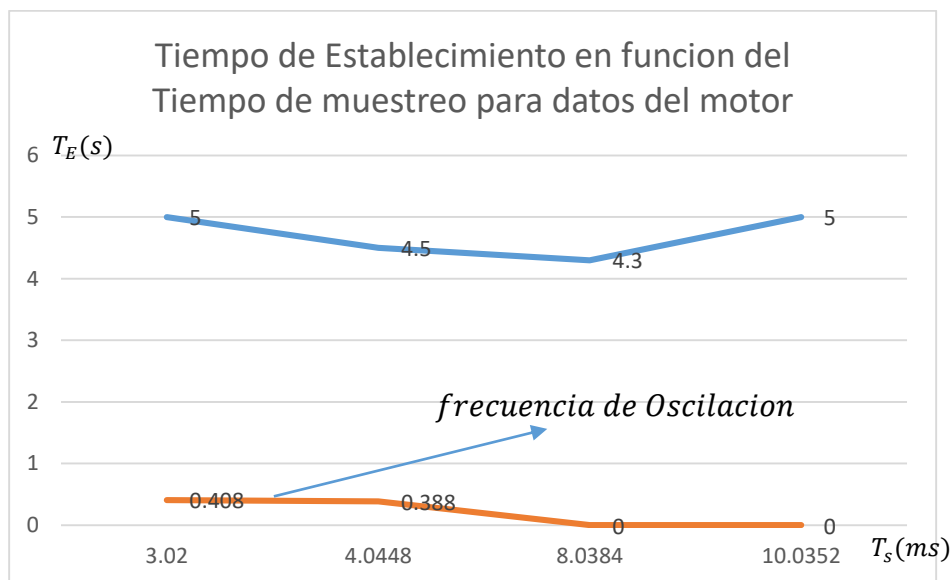


Figura 41. Gráfica del tiempo de establecimiento en función del tiempo de muestreo para motor DC

Fuente Elaboración propia

Al observar los datos nos damos cuenta que el comportamiento del controlador cuando el tiempo de muestreo disminuye, es Sub amortiguado ($e^{-at} \sin(2\pi ft)$) y muestra frecuencia máxima de 0,48 hertz con tiempo de muestreo de 3,02 ms.

El tiempo de establecimiento se mantiene entre 4,3 y 5 segundos.

V. RESULTADOS

- Cálculo de la constante integral adaptativa que está en función del error y el coeficiente β_i

$$K_{ifinal} = K_{iinicial} + \beta_i \frac{Error}{S_P} \frac{V_p}{K_{iinicial}}$$

- Cálculo de la constante Proporcional adaptativa que está en función del error y el coeficiente β_p

$$K_{pfinal} = K_{pinicial} + \beta_p \frac{Error}{S_P} \frac{V_p}{K_{pinicial}}$$

- Respuesta del polo dominante en función del tiempo de muestreo. El polo dominante se aleja del eje imaginario cuando el tiempo de muestreo disminuye esto se evidencia en las curvas de la figura 42.

