

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROL PID PARA UN PROTOTIPO DE
MEZCLADOR DE VELOCIDAD CONSTANTE.**

MARIO ALEJANDRO CASANOVA RAMIREZ

JUAN PABLO ESCOBAR PATIÑO

CORPORACIÓN UNIVERSITARIA DEL HUILA-CORHUILA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRONICA

NEIVA

2021

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROL PID PARA UN PROTOTIPO DE
MEZCLADOR DE VELOCIDAD CONSTANTE.**

MARIO ALEJANDRO CASANOVA RAMIREZ

JUAN PABLO ESCOBAR PATIÑO

TUTOR

RUTHBER RODRIGUEZ SERREZUELA

Ingeniero Electrónico, MSc Universidad de Ibagué

CORPORACIÓN UNIVERSITARIA DEL HUILA-CORHUILA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRONICA

NEIVA

2021

NOTA DE ACEPTACIÓN

FIRMA DEL PRESIDENTE DEL JURADO

FIRMA DEL JURADO

FIRMA DEL JURADO

DEDICATORIA

Reconociendo el enorme esfuerzo que han realizado para que este momento sea posible queremos dedicar esta tesis de manera especial a nuestros padres, por hacer de nosotros personas responsables y persistentes con gran deseo de superarse.

A hermanos y familiares que han estado presentes y han aportado de manera positiva para nuestra formación tanto para vida como para el ámbito profesional.

A mis abuelos, especialmente a quien siempre creyó en mí y a mi bisabuela que en paz descanse y a todas aquellas personas, que a pesar de las adversidades siempre se encontraron ahí sin importar el día o la hora.

AGRADECIMIENTOS

A nuestros padres, por su apoyo incondicional durante este proceso de formación profesional, por ser nuestras bases para crecer, finalmente agradecemos sus voces de aliento en momentos de dificultad e incertidumbre.

A nuestros familiares, que de una u otra manera aportaron para culminar esta etapa de gran importancia para nosotras.

A nuestros amigos que con su conocimiento y ayuda nos crearon un camino más llevadero en esta etapa que ya se culmina.

A nuestro director de tesis, por su enorme aporte en conocimiento, recomendaciones y dedicación durante la formulación y desarrollo de este proyecto.

TABLA DE CONTENIDO

<u>1</u>	<u>LISTA DE IMÁGENES</u>	8
<u>2</u>	<u>LISTA DE TABLAS</u>	10
<u>3</u>	<u>TABLA DE GRÁFICOS</u>	¡Error! Marcador no definido.
<u>4</u>	<u>LISTA DE ANEXOS</u>	11
<u>5</u>	<u>GLOSARIO</u>	12
<u>6</u>	<u>RESUMEN</u>	13
<u>7</u>	<u>ABSTRACT</u>	14
<u>8</u>	<u>INTRODUCCIÓN</u>	15
<u>9</u>	<u>JUSTIFICACIÓN</u>	17
<u>10</u>	<u>ESTADO DEL ARTE</u>	19
<u>10.1</u>	<u>Marco teórico.</u>	19
<u>1.1.1</u>	<u>Control Proporcional, Integral, derivativo (PID)</u>	21
<u>11</u>	<u>3.3 Bases conceptuales</u>	23
	<u>D. Control de fase</u>	27
	<u>Medición de la velocidad del motor</u>	29
<u>11.1</u>	<u>Antecedentes.</u>	31
<u>12</u>	<u>OBJETIVOS</u>	33
<u>12.1</u>	<u>OBJETIVO GENERAL.</u>	33
<u>12.2</u>	<u>OBJETIVO ESPECIFICO.</u>	33

<u>13</u>	<u>METODOLOGÍA</u>	34
	<u>Diseño del control de velocidad del motor AC.</u>	35
	<u>Diseño del circuito de detector de cruce por cero</u>	35
	<u>Circuito sensor de velocidad</u>	38
<u>14</u>	<u>RESULTADOS</u>	50
<u>15</u>	<u>DISCUSIÓN</u>	54
<u>16</u>	<u>CONCLUSIONES</u>	55
<u>17</u>	<u>RECOMENDACIONES</u>	56
<u>18</u>	<u>ANEXOS</u>	57
<u>19</u>	<u>BIBLIOGRAFÍA</u>	58

1 LISTA DE FIGURAS

<u>Figura 1. Mezclador de velocidad constante comercial, marca Chandler Energy.</u>	19
<u>Figura 2. Diagrama de Control PID</u>	22
<u>Figura 3. Vector de voltaje aplicado</u>	24
<u>Figura 4. Vector de flujo de estator</u>	25
<u>Figura 5. Esquema de control de vectorial de motor AC sin sensor “Sensorless”</u>	26
<u>Figura 6. Diagrama de control FOC</u>	27
<u>Figura 7. Formas de onda del control de fase</u>	28
<u>Figura 8. Símbolo del (a) SCR y del (b) Triac</u>	28
<u>Figura 9. Representación de las señales incrementales A y B para el encoders cuadratura de efecto Hall</u>	29
<u>Figura 10. Representación gráfica de las señales incrementales A, B y Z</u>	30
<u>Figura 11. Metodología utilizada</u>	34
<u>Figura 12. Resultados de Scopus ante la consulta de controles PID de velocidad en motores AC.</u>	35
<u>Figura 13. Configuración interna del MOC3040 para el circuito detector de cruce por cero.</u>	36
<u>Figura 14. Circuito de disparo para el control de velocidad del motor AC del mezclador</u>	38
<u>Figura 15. Configuración interna del OPB606A para el circuito del sensor de velocidad</u>	38
<u>Figura 16. Circuito de encoder digital para el control de velocidad del motor A.C. del mezclador.</u>	40
<u>Figura 17. Parte del código generado para realizar la captura de la velocidad mediante el encoder.</u>	41

<u>Figura 18. Respuesta del motor para el proceso de identificación. Autores.</u>	42
<u>Figura 19. Ingreso de los datos al Toolbox de identificación. Autores.</u>	42
<u>Figura 20. Conjunto velocidad de referencia vs R.P.M. importado en la herramienta IDENT de Matlab.</u>	43
<u>Figura 21. Estimación de la planta del motor AC utilizando la herramienta IDENT de Matlab.</u>	44
<u>Figura 22. Evaluación de la planta del motor AC utilizando la herramienta IDENT de Matlab.</u>	44
<u>Figura 23. Configuración para el experimento de retroalimentación del relé, donde r es el valor de referencia constante, e es el error de control, u es la salida del relé y y es la salida del proceso.</u>	45
<u>Figura 24. Salidas de un experimento de retroalimentación de relé. La salida de relé u (azul) cambia entre sus dos valores cada vez que la salida de proceso y (rojo) sale de la banda de histéresis (rayas negras), lo que hace que el proceso oscile.</u>	46
<u>Figura 25. Panel frontal del VI desarrollado en Labview para el control de velocidad del motor AC del mixer.</u>	48
<u>Figura 26. Diagrama de bloques del VI desarrollado en Labview para el control de velocidad del motor AC del mixer.</u>	49
<u>Figura 27. Respuesta de los diferentes controladores diseñados a una velocidad de referencia de 1.600 R.P.M. simulados en Matlab.</u>	50
<u>Figura 28. Control de velocidad del motor del Mixer implementado.</u>	51
<u>Figura 29. Las respuestas del sistema de control PID para los puntos de ajuste de 12.500, 15.000 y 18.750 R.P.M.</u>	52
<u>Figura 30. La respuesta del sistema de control con una perturbación.</u>	53

2 LISTA DE TABLAS

<u>Tabla 1. Características del optoacoplador MOC3040.</u>	36
<u>Tabla 2. Características eléctricas del sensor OPB606A.</u>	39
<u>Tabla 3. Parámetros del PID según Åström y Hägglund.</u>	46
<u>Tabla 4. Parámetros del PID según Ziegler Nichols.</u>	47
<u>Tabla 5. Cálculo de los parámetros PID mediante el método Chien, Hrones y Reswick.</u>	47
<u>Tabla 6. Los parámetros PID obtenidos con los tres métodos de ajuste mediante simulación de la planta de control de velocidad hecha en Matlab.</u>	50
<u>Tabla 7. Los parámetros PID obtenidos con los tres métodos de ajuste mediante simulación de la planta de control de velocidad hecha en Matlab.</u>	51

3 LISTA DE ANEXOS

[Anexo A. Datasheet del motor del mixer](#)

57

4 GLOSARIO

Motores de inducción. Los motores asíncronos o de inducción, son máquinas rotativas de flujo variable y sin colector. La corriente alterna genera el campo inductor. Habitualmente, el devanado del estator (inductor) es alimentado por la corriente y el devanado del rotor es alimentado por inducción (inducido). Las corrientes en el motor de inducción se transmiten a través de la acción del transformador por medio del devanado del estator, así mismo los devanados del rotor se encuentran en corto circuito y con reiteración no despliegan conexiones externas.

Arranque de motores. El arranque de motores se define como el proceso temporal en el que se aumenta la velocidad del mismo, desde un estado de inmovilidad hasta que logra alcanzar su velocidad nominal. Así como existen variedades de denominaciones de los motores asíncronos, también hay diversidad en los métodos de alimentación y arranque. De todos los tipos diferentes de arranques existentes tan solo 3 que son los más utilizados y reconocidos en la actualidad, los cuales serán examinados a continuación (Silva, 2010).

Arranque Directo. Es la forma más simple de arrancar un motor, porque se conecta directamente a la línea de alimentación y a su vez desarrolla, durante el arranque, un par electromagnético.

Arranque Suave. Son equipos electrónicos que permiten arrancar un motor de inducción progresivamente, limitando el torque o par y la corriente de arranque. El par electromagnético del motor y la tensión aplicada poseen una relación cuadrática proporcional, de manera que el par de arranque se reduce en forma cuadrática con la tensión de alimentación en el motor. A menor voltaje de alimentación, se disminuirá bastante el par de arranque y como consecuencia se brinda un arranque mucho más suave que prolonga la vida útil del motor.

5 RESUMEN

El presente trabajo de grado logro el diseño e implementación un control PID para un prototipo de mezclador de velocidad constante. Los mezcladores de velocidad constante son muy utilizados en la industrial para mezclar cementos para cumplir con la especificación 10A del Instituto Americano del Petróleo (API), cementos y materiales para cementación de pozos y RP 10B-2, práctica recomendada para probar cementos de pozos y para la mezcla de alto cizallamiento de pastas de cemento hidráulico.

A medida que se perforan pozos más profundos, se necesitan cementos de mayor peso para soportar presiones más altas en el fondo del pozo. Nuestro objetivo es realizar el control PID al motor de servicio pesado que puede manejar cementos más gruesos a la velocidad adecuada. El mezclador debe permitir el control por parte del operador para programar las velocidades y los tiempos de mezcla adecuados. Así mismo, características que la especificación 10A de API requiere como: un botón de control, el botón Perfil API, ser preprogramado con la configuración estándar API, 12.000 rpm durante 35 segundos. Estas funciones de programación ahorran tiempo al operador.

Actualmente estos dispositivos son importados al país y tienen un alto costo. El desarrollo  este prototipo nos permitirá poner en práctica los conceptos adquiridos durante nuestra formación y poder darle solución a una problemática en el sector industrial regional.

Palabras Claves: Mezcladora industrial, Motor AC, Control PID.

6 ABSTRACT

The present degree work achieved the design and implementation of a PID control for a prototype of a constant speed mixer. Constant speed mixers are widely used in the industry to mix cements to meet American Petroleum Institute (API) specification 10A, well cementing materials and cements, and RP 10B-2, recommended practice for testing well cements and for the high shear mixing of hydraulic cement pastes.

As deeper wells are drilled, heavier cements are needed to withstand higher pressures downhole. Our goal is to PID control the heavy duty motor that can handle thicker cements at the proper speed. The mixer must allow operator control to program proper mixing speeds and times. Likewise, features that the API specification 10A requires such as: a control button, the API Profile button, to be pre-programmed with the standard API configuration, 12,000 rpm for 35 seconds. These programming functions save operator time.

Currently these devices are imported into the country and have a high cost. The development of this prototype will allow us to put into practice the concepts acquired during our training and to be able to solve a problem in the regional industrial sector.

Keywords: Dung beetles, Biological succession, Passive restoration, Tropical dry forest, Forest fire.

7 INTRODUCCIÓN

El control PID en motores CA se investiga ampliamente y se utiliza en muchos campos de aplicación con referencia a la configuración clásica de control de la fase de la señal aplicada. El concepto de un esquema de control unificado para ser utilizado con diferentes motores de CA se conoce desde hace más de una década: los controladores industriales están disponibles en el mercado [1], y los esquemas unificados de control de vectores se han propuesto en la literatura para motores de inducción (IM) y accionamientos de motor de imán permanente (PM) (SPM) montados en superficie [2]. El enfoque general llamado “flujo activo” propuesto en [3] cubrió IM y SPM, así como también PM interior (IPM), reluctancia síncrona (SyR) y motores síncronos de rotor bobinado. Todos los esquemas citados [1] - [3] utilizan la orientación del flujo del rotor y el control del vector de corriente. Se ha propuesto un enfoque de control PID de velocidad (CPIDdv) de variador que permita el monitoreo de corriente, basado en el control de la potencia entregada al motor, como variador de CA universal [4].

El objetivo de este trabajo de grado fue la de implementar la estrategia de control PID de velocidad con un alto grado de generalidad para su uso con variadores de motor IM, IPM, SPM o SyR. Con respecto a otras soluciones unificadas basadas en la orientación del flujo del rotor (o flujo activo), el esquema de control PID de velocidad (CPIDdv) utiliza un enfoque de control de velocidad implementado en el marco de referencia del flujo del estator. El flujo del estator es controlado directamente por el componente del eje d del vector de voltaje del estator, mientras que el par se controla regulando el componente del eje q del vector de corriente del estator.

El control PID de velocidad propuesto sea muy efectivo en términos de utilización de voltaje en la región de debilitamiento del flujo, que se usa particularmente en tracción, accionamientos de husillo y electrodomésticos. Para todos los tipos de motor, los límites de tensión y corriente del inversor se aprovechan al máximo en el debilitamiento del flujo sin necesidad de conocer el modelo del motor (a excepción de la resistencia del estator), incluso en el caso de una tensión de enlace de CC variable [5], [6].

El modelo magnético del motor (o modelo actual) se utiliza para la estimación de flujo a baja velocidad para la mayoría de los esquemas de control orientados al campo IM [7] y como también es habitual para técnicas de control de posición sin sensor [8]. Los errores eventuales de los parámetros pueden conducir a un error de estimación de flujo en la región de baja velocidad y a un posible error de estimación de par en estado estable. Sin embargo, el control es robusto en todo el rango de velocidades y su respuesta dinámica es independiente de los errores del modelo.

En este trabajo de grado, solo se aborda el funcionamiento con sensores, es decir, la posición del rotor se mide por medio de un sensor de posición. Sin embargo, el control de velocidad se puede extender fácilmente a aplicaciones sin sensores, como ya se muestra para el IM [6]. Se presentan resultados experimentales para el control PID de velocidad propuesto para máquinas IM, IPM, SPM y SyR, que muestran la viabilidad del control propuesto y, en particular, la robusta operación de debilitamiento del flujo.

8 JUSTIFICACIÓN

Los motores de jaula de ardilla se han convertido en equipos importantes de alta potencia para la ejecución de tareas significativas tanto en el ámbito industrial como en el agrícola. Que falle un motor de estos podría representar un frenado en los procesos regulares de la planta, generando fallas significativas en cuestiones económicas y de producción. (Zhao & Whang, 2011).

Gracias a la importancia que han adquirido los motores AC en el mercado es pertinente que los estudiantes de ingeniería mecatrónica de la Corporación Universitaria del Huila - CORHUILA, adquieran conocimientos sólidos en dichos motores para que estén a la vanguardia de las necesidades del campo laboral.

LabVIEW es muy usado en la industria por su versatilidad, ya que es una herramienta virtual que permite crear sistemas de control con un lenguaje de programación gráfico, intentando que la programación sea más intuitiva para los desarrolladores. Así mismo, LabVIEW permite crear una interfaz gráfica de manera sencilla; sin necesidad de montar un código extenso aparte en alguna otra plataforma de programación orientada a objetos, que aleje el objetivo principal del programa, el cual es crear un sistema de control sólido y robusto.

LabVIEW también permite crear instrumentos virtuales como botones, perillas y pantallas, que permiten integrar varios comandos en una sola pantalla sin necesidad de periféricos externos innecesarios y facilitando la tarea de diseño de Hardware; para poder ver en tiempo real las muestras tomadas de los sensores y el funcionamiento del sistema de control implementado por medio de la pantalla de un computador común y corriente.

La posibilidad que LabVIEW interactúe con un motor AC, es fundamental en la formación de los estudiantes, porque por medio de la herramienta se pueden crear sistemas de control sencillos y

eficaces, además de poder implementar Hardware por medio de los instrumentos virtuales que optimizan los mecanismos de control de los procesos que se hallan en la industria.

Este trabajo es el primero que se realiza en la Corporación Universitaria del Huila “CORHUILA”, este permitirá que más estudiantes puedan incorporar los pasos aquí desarrollados para que sean incorporados a las asignaturas de Automatización y Control I, Automatización y Control II o Sistemas de manufactura flexible.

9 ESTADO DEL ARTE

9.1 Marco teórico.

Muchas investigaciones han demostrado la influencia de la velocidad de cizallamiento de la mezcla en las propiedades reológicas de la pasta de cemento [1]. Las pastas de cemento se mezclan y se cortaron a una velocidad constante en un reómetro y luego se someten a velocidades de corte crecientes y decrecientes, produciendo un bucle de histéresis cuando se traza contra un esfuerzo cortante. Las extensiones de la ruptura estructural dentro de la pasta se evalúan en función del tipo de mezclador y la velocidad, basándose en el área del bucle de histéresis [2].

La viscosidad plástica se mide usando la porción lineal de la curva de histéresis hacia abajo. Las pastas bien mezcladas muestran una menor propensión a una mayor degradación estructural y una baja viscosidad plástica [3]. Es por esta razón que el control de velocidad es de vital importancia en los mezcladores de velocidad constante pues permiten predecir el comportamiento dinámico de la pasta de cemento y su posterior actuación en los pozos de extracción de petróleo [4]. En la **Figura 1**, encontramos un mezclador de velocidad constante comercial de la marca Chandler Energy.



Figura 1. Mezclador de velocidad constante comercial, marca Chandler Energy.

Estos dispositivos cuentan con variadores de velocidad para el control de velocidad. El control PID tiene sus raíces en la década de 1911, cuando Nicolás Minorskyi, estaba diseñando sistemas de dirección automática para la Armada de los Estados Unidos y realizó sus análisis observando al timonel, y notando así que el timonel controlaba la nave no solo por el error actual, sino también en función de los errores pasados y en la tasa actual de cambio, logrando así que Minorsky desarrollara un modelo matemático para esto. Su objetivo era lograr estabilidad, y no control general, lo cual simplificó el problema significativamente. Mientras que el control proporcional brinda estabilidad frente a pequeñas perturbaciones, era insuficiente para tratar perturbaciones constantes, como un vendaval fuerte el cual requería un término integral. Finalmente, el término derivativo se agregó para mejorar el control. Esta estrategia de control se ha utilizado ampliamente en la ingeniería mecatrónica para el manejo de motores eléctricos. En el caso de máquinas eléctricas, para el caso de los motores de CA (el motor más usado en la industria) se ha utilizado para mejorar la respuesta dinámica de las máquinas frente a pequeños cambios en la carga o en la velocidad de referencia como lo plantea [5], [6], [7].

El motor de corriente alterna (CA) se están aplicando hoy en día a una gama más amplia de aplicaciones que requieren velocidad variable. Generalmente, los variadores de velocidad para motores AC requieren tanto un amplio rango operativo de velocidad como una respuesta de par rápida, independientemente de las variaciones de carga [8]. Esto conduce a métodos de control más avanzados para satisfacer la demanda real. Los métodos de control convencionales tienen las siguientes dificultades:

1. Depende de la precisión del modelo matemático de los sistemas
2. El rendimiento esperado no se cumple debido a la perturbación de la carga, la saturación del motor y las variaciones térmicas.
3. El control lineal clásico muestra un buen rendimiento solo a una velocidad de funcionamiento.
4. Los coeficientes deben elegirse correctamente para obtener resultados aceptables, mientras que elegir el coeficiente adecuado con parámetros variables como el punto de ajuste es muy difícil.

Para implementar el control convencional, se debe conocer el modelo del sistema controlado. El método habitual de cálculo del modelo matemático de un sistema es difícil. Cuando hay variaciones de parámetros del sistema o perturbaciones ambientales, el comportamiento del

sistema no es satisfactorio [9]. Por lo general, el control clásico se utiliza en accionamientos de motores eléctricos. El controlador clásico diseñado para un alto rendimiento aumenta la complejidad del diseño y, por lo tanto, el costo.

El control avanzado basado en las técnicas de inteligencia artificial se denomina control inteligente. Todo sistema con inteligencia artificial se llama sistema auto-organizado. En la última década, la producción de circuitos integrados (CI) y microprocesadores con alta capacidad de cálculo y velocidad de operación ha crecido muy rápidamente [10]. Los procesadores modernos de alta potencia, alta velocidad y bajo costo como DSP, FPGA entre otros CI, junto con interruptores de técnica de potencia como IGBT, hicieron que el control inteligente se usara ampliamente en accionamientos eléctricos. El control inteligente, actúa mejor que los controles adaptativos convencionales [11]. El controlador proporcional integral derivativo (PID) es la técnica de control más común donde los lazos de retroalimentación prácticos se basan en el control PID o en algunas desviaciones menores del mismo. La técnica de control PID se puede abordar desde muchas direcciones diferentes y se puede ver en la **Figura 2**, como un dispositivo que se puede operar con algunas reglas empíricas, pero también se puede abordar de manera sistemática. El rango de ganancias del controlador (K_p , K_i , K_d) se ha determinado utilizando la tabla de Routh como se expresa en esta sección, es decir, ecuación 1.1:

$$(1.1)$$

Ajusta aún más (manualmente) cada uno de K_p , K_i y K_d hasta que obtengamos la respuesta general deseada [5]. Sin embargo, existe una restricción sobre el uso de la tabla de Routh para definir el rango de estabilidad del sistema, ya que solo determina una variable en cada momento. Aquí, para el controlador PID, es esencial determinar su relación primero y luego usar la Tabla de Routh para decidir las condiciones de estabilidad.

Bases teóricas.

En esta sección se definen los conceptos principales que se requieren para el desarrollo del presente proyecto.

1.1.1 Control Proporcional, Integral, derivativo (PID)

Los controladores PID son los que se emplean con mayor frecuencia en la implementación de sistemas de control realimentado para procesos industriales por su simplicidad y buena relación costo/beneficio. La retroalimentación calcula la desviación o el error presente entre un valor medido y un valor deseado, señal $u(t)$, la cual ingresa a cada uno de los bloques de control donde

es procesada por la acción correspondiente, así la señal control que se envía a la planta es la suma de las tres acciones sobre el error: proporcional, integral y derivativa, conforme se ilustra en la **Figura 2**.

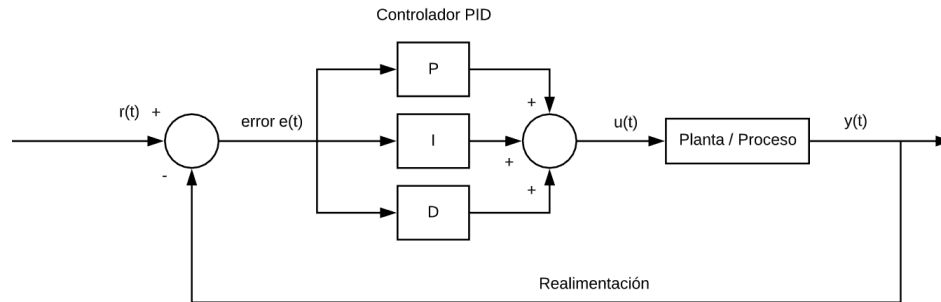


Figura 2. Diagrama de Control PID

En la **figura 2**, se encuentra el diagrama de bloques que describe el controlador PID, donde hace referencia al Set Point o variable de comando, es el error, representa la señal de control y es la variable de salida o variable controlada.

Acción proporcional: se requiere cuando la acción del controlador debe ser proporcional al tamaño de la señal de error del proceso, como se expresa en la **ecuación 1.1**

$$(1.1)$$

Donde la ganancia proporcional. El aumento proporcional de la variable permite el aumento en la velocidad del sistema y la reducción del porcentaje de error.

Acción Integral: Como se emplea en la **ecuación 1.2**, El control integral es proporcional a la integral de error de control, es decir, permite disminuir y eliminar el error en estado estacionario.

$$(1.2)$$

Donde es la variable integral y la variable de integración. El aumento de la constante varía de forma directa con el error del sistema, si el porcentaje de error es mayor al error deseado, la constante aumentará hasta que el error se minimice. Si se presenta un porcentaje de error menor, la acción de control será creciente.