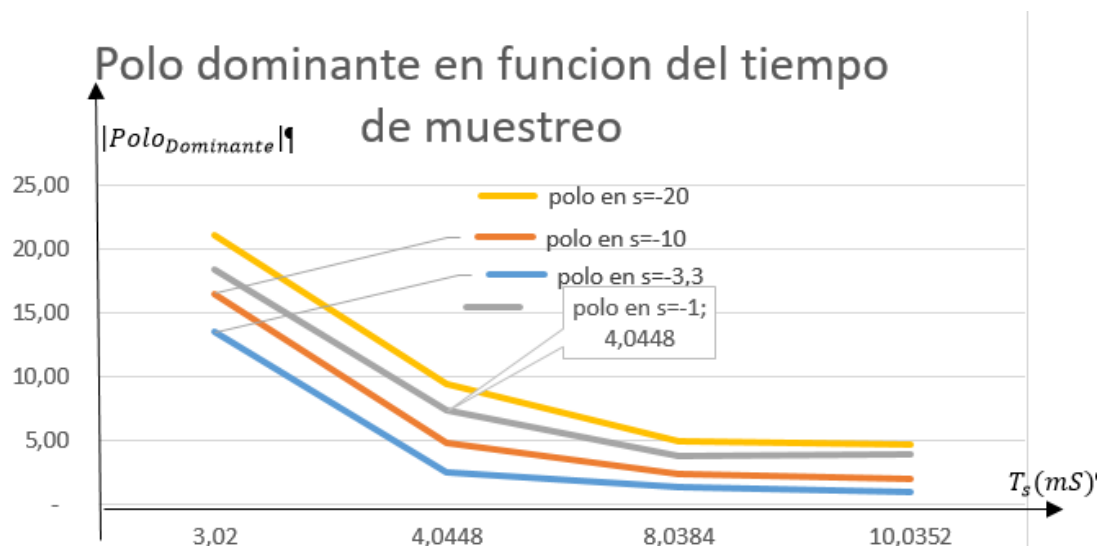


Figura 42. Gráfica del polo dominante en función del tiempo de muestreo

Fuente Elaboración propia

- Respuesta del tiempo de establecimiento en función del tiempo de muestreo, se observa en la gráfica de la figura 43 que el tiempo de establecimiento disminuye cuando el tiempo de muestreo disminuye independiente del polo de la planta

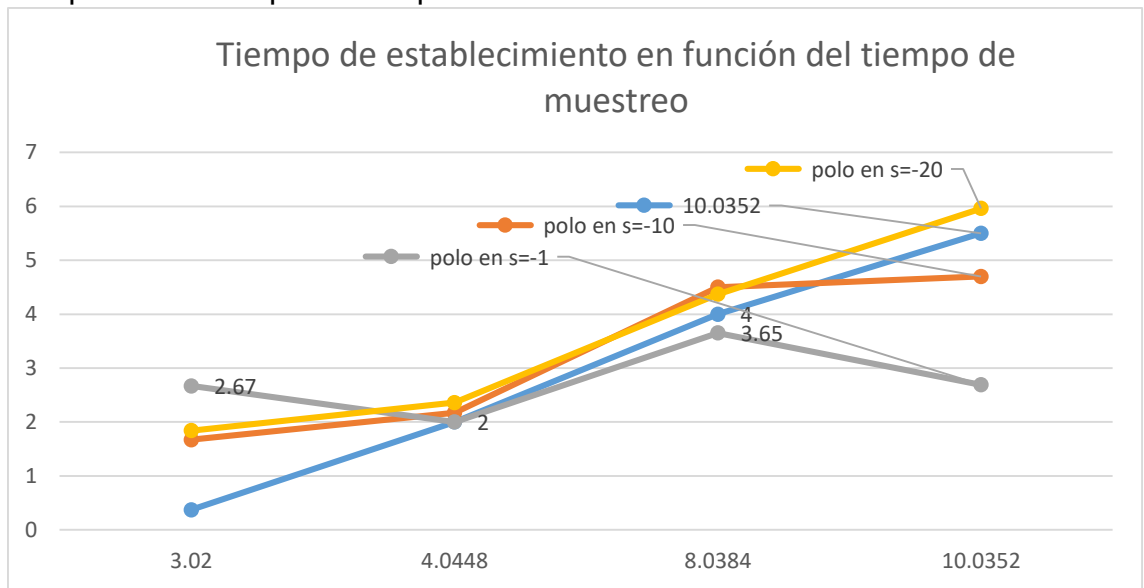


Figura 43. Gráfica del Tiempo de establecimiento en función del tiempo de muestreo

Fuente Elaboración propia

- El tiempo de establecimiento de la velocidad del motor de prueba se mantiene casi constante cuando el tiempo de muestreo cambia, pero el polo se vuelve complejo, permitiendo oscilaciones en el establecimiento, estas oscilaciones aumentan en frecuencia cuando el tiempo de muestreo disminuye esto se evidencia en la figura 44.