Acción derivativa: se basa en la predicción de errores de control futuros, disminuyendo el error de forma proporcional a la velocidad en que se produce, la representación del control se emplea en la **ecuación 1.3**.

$$(1.3)$$

Donde es la ganancia derivada que genera un aumento en la estabilidad del sistema que se está controlando y disminuye la velocidad de ejecución.

La salida de los tres parámetros como se representa en la **Figura 1-1** son sumados para calcular la salida del controlador PID, la fórmula del control se denota en la **Ecuación 1.1**.

En general, se dice que la acción proporcional emplea la información del error en el presente, la integral la del pasado, mientras que la derivativa anticipa el error futuro por medio de una evaluación continua de la rapidez con la que este cambia.

10 3.3 Bases conceptuales

A. Control directo del toque

El esquema de control directo de par (CDDP) es muy simple. En su configuración básica consta de controlador CDDP, calculadora de par y flujo y VSI. En principio, el método CDDP selecciona uno de los seis vectores de voltaje del inversor y dos vectores cero para mantener el flujo y el par del estator dentro de una banda de histéresis alrededor del flujo de demanda y las magnitudes de par [6]. El par producido por el motor de inducción se puede expresar como se muestra a continuación:

$$(1)$$

Esto muestra que el par producido depende de la magnitud del flujo del estator, la magnitud del flujo del rotor y el ángulo de fase entre los vectores de flujo del estator y del rotor [7]. La ecuación del estator del motor de inducción viene dada por:

$$(2)$$

Puede aproximarse como se muestra a continuación durante un corto período de tiempo si se ignora la resistencia del estator, entonces:

$$(3)$$

Esto significa que el vector de voltaje aplicado como se muestra en la **Figura 3** determina el cambio en el vector de flujo del estator como se muestra en la **Figura 4**. Si se aplica un vector de voltaje que cambia el flujo del estator para aumentar el ángulo de fase entre el flujo del estator y vectores de flujo del rotor, entonces aumentará el par producido [8]. Por lo general, hay dos problemas asociados con los variadores DTC que se basan en comparadores de histéresis:

- i. Frecuencia de conmutación variable debido a comparadores de histéresis utilizados para los estimadores de par y flujo.
- ii. Estimaciones inexactas del flujo del estator que pueden degradar el rendimiento del variador. Algunos esquemas han logrado mantener una frecuencia de conmutación constante promedio utilizando modulación vectorial de ritmo, control predictivo y control de ritmo muerto [9]. Todas estas técnicas aumentan la complejidad de los sistemas de transmisión.

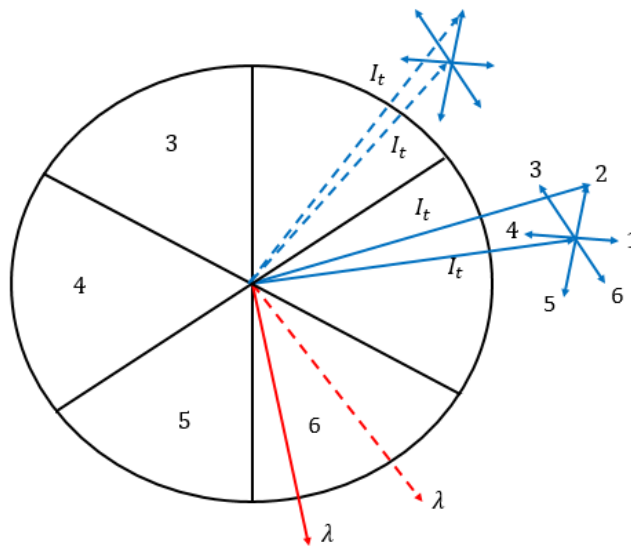


Figura 3. Vector de voltaje aplicado

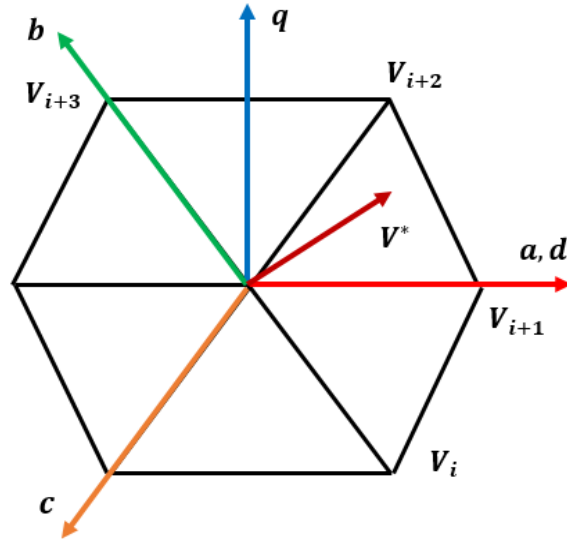


Figura 4. Vector de flujo de estator

Algunos esquemas han logrado mantener una frecuencia de conmutación constante promedio utilizando modulación vectorial, control predictivo y control del tiempo muerto [10]. Todas estas técnicas aumentan la complejidad de los sistemas de transmisión.

B. Control vectorial sin sensores

El control vectorial sin sensores predice la posición del rotor del motor mediante un modelo matemático del motor (ver **Figura 5**). La mayoría de las aplicaciones no necesitan ni pueden justificar el coste adicional de un encoder [10]. El método de control sin sensores es válido tanto para el rango de velocidad alta como baja. Usando el método tradicional, los voltajes y corrientes de los terminales del estator estiman la velocidad angular del rotor, la velocidad angular de deslizamiento y el flujo del rotor [11]. En este caso, alrededor de la velocidad cero, la estimación de la velocidad angular de deslizamiento se vuelve imposible ya que tiene lugar la división por cero.

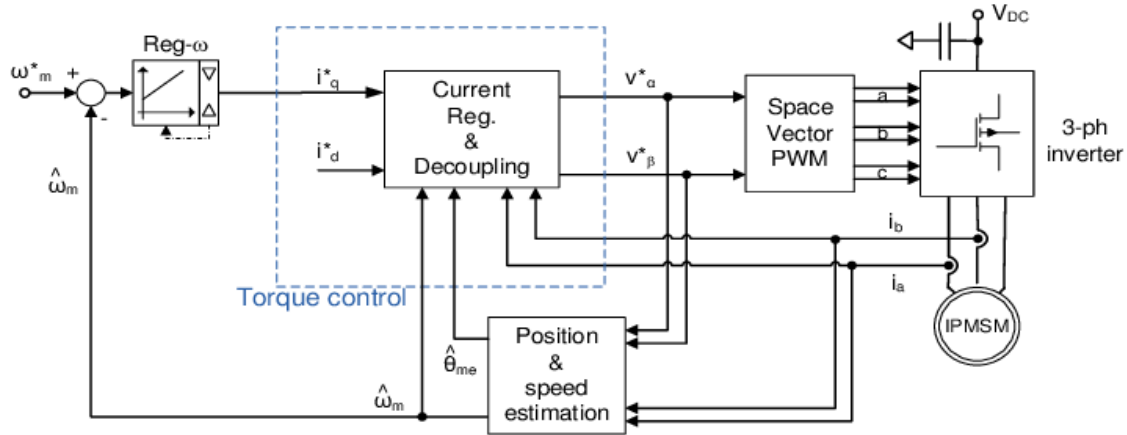


Figura 5. Esquema de control de vectorial de motor AC sin sensor "Sensorless"

Otra estrategia es que, dado que se supone un tiempo de muestreo corto, podríamos resolver las ecuaciones diferenciales linealizadas y luego obtener una ecuación algebraica para la estimación de los parámetros del rotor [12]. El problema de lograr un alto rendimiento dinámico en accionamientos para motores de CA sin la necesidad de un sensor de velocidad/posición del eje se ha estudiado ampliamente.

Las ventajas de la operación sin sensor de velocidad de los accionamientos son un menor costo, un tamaño reducido de las máquinas de accionamiento, la eliminación del cable del sensor y una mayor capacidad. El problema de velocidad cero del rotor que persistía en el esquema de control de velocidad sin sensores se resolvió sacrificando el rendimiento dinámico y de estado estable.

C. Control de Campo Orientado

La técnica de control de campo orientado (CDCO) está destinada a controlar el flujo del motor y, por lo tanto, poder descomponer la corriente del motor de CA en componentes "productores de flujo" y "productores de par". Estos componentes de corriente pueden tratarse por separado y luego recombinarse para crear las corrientes reales de fase del motor (ver Figura 6). Esto da una solución al problema de ajuste del impulso y también proporciona un control mucho mejor del par del motor, lo que permite un mayor rendimiento dinámico.

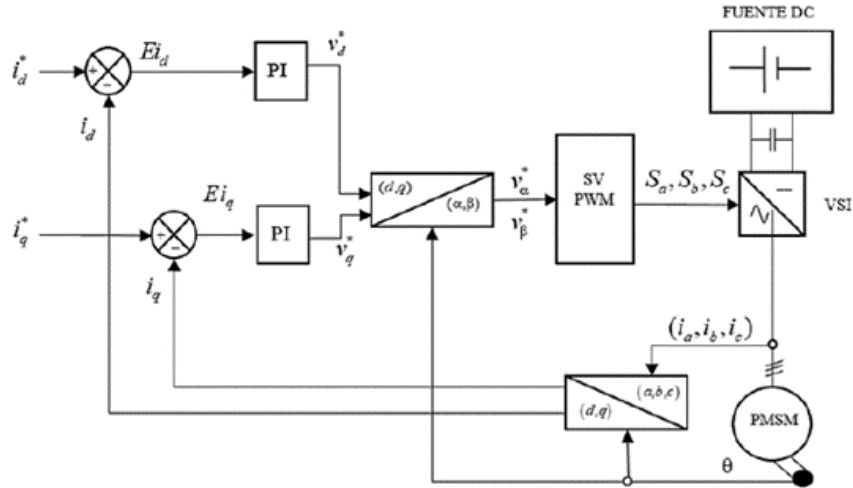


Figura 6. Diagrama de control FOC

Se han publicado algunos enfoques que producen el par máximo. Xu y Wang [13] insistieron en que un método que establece la referencia de flujo del estator inversamente proporcional a la velocidad del rotor debería producir más par de salida que un método convencional, que establece la referencia de flujo del rotor inversamente proporcional a la velocidad del rotor.

Sin embargo, en su método, existen algunos rangos de velocidad donde no se puede obtener el par máximo. Zhang y Wang [14] sugirieron una estrategia de control de voltaje para la operación de par máximo de motores de inducción en la región de debilitamiento de campo considerando las restricciones de voltaje y corriente. Sin embargo, este enfoque descuida la resistencia del estator para el análisis.

Usama [15] sugirió un método de generación de par máximo instantáneo para motores de inducción. En este enfoque, toda la entrada de corriente se utiliza para generar el flujo del rotor antes de que se desarrolle el par. Luego, en el momento en que el flujo del rotor alcanza el valor de estado estable, toda la corriente de entrada se conmuta para producir el componente de corriente de par.

D. Control de fase

El control de voltaje se logra mediante el control de fase en virtud de la conmutación física que utiliza pares de controlado de silicio rectificadores (SCR) o en su defecto un triac (**Figura 7**).

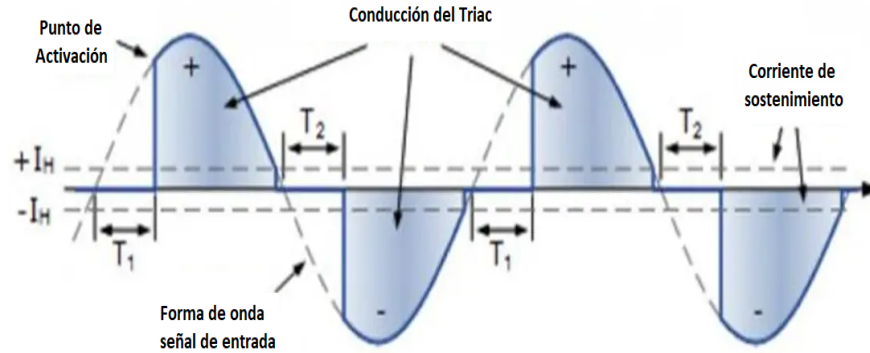


Figura 7. Formas de onda del control de fase

Un rectificador controlado de silicio (S.C.R.), es un tipo de tiristor que contiene tres terminales, siendo estas, ánodo asignado con la letra A, el cátodo relacionado con la letra C y la puerta, con la letra G, como se puede observar en la **Figura 8**. El funcionamiento de un rectificador controlado de silicio esta dado cuando se circula una corriente eléctrica por el terminal denominado puerta, activando la conexión completa. En otras palabras, conectando el terminal ánodo y cátodo. Si se desea tener una conexión en ambos sentidos se opta por conectar dos SCR en anti paralelo, uniendo las terminales puerta (Ximhai et al., 2012).

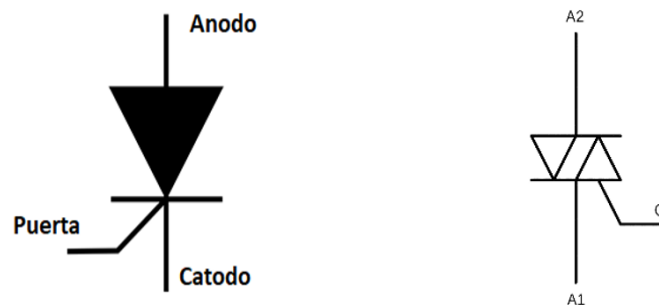


Figura 8. Símbolo del (a) SCR y del (b) Triac

Para el control de fase se requiere la sincronización de la onda sinusoidal con la red eléctrica para lograr disparar el TRIAC, este disparo esta dado un tiempo conocido como ángulo de disparo, que conlleva a activar el motor. Para el control de velocidad del tambor de la tostadora se utilizó la alimentación de 120V a 60Hz, es decir, un periodo de 16,66ms de la red eléctrica y

un tiempo de retardo con un rango de 0 y 10ms, correspondiente al 100% y 0% de la potencia eficaz, entregada al motor (Ávila, 2013).

Medición de la velocidad del motor

Las mediciones de velocidad son utilizadas en los encoders incrementales (Ver **Figura 9**), usando sensores de efecto Hall son transductores que generan un voltaje de salida en respuesta a la presencia de un campo magnético variable. Las aplicaciones típicas son en sensores de proximidad, medición de corriente y medición de velocidad en motores de corriente alterna (López Morales & Morales Ceballos, 2016).

Para aplicaciones de cálculo de velocidad y posición, los sensores son colocados con una separación de 90° , con respecto al círculo completo de giro del eje del motor. Un imán de ferrita induce en los sensores las señales A y B mostradas. Ambas señales están desfasadas 90° , debido a la posición de los sensores con respecto al círculo de giro.

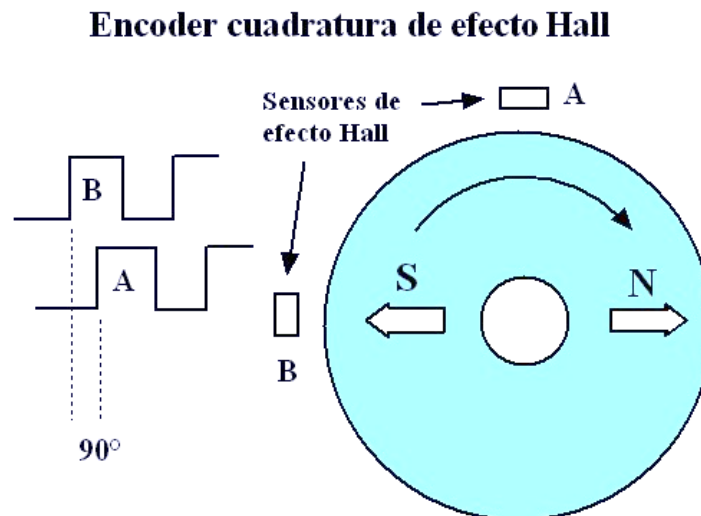


Figura 9. Representación de las señales incrementales A y B para el encoders cuadratura de efecto Hall

Usualmente, los encoders poseen tres canales; siendo el primer canal, nombrado como “Canal A” que adquiere la velocidad de rotación, y el segundo canal denominado como, señal "B" que define el sentido de rotación. Por último, dispone del canal Z, cero o nulo, el cual permite otorga la perspectiva absoluta de cero del eje del encoders, como se exhibe en la **Figura 10** (López Morales & Morales Ceballos, 2016).

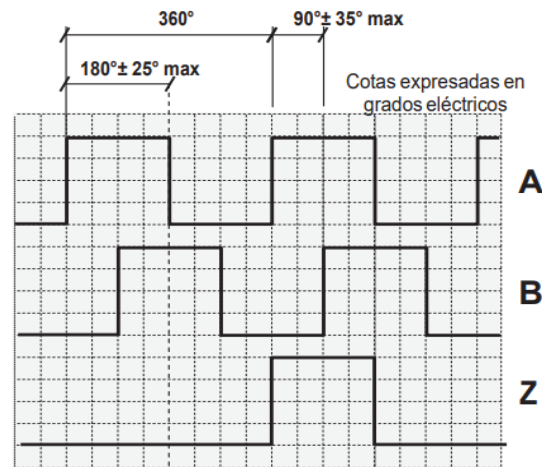


Figura 10. Representación gráfica de las señales incrementales A, B y Z

Para poder determinar los grados eléctricos es necesario aplicar la ecuación 2.11; la cual decreta el error del encoders para dos ondas seguidas.

$$(2.11)$$

En contraste, el enconder tiene un rango de error incremental de $\pm 25^\circ$, dicho de otra manera, corresponde a un desplazamiento de aproximadamente 7% del valor teórico (Rodríguez Palacios & Peñarete Rodríguez, 2011).

10.1 Antecedentes.

En el 2011, Barsoum y Chin construyeron un control de velocidad para un motor AC. Las aplicaciones de control remoto en un área amplia se usaban comúnmente en las industrias de hoy. Una de las aplicaciones comunes que requiere control y monitoreo remotos es el sistema de transmisión por inducción alimentado por inversor. El sistema de accionamiento tiene varios tipos de controlador, para realizar algunas acciones como controlar la velocidad, el sentido de giro hacia adelante y hacia atrás del motor. Este enfoque fue realizado mediante un controlador lógico programable (PLC) y, con el auge de la tecnología, se utilizó el módulo Ethernet para lograr el sistema de control remoto. Además, el PLC actual se puede controlar no solo con su software original, sino también con software de terceros, como LabVIEW. LabVIEW es un software de diseño de interfaces hombre-máquina que es fácil de usar. Puede comunicarse fácilmente con diferentes hardware.

En el 2018, Bida et. al. hizo una revisión de las técnicas de control de vectores de motores síncronos de imanes permanentes y las clasificaciones existentes de tales técnicas. Este trabajo ofreció una clasificación generalizada de técnicas de control de vectores que combina varios principios de control de vectores y enfoques de control de velocidad para los motores AC. Los métodos enumerados en el trabajo realizado por Bida se encontró una caracterización importante de estas estrategias de control. Sobre la base del análisis comparativo de técnicas se dieron recomendaciones sobre su aplicación práctica.

En el 2019, Khin construyó un sistema de control de velocidad con un algoritmo de control más común utilizado en la industria y ha sido aceptado universalmente en el control industrial. Una de las aplicaciones que se utilizan en este es control de la velocidad del motor de AC. Controlar la velocidad de un motor de AC es muy importante, ya que cualquier pequeño

cambio puede provocar inestabilidad del sistema de circuito cerrado. El objetivo de su trabajo fue mostrar cómo se puede controlar un motor de AC mediante el uso de un controlador PID en MATLAB. El desarrollo del controlador PID con el modelo matemático de motor de AC se realizó mediante el método de ajuste automático. El parámetro PID se probó con un motor real también con el controlador PID en MATLAB/Simulink. En este trabajo se describieron los resultados para demostrar la efectividad y la propuesta de este controlador PID producir una mejora significativa en el control del rendimiento y las ventajas del sistema de control del motor AC utilizando como interface el software Labview.

11 OBJETIVOS

11.1 OBJETIVO GENERAL.

Diseñar e implementar un control PID para un prototipo de mezclador de velocidad constante usados en el proceso de análisis en laboratorios involucrados en programas de investigación de cemento para pozos de petróleo.

11.2 OBJETIVO ESPECIFICO.

- Identificar y definir los parámetros de operación que permitan el diseño de los mezcladores de velocidad constantes comerciales en la actualidad.
- Obtener el modelo del mezclador de velocidad constante utilizando el procedimiento de identificación de sistemas.
- Diseñar las aproximaciones de las variables de control P, PI y PID convencionales para el mezclador de velocidad constante.
- Ajustar mediante los criterios de error mínimo el control PID para el mezclador de velocidad constante.

11.3

12 METODOLOGÍA

El proyecto propuesto se desarrolló basándose en el plan de trabajo siguiente:

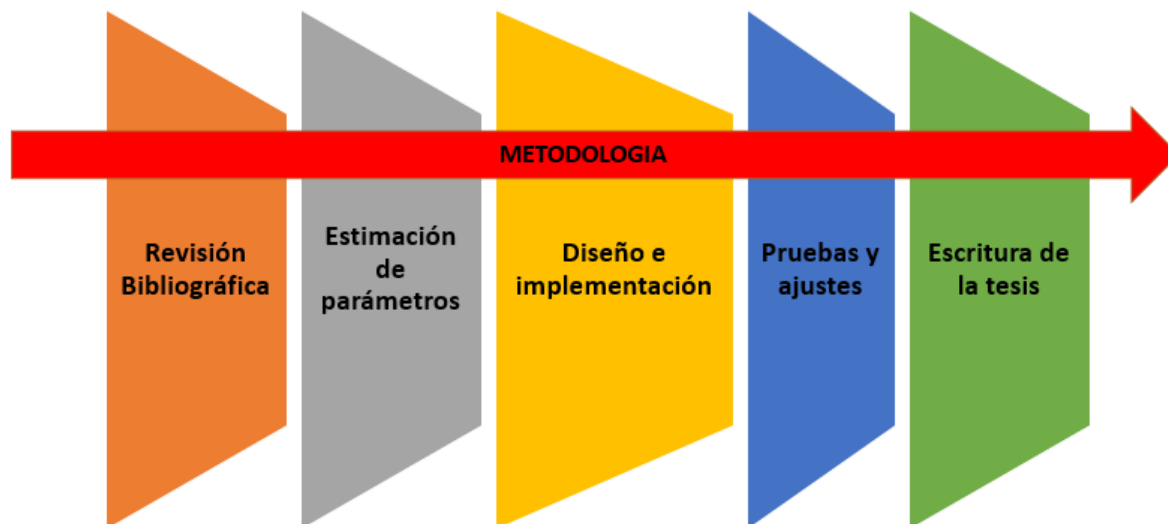


Figura 11. Metodología utilizada

1. Revisión bibliográfica.

En esta fase se realizó una documentación exhaustiva sobre las tecnologías, desarrollos, técnicas y métodos involucrados en el proyecto propuesto. Se realizó un estudio del estado de arte sobre los mezcladores utilizados en laboratorios involucrados en programas de investigación de cemento para pozos de petróleo, investigación y prueba de aditivos de cemento, programas de aseguramiento de la calidad de los fabricantes de cemento y en la investigación para empresas de mantenimiento de pozos y sus laboratorios de campo. En la **Figura 12**, podemos observar el comportamiento de número de artículos por año publicados en el tema de control PID de velocidad de motores. Se obtuvo una relación de 518 artículos habiendo realizado evaluación y selección, realizando una depuración con criterios de inclusión e exclusión como, por ejemplo, la eliminación de aquellos artículos repetidos.

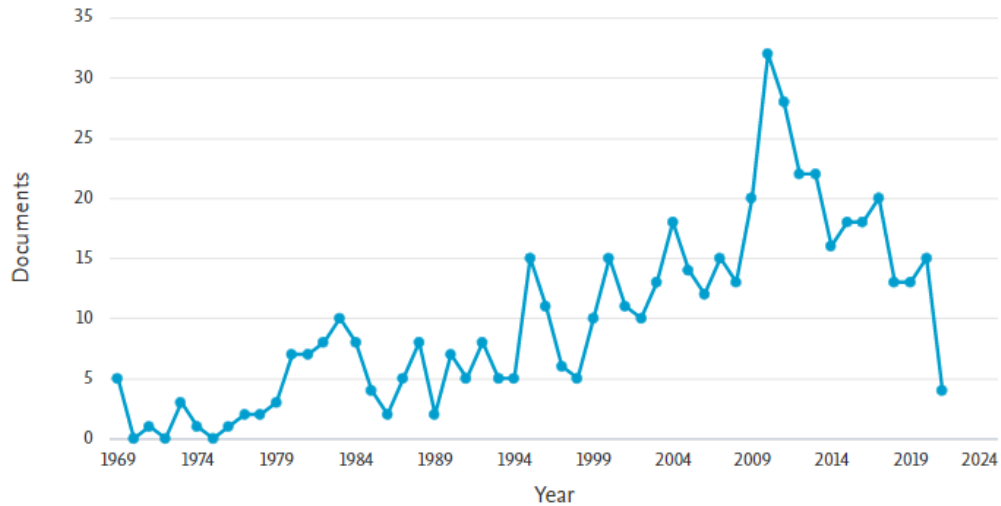


Figura 12. Resultados de Scopus ante la consulta de controles PID de velocidad en motores AC.