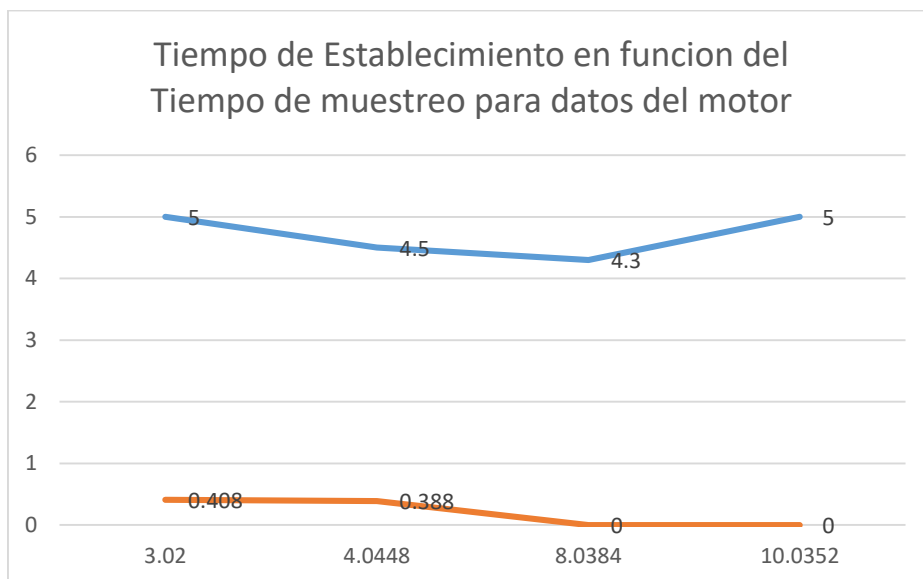


Figura 44. Gráfica del tiempo de establecimiento en función del tiempo de muestreo para motor DC

Fuente Elaboración propia

- Circuito de prueba del controlador adaptativo para realizar el control de velocidad de un motor de corriente continua con encoder esto se muestra en la figura 45.

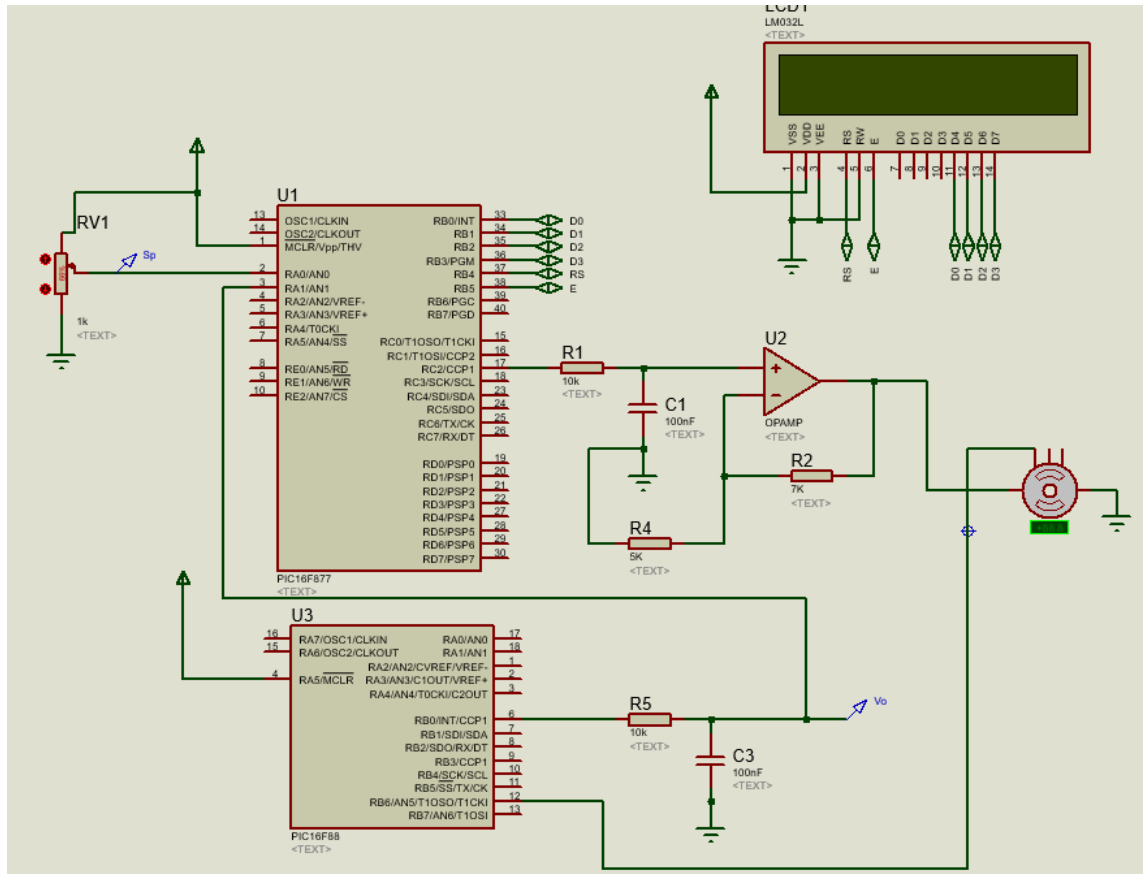


Figura 45. Circuito de Prueba del control adaptativo para controlar velocidad de un motor