2. Estimación de los requerimientos del sistema

Con el análisis anterior establecimos los requerimientos del sistema de control, cuantificamos los materiales necesarios, se realizó la estimación de los sensores y los diferentes circuitos electrónicos necesarios. Se debe identificar los requerimientos teniendo en cuenta las diferentes características físicas y eléctricas del mezclador. Se realizó un análisis detallado de los componentes a utilizar para la construcción del prototipo de mezclador.

3. Diseño del control de velocidad del motor AC.

A continuación, se describe el proceso de adquisición de la señal de velocidad del motor AC para la identificación y las características de diseño del controlador PID de velocidad del motor AC.

Diseño del circuito de detector de cruce por cero

El circuito detector de cruce por cero está fijado por el optoacoplador MOC304

(Figura 13) que permite aislar la corriente alterna (AC) que afecta el microcontrolador. Por otro lado, el optoacoplador de salida MOC3041 de Fairchild, es un conductor TRIAC de cruce cruzado compuesto por DIP de 6 pines. Adicionalmente, esta configuración contiene un diodo emisor infrarrojos (GaAs) que se ajusta a un detector de silicio monolítico logrando una funcionalidad de un TRIAC doble de cruce de voltaje nulo. Este circuito alimenta corriente alterna con valor de 115V; los relés de estado sólido, controles industriales, impresoras láser,

motores, electrodomésticos, entre otros son algunos ejemplos donde es empleado (Sarmiento, 2016).

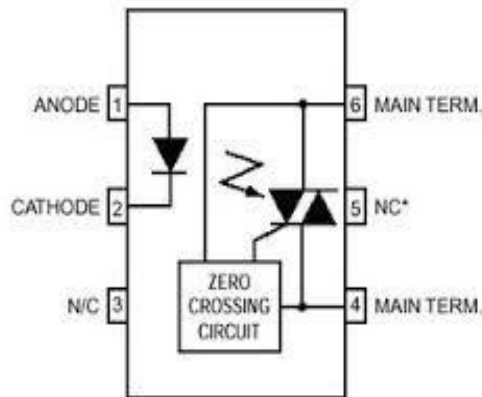


Figura 13. Configuración interna del MOC3040 para el circuito detector de cruce por cero.

Para calcular el valor de las resistencias se hizo uso de los datos entregados por el fabricante, como podemos ver en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Características del optoacoplador MOC3040.

Entrada del diodo		
Variable	Cantida	Unidad
	d	
Corriente en directa	50	mA
Voltaje inverso	6	Voltios
Potencia disipada	120	mW
Salida del fotoTriac		
Variable	Cantida	Unidad
	d	
Voltaje de salida	400	Voltios
Corriente pico inverso	1	Amperio
Potencia disipada	150	mW

La entrada del diodo la corriente en directa se maneja es de 50mA, según fabricante, cuyo valor mínimo es el 26% de dicho valor. El voltaje con que trabajo el Arduino es 5 voltios, en el cual se calculó con la ecuación 2.3.

(2.3)

La potencia máxima que disipó se calculó con la ecuación 2.4.

(2.4)

Para calcular la resistencia del circuito a la salida se consultó el datasheet, trabajando a una frecuencia de 60 Hz, es decir, un periodo de 16,66mS y voltaje de 120v. Este cálculo se realizó con la ecuación 2.5.

(2.5)

Otro fenómeno importante para asegurar el correcto funcionamiento del optotriac es el dv/dt estático, por el cual el TRIAC puede ser engatillado como resultado del ruido eléctrico en la carga de salida, aun sin ninguna señal de engatillado ($L_f=0$) en la entrada. Según los datos suministrados por el fabricante se realizó la ecuación 2.6.

(2.6)

La **Figura 14** se expone el circuito de disparo utilizado para el control de velocidad del motor en corriente alterna.

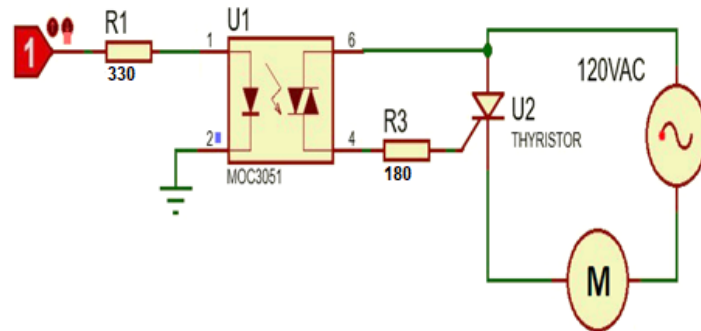


Figura 14. Circuito de disparo para el control de velocidad del motor AC del mezclador

Circuito sensor de velocidad

El sensor tomado para realizar esta función es OPB606A (**Figura 15**). Los sensores reflectantes consisten en un diodo emisor de infrarrojos y un fototransistor de silicio NPN montados uno al lado del otro en una carcasa de plástico negro. La radiación en el eje del emisor y la respuesta en el eje del detector son perpendiculares a la cara del OPB606A. El fototransistor responde a la radiación emitida por el diodo solo cuando un objeto o superficie reflectante se encuentra en el campo de visión del detector (León Sicard, 2005).

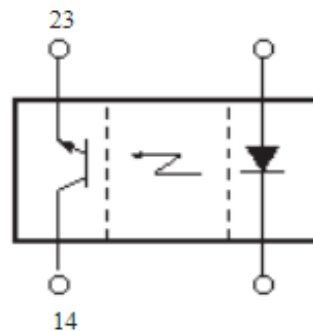


Figura 15. Configuración interna del OPB606A para el circuito del sensor de velocidad

Tabla 2. Características eléctricas del sensor OPB606A.

Entrada del diodo		
Variable	Cantidad	Unidad
Corriente en directa (	50	mA
Voltaje inverso	5	Voltios
Potencia disipada	100	mW
Salida del Opto Transistor		
Variable	Cantidad	Unidad
Voltaje colector emisor	10	Voltios
Corriente colector ()	100	μ A
Potencia disipada	100	mW

Para calcular el valor de las resistencias se usó los datos entregados por el fabricante para el sensor, como podemos ver en la **Tabla 2**. La entrada del diodo la corriente en directa que se maneja es de 50mA, a un voltaje en directa de 1.7v. Calculando se obtuvo la ecuación 2.7.

$$(2.7)$$

Esta resistencia se toma de 120 Ω . Para la etapa de salida se polarizo el fototransistor. Para ello se recurrió a los datos del fabricante para poder determinar la correcta operación de este. La corriente de saturación de salida del fototransistor es 20mA, a un voltaje en directa de 0.4v (**Figura 16**). Se determinó Rs con la ecuación 2.8:

$$(2.8)$$

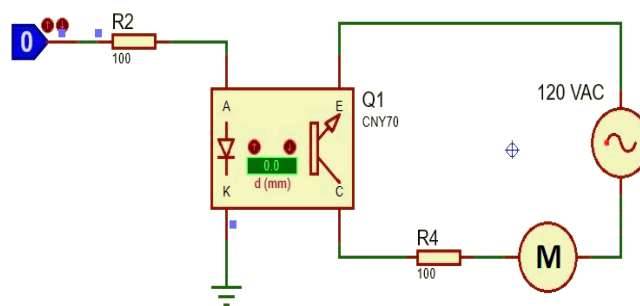


Figura 16. Circuito de encoder digital para el control de velocidad del motor A.C. del mezclador.

Se realizó una identificación de la planta para el diseño del controlador. Para recopilar la información capturada por el sensor y monitorear la variable de velocidad del tambor del tostador, fue necesario implementar un sistema para capturar la variación de dichas señales en el tiempo. Esto se logró mediante la transmisión y visualización de datos vía puerto USB en el monitor serial de la interfaz Arduino con un while-loop creado en Labview que permitió capturar los datos en un Excel para ser exportados a Matlab y poder realizar la identificación de esta. Para esto se estableció los pines 2 y 3 como entradas para el encoder, siendo estos mismos definidos como entrada en el Arduino. Posteriormente, estos son activados mediante las interrupciones de forma tal que este aviso provocado por el módulo del PIC, por un cambio en el estado de un pin correspondiente. Es entonces cuando interrumpirá la tarea que se esté haciendo en ese momento y pasaremos a ejecutar la rutina de interrupción, como se puede observar en la **Figura 17**.

Las señales obtenidas en Matlab, como se muestra en la **Figura 18**, son exportadas por intermedio del Toolbox de identificación hallando el modelo de la planta para el control de velocidad.

```

Encoder_Motor_AC Arduino 1.8.2
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda

Encoder_Motor_AC

#define encoder0PinA 2
#define encoder0PinB 3

volatile unsigned int encoder0Pos = 0;
void setup() {
  pinMode(encoder0PinA, INPUT);
  pinMode(encoder0PinB, INPUT);
  // Pin del Encoder en la interrupción 0 (pin 2)
  attachInterrupt(0, doEncoderA, CHANGE);
  // Pin del Encoder en la interrupción 1 (pin 3)
  attachInterrupt(1, doEncoderB, CHANGE);
  Serial.begin (9600);
}
void loop(){
  //Aquí va el resto del código
}
void doEncoderA() {
  // Busque un cambio de bajo a alto en el canal A
  if (digitalRead(encoder0PinA) == HIGH) {
    // Verifique el canal B para ver en qué dirección gira el Encoder
    if (digitalRead(encoder0PinB) == LOW) {
      encoder0Pos = encoder0Pos + 1; // CW
    }
    else {
      encoder0Pos = encoder0Pos - 1; // CCW
    }
  }
  else //Debe ser un borde de mayor a menor en el canal A
}

```

Guardado.

26 Arduino/Genuino Mega or Mega 2560, ATmega2560 (Mega 2560) en COM12

Figura 17. Parte del código generado para realizar la captura de la velocidad mediante el encoder. Autores.

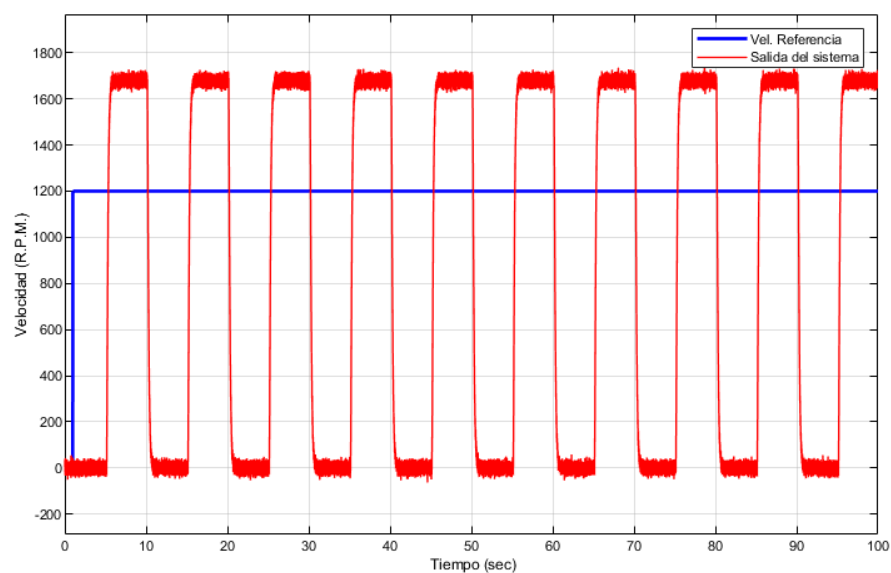


Figura 18. Respuesta del motor para el proceso de identificación. Autores.

En la **Figura 19** se puede observar la ventana principal de Toolbox de identificación, en la cual se agregaron las variables de entrada y salida en el dominio del tiempo.