Fuente Elaboración propia

VI. CONCLUSIONES

- El primer objetivo de estudio que es la descripción del método del descenso del gradiente fue descrito en el capítulo 2.3 donde se indica el comportamiento de este para la minimización del error.
- En el capítulo 3.1 se desarrolla el segundo objetivo de la presente investigación, en él se determinan las ecuaciones que gobiernan las constantes K_i y K_p para un sistema de primer orden realimentado donde se evidencia la siguiente ecuación.

$$K_{ifinal} = K_{iinicial} + \beta_i \frac{Error}{S_p} \frac{V_p}{K_{iinicial}}$$

$$K_{pfinal} = K_{pinicial} + \beta_p \frac{Error}{S_p} \frac{V_p}{K_{pinicial}}$$

- En el capítulo 4 se observa el cumplimiento del tercer objetivo de la investigación allí se evidencia como el polo dominante mejora (se aleja del eje imaginario) cuando el tiempo de muestreo disminuye.
- En el capítulo 4 se cumple el cuarto y último objetivo de la presente investigación, allí se evidencia la dependencia del tiempo de establecimiento el tiempo de muestreo, mostrando que a menor tiempo de muestreo el tiempo de establecimiento es menor.
- Para el caso de la prueba con el motor se nota que cuando el tiempo de muestreo es cercano a 4ms el polo dominante es complejo, esto quiere decir que el sistema oscila.

VII. RECOMENDACIONES.

- Se recomienda el uso del controlador adaptativo por el método del descenso del gradiente cuando no se tiene el modelo matemático de la planta, pero se presume que es de primer orden.
- Se recomienda realizar la prueba física del controlador con procesos de primer orden, como por ejemplo control de velocidad o temperatura, ya que en este trabajo por motivos de pandemia no se ha podido realizar debido a que es necesario equipo de laboratorio.
- Se recomienda realizar el estudio del comportamiento en sistemas de segundo orden y documentar la respuesta.

VIII. BIBLIOGRAFIA.

- Amstrom, K., & Hagglund, T. (2009). *Control PID Avanzado*. Prentice Hall.
- Kuo, B. (1996). *Sistemas de Control Automático* (7.^a ed.). Prentice Hall.
- Lazo, A. (2016). *Implementación de un controlador adaptativo por modelo de referencia para sistemas de segundo orden* [Tesis para optar el grado de maestro en control y automatización industrial]. Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca – Ecuador.
- Lima, B. (2015). *Implementación de control PID para un esterilizador a calor seco con microcontrolador PIC* [Tesis para optar el título de ingeniero electrónico]. Universidad Tecnológica del Perú, Perú.
- Millán, D. (2012). *Estudio y comparativa de diferentes algoritmos adaptativos para la identificación de sistemas: Simulink* [Tesis para optar el grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática]. Universidad Politécnica de Cataluña, España.
- Ogata, K. (1996). *Sistemas de control en tiempo discreto* (2.^a ed.). Prentice Hall.
- Ogata, K. (2010). *Ingeniería de control moderna* (5.^a ed.). Pearson Educación S.A.
- Palacios E. (2004). *Microcontrolador PIC16784*. México: Alfaomega.
- Perez, H. (2004). Algoritmos LMS con factores de convergencia variables en el tiempo. *Revista científica*, 139-150.
- Valdivia, C. (2012). *Sistemas de Control continuo y discreto*. Prentice Hall.
- Vivanco, C. (2013). *Análisis de sistemas de control de primer y segundo orden usando lenguajes de programación Matlab-Simulink* [Tesis para optar el título profesional de Ingeniero en Electrónica] Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Guayaquil.