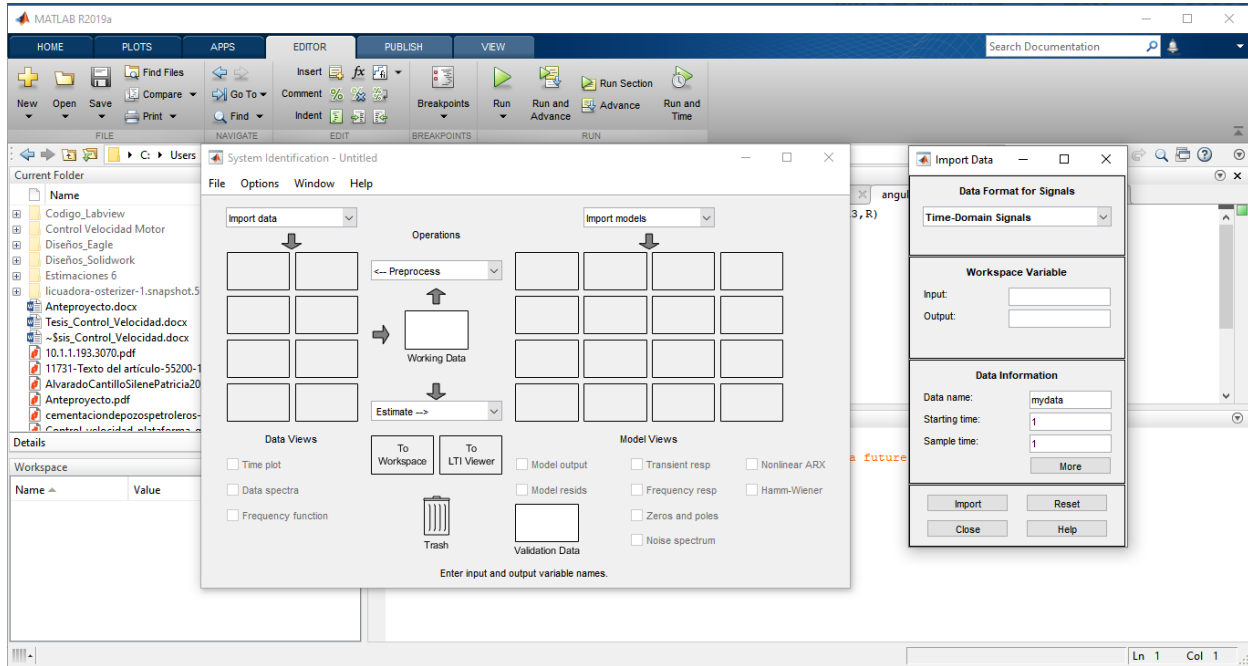


Figura 19. Ingreso de los datos al Toolbox de identificación. Autores.

Para obtener la función de transferencia se ingresa al sistema voltaje alterno y se obtiene la reacción de la planta en RPM. A continuación, se muestra los datos de la función de transferencia utilizando los datos recopilados en la Figura 20, los datos son ingresados a MATLAB y por medio de la herramienta IDENT se genera lo siguiente:

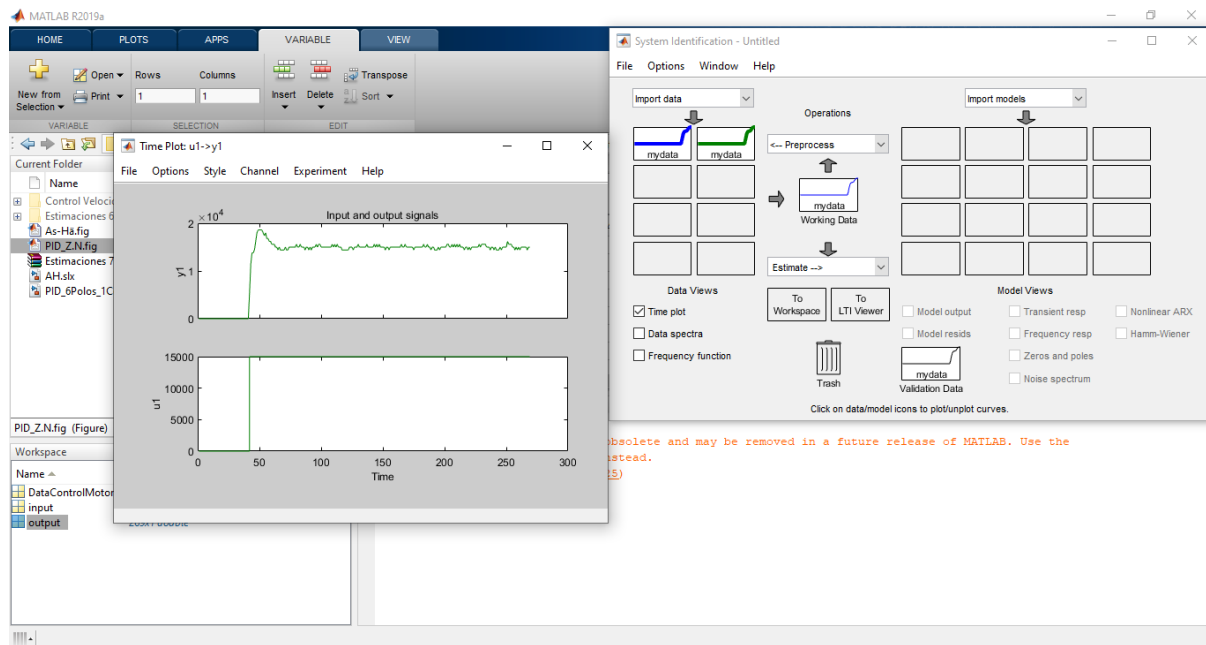


Figura 20. Conjunto velocidad de referencia vs R.P.M. importado en la herramienta IDENT de Matlab.

Se debe volver a generar datos con el motor para verificar el comportamiento, y se ingresan a la herramienta IDENT aplicando la eliminación de las medias, eliminación de las tendencias y aplicando filtros y realizando la estimación para obtener otros datos de comportamiento del motor como se puede ver en la siguiente figura 21:

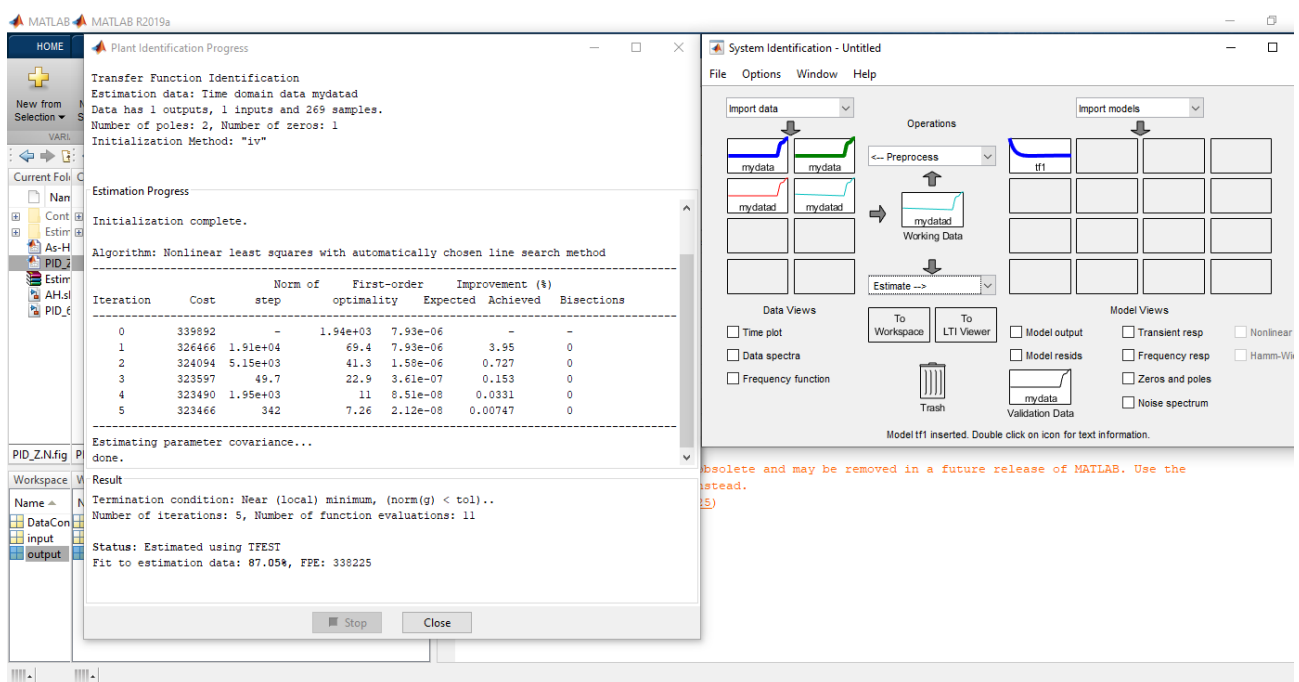


Figura 21. Estimación de la planta del motor AC utilizando la herramienta IDENT de Matlab.

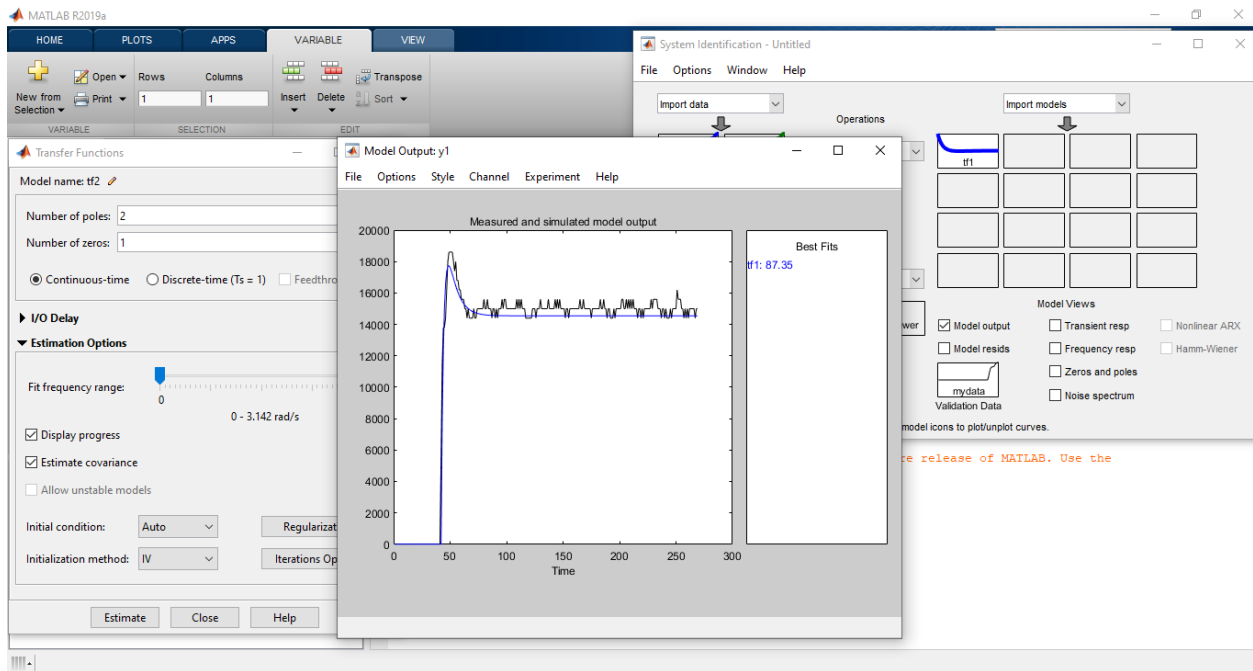


Figura 22. Evaluación de la planta del motor AC utilizando la herramienta IDENT de Matlab.

A partir de los datos del comportamiento del motor se va a generar la función de transferencia para así tomar la función que tenga el mejor índice de aproximación, se considera como buena aproximación a aquella que tenga 80% o mayor como podemos observar en la Figura 22. La función de transferencia utilizada es:

La función de transferencia de un motor de inducción ya sea monofásico o trifásico debe llevar un cero y dos polos para obtener una mejor aproximación. (Jorge Gallegos, Luis Ballesteros, Vladimir Juárez, & Sánchez, 2016).

Se realizó el diseño del control PID de velocidad en Matlab para el mezclador de velocidad constante teniendo en cuenta los detalles de la especificación están disponibles en las siguientes publicaciones: Especificación API 10A, Cementos y materiales para cementación de pozos API RP 10B-2, Práctica recomendada para probar cementos de pozos ASTM C1738 Práctica estándar para la mezcla de alto cizallamiento de pastas de cemento hidráulico.

Uno de esos procedimientos que es común en la industria es el autoajuste de relé. El principio del autoajuste del relé es el siguiente. Al cerrar el circuito de retroalimentación con una función de relé, que cambia entre dos valores dependiendo de la salida del proceso, el proceso se ve forzado a oscilar. Vea la Figura 23 para la configuración y la Fig. 24 para un resultado de experimento típico. A partir de las oscilaciones, los datos del proceso se pueden obtener y utilizar para ajustar un controlador PID.

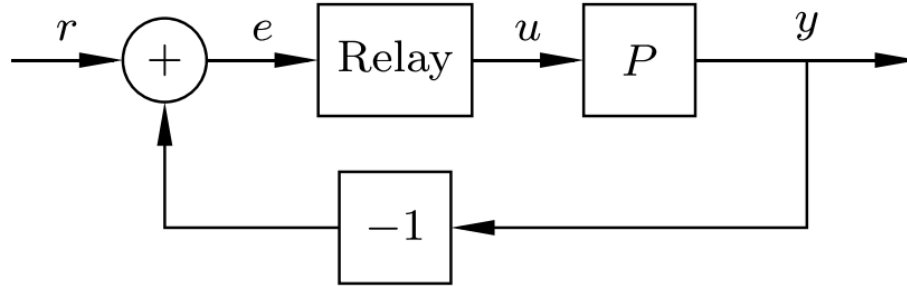


Figura 23. Configuración para el experimento de retroalimentación del relé, donde r es el valor de referencia constante, e es el error de control, u es la salida del relé y y es la salida del proceso.

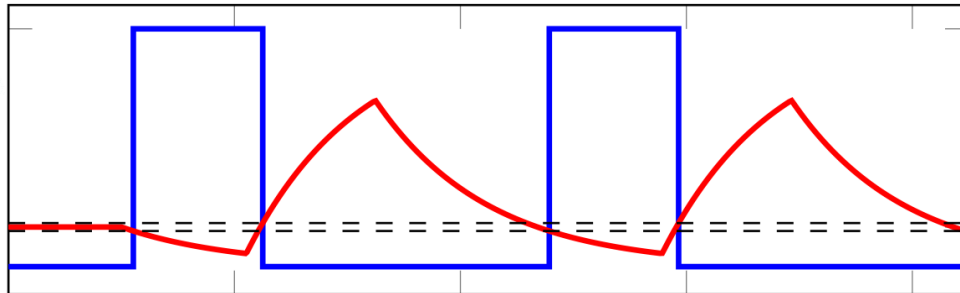


Figura 24. Salidas de un experimento de retroalimentación de relé. La salida de relé u (azul) cambia entre sus dos valores cada vez que la salida de proceso y (rojo) sale de la banda de histéresis (rayas negras), lo que hace que el proceso oscile.

El autotuner de relé (Åström & Hägglund, 1984) utiliza el período de tiempo y la amplitud de las oscilaciones inducidas para encontrar el punto crítico donde el proceso de Nyquist se cruza con el eje real negativo. Si se agrega una banda de histéresis para reducir la rotura debido al ruido, se obtiene un punto ligeramente diferente. Luego, los parámetros del controlador se encuentran moviendo este punto para dar al sistema de bucle abierto los márgenes de amplitud y fase especificados. En la **Tabla 3** encontramos como se calculan las constantes del PID.

Tabla 3. Parámetros del PID según Åström y Hägglund.

Controlador	Ajuste por margen de fase ()	Ajuste por margen de ganancia ()
-------------	------------------------------	----------------------------------

P		
PI		
PID		

Se investigó también el rendimiento de la regla de Ziegler Nichols de circuito cerrado para P, PI y PID para optimizar los parámetros de un controlador PID. Como resultado, el controlador P tiene un mejor rendimiento en comparación con los controladores PI y PID en el proceso de control de velocidad del motor AC cuando se utilizaron los parámetros iniciales estimados.

Tabla 4. Parámetros del PID según Ziegler Nichols.

Controlador	Lazo cerrado	Lazo abierto
P		
PI		
PID		

También se utilizó el método de Chien, Hrones y Reswick son empleadas para sistemas que poseen cambios en la carga. Para poder sintonizar un controlador PID por este método, los parámetros a y L se determina de la misma forma que en el método Ziegler-Nichols, dándose los parámetros del controlador en función de estos valores. Los autores que han desarrollado estas fórmulas lo han hecho para un criterio de diseño de un 0% y para un 20% de sobreoscilación. Las fórmulas a las que han llegado son las mostradas en la **Tabla 5**.

Tabla 5. Cálculo de los parámetros PID mediante el método Chien, Hrones y Reswick.

Tipo de Controlador	Sin sobre oscilación			20% Sobreoscilación		
P		∞	0		∞	0
PI		$4*L$	0		$2,3*L$	0
PID		$2,4*L$	$0,42*L$		$2*L$	$0,42*L$

--	--	--	--	--	--	--

Se realiza la implementación del control PID de velocidad en Labview para el prototipo de mezclador de forma que se pueda analizar el cumplimiento de las especificaciones técnicas requeridas para este tipo de herramientas de laboratorio. En la **Figura 25** podemos observar el panel frontal desarrollado en Labview para el control de velocidad del motor AC implementado en el Mixer.

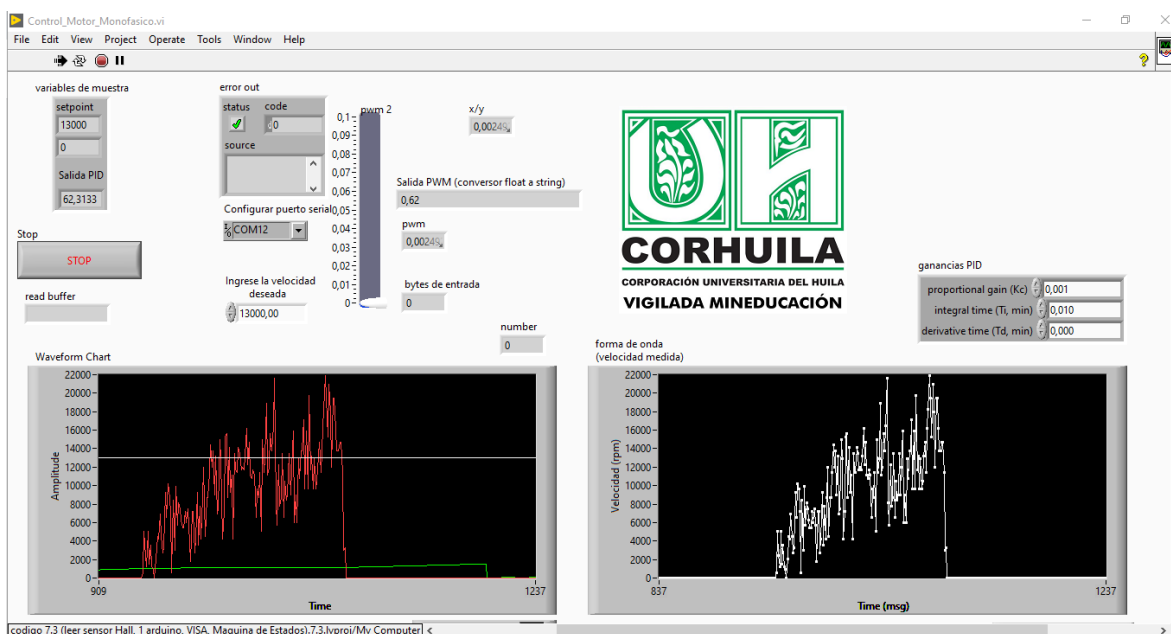


Figura 25. Panel frontal del VI desarrollado en Labview para el control de velocidad del motor AC del mixer.

En la **Figura 26** podemos observar el diagrama de bloques del programa implementado en Labview. Se utiliza una tarjeta Arduino para capturar mediante interrupción. Sin necesidad de contacto físico el sensor de efecto Hall se puede realizar para la medición de las vueltas que da el eje del motor AC por minuto. Esto permite que no tengan desgaste mecánico, aunque su alcance es limitado, normalmente unos pocos centímetros. Su principal ventaja es que son inmunes a ruidos y polvo. Esto los convierte en sensores fiables y duraderos.

En el diagrama de bloque podemos ver las conexiones para configurar el puerto serial, con el módulo de VISA que es el controlador de el puerto de comunicación serial a través del USB en la computadora. La configuración de VISA es automática, los parámetros se dejan en default y se genera el controlador para el parámetro «Visa Resource Name» que es el indicador del COM para la de comunicación Arduino LabVIEW. Al leer los caracteres del puerto serial con el VISA Read, estos se pueden mostrar en un indicador grafico mientras los datos son guardados en un archivo de Excel para guardar la información

obtenida. Esta es una parte importante de la comunicación Arduino LabVIEW. Se coloca un retardo para gestionar el control del flujo de datos. Se puede notar que estos están en función a un ciclo de control Switch Case. El cual está controlado por cada iteración del ciclo While.

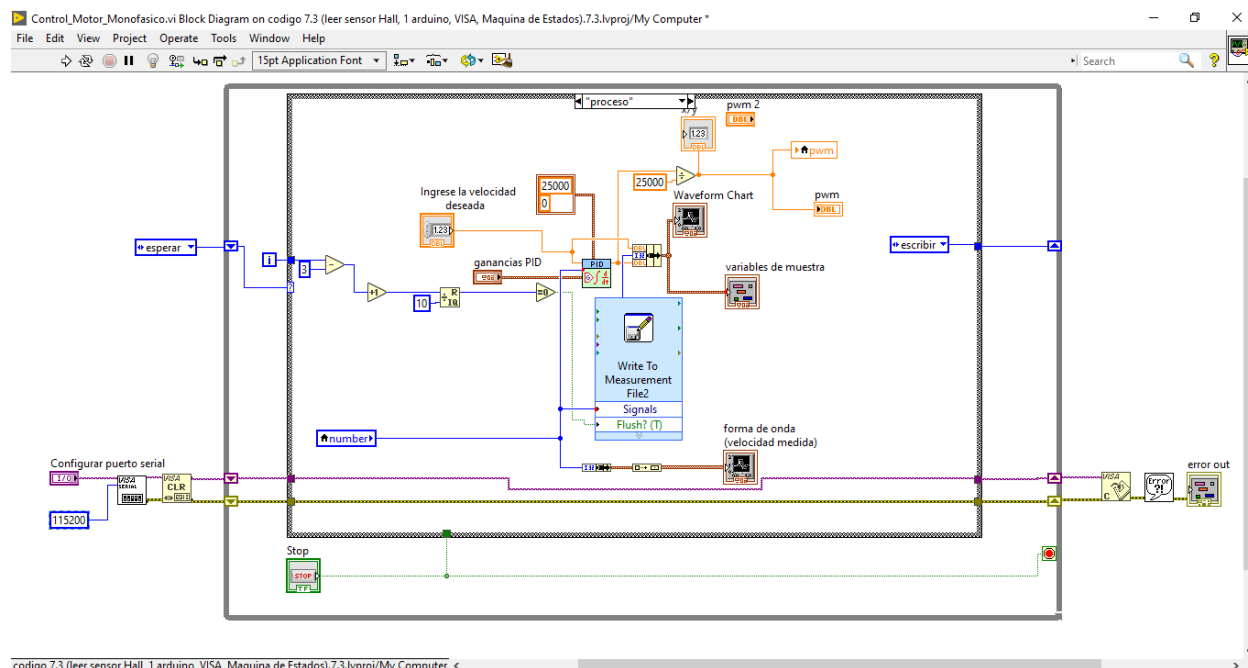


Figura 26. Diagrama de bloques del VI desarrollado en Labview para el control de velocidad del motor AC del mixer.

En la parte central del diagrama de bloques del VI se puede apreciar el bloque del control PID, el cual es ajustado con los valores determinados de la sintonización hecha en Matlab. Mediante un control numérico podemos introducir el valor de la velocidad deseada. Mediante los indicadores de control se puede analizar las constantes del control PID. Desde controles numéricos se puede observar sus valores y se puede modificarlos.

Después de estos pasos se realizan las correspondientes las pruebas y los ajustes necesarios para el correcto funcionamiento de control PID de velocidad para el prototipo de mezclador basados en las especificaciones técnicas suministradas. En el siguiente capítulo podemos ver los resultados obtenidos.

13 RESULTADOS

Observe que el tiempo de estabilización del controlador sintonizado con ZN es significativamente menor que el obtenido con las reglas de sintonización AH e CHR, mientras que el sobreimpulso con ese controlador también es mucho menor. Esto se logra con una acción de control menor que la obtenida con estos otros métodos. El método AH (después de la optimización del parámetro de diseño T_i) funciona de manera muy similar al controlador CHR; este método es particularmente adecuado para sistemas con la estructura de la planta determinada por el toolbox *ident* de Matlab. La peor respuesta la logra el controlador CHR como podemos observar en la **figura 27**. Los parámetros PID producidos por los tres métodos de ajuste diferentes se dan en la **Tabla 6**.

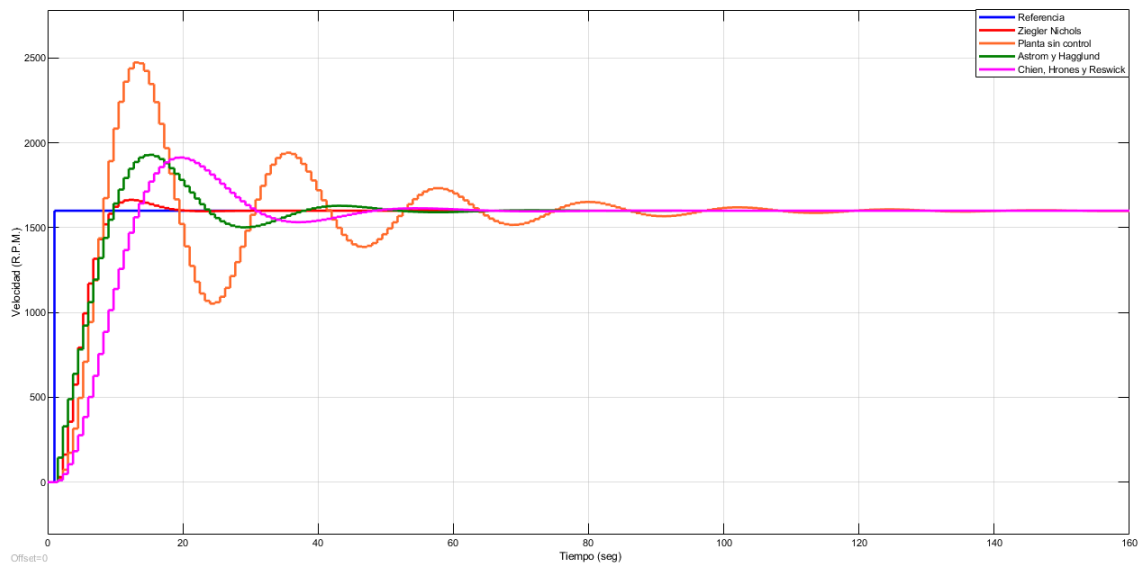


Figura 27. Respuesta de los diferentes controladores diseñados a una velocidad de referencia de 1.600 R.P.M. simulados en Matlab.

Tabla 6. Los parámetros PID obtenidos con los tres métodos de ajuste mediante simulación de la planta de control de velocidad hecha en Matlab.

Método de sintonización			
Ziegler Nichols	4.0588	9.2500	2.3125
Åström & Hägglund	4.4635	30.544 9	2.3231
Chien, Hrones y Reswick	3.6177	22.430	2.1824

		1	
--	--	---	--

Los valores obtenidos de la **figura 27** se pueden sintetizar en la **tabla 7**.

Tabla 7. Los parámetros PID obtenidos con los tres métodos de ajuste mediante simulación de la planta de control de velocidad hecha en Matlab.

Método de sintonización	ZN	A&H	CHR
Tiempo Máximo Pico (	13.25	16.25	20.5
Tiempo de establecimiento ()	4.4635	8.0	8.25
Máximo sobre impulso ()	100	340	330

En la **Figura 28**, se aprecia la implementación del control PID de la velocidad del Mixer. Consta de la aplicación en LabVIEW, el circuito de cruce por cero, el sensor de efecto hall para la adquisición de la velocidad del motor del mixer y la etapa de potencia del mismo.

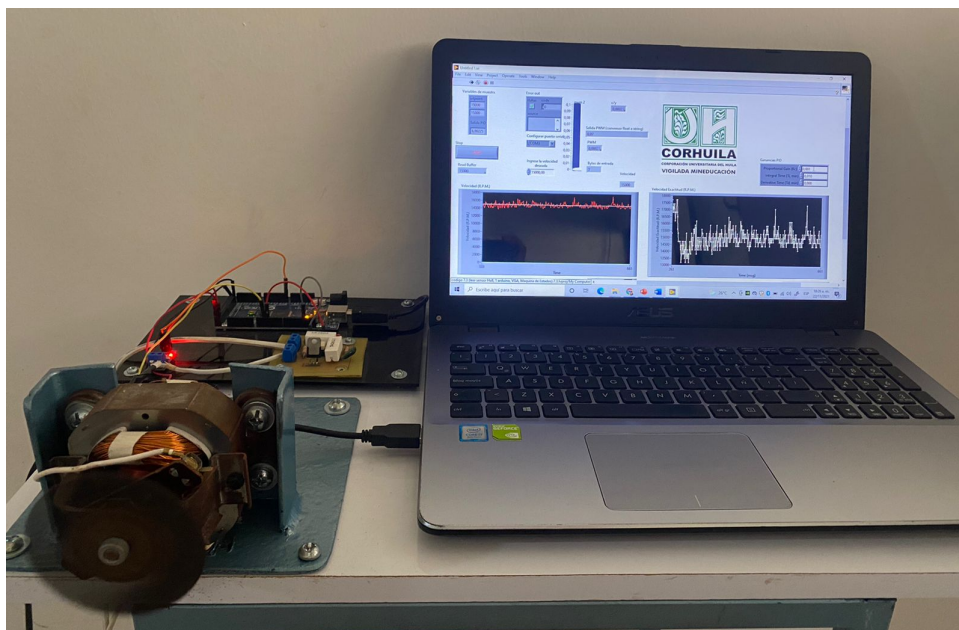


Figura 28. Control de velocidad del motor del Mixer implementado.

Las constantes del controlador PID obtenidas se aplicaron luego al controlador PID. Las respuestas del sistema de control para los puntos de ajuste de 12.500, 15,000 y 18.750 R.P.M se muestran en la **Figura 29**. Se encontró que los tiempos para lograr la estabilidad fueron 3, 4 y 5 s con tiempos de establecimiento de 7, 8 y 9 s, respectivamente. El sistema de control también tiene un sobreimpulso máximo de 345 rpm en el punto de ajuste de 24.000 rpm y el error de

estado estable de 335 rpm en el punto de ajuste de 15.000 rpm correspondientes a un error del 2,23%. Dado que tienen poco tiempo para lograr la estabilidad, significa que el sistema de control tiene una respuesta rápida y puede considerarse como un buen sistema de control [6].

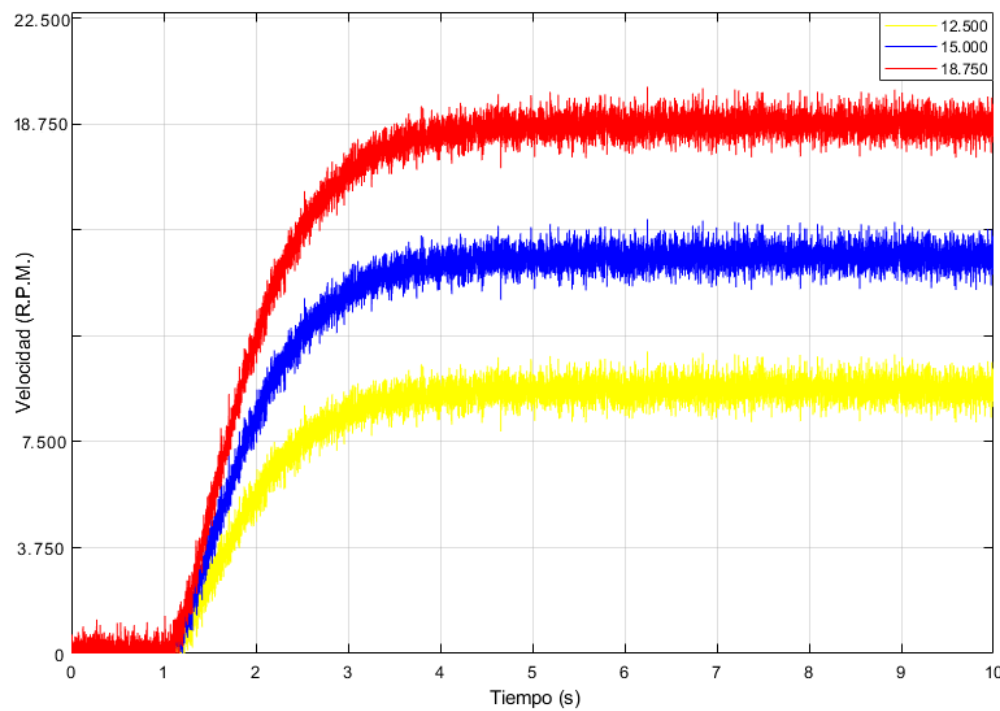


Figura 29. Las respuestas del sistema de control PID para los puntos de ajuste de 12.500, 15.000 y 18.750 R.P.M.

La **Figura 30**, muestra la inmunidad del sistema de control de velocidad cuando se le da una perturbación. El sistema de control se fijó a la velocidad de 15.000 R.P.M y se dio la perturbación de 1,5 s en el momento de 4 s. La velocidad del motor de corriente alterna se reduce al 73.33% de su velocidad inicial y se puede restaurar a su estado original en 3 s. Debido a su rápida restauración, se comprobó que el sistema de control está en rango admisible.

Otras pruebas se realizaron con otros rangos de velocidad, pero el sistema no se estabilizaba de manera efectiva, lo cual nos muestra lo que diversos autores han encontrado. El controlador PID se sintoniza para una velocidad específica, pero trabaja inapropiadamente cuando se aleja de ese punto de operación.

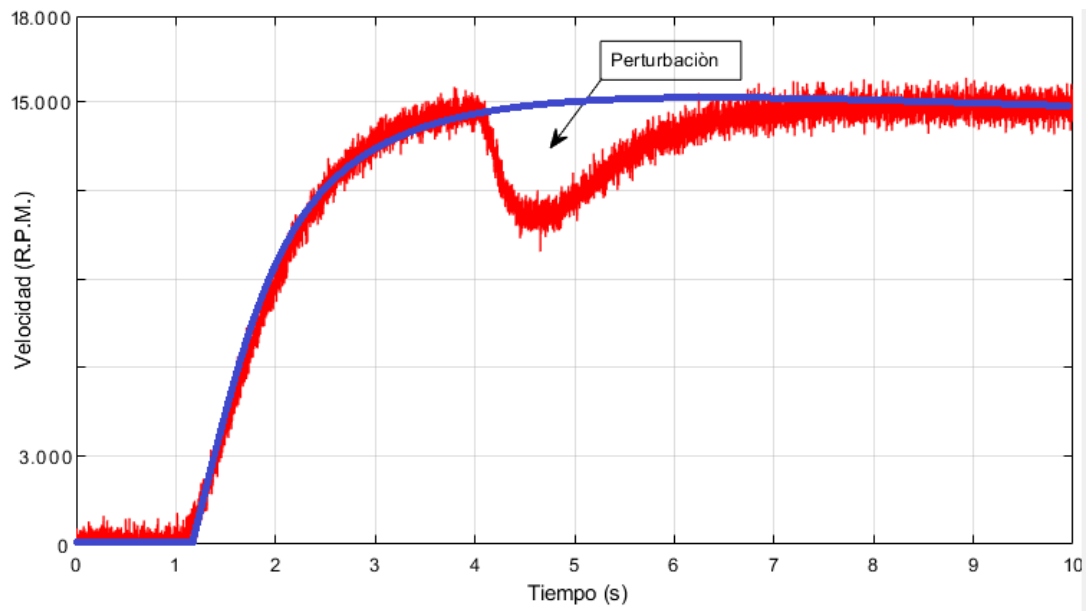


Figura 30. La respuesta del sistema de control con una perturbación.

14 DISCUSIÓN

Se describen los detalles del esquema, así como su implementación en un prototipo de laboratorio de control de velocidad de motor como en [14-20] y su desempeño real en respuestas estáticas y dinámicas. El esquema de control propuesto se implementa sobre el programa Labview, se utiliza el circuito Arduino Mega como tarjeta de adquisición de datos y para la aplicación del control sobre el motor, con ejecución en tiempo real del algoritmo. La velocidad de respuesta se logra simulando *o line* todos los posibles comportamientos del sistema identificado por el *ident* de Matlab, y almacenando los resultados del control en una tabla cuya dirección de búsqueda se construye a partir de las señales de entrada y salida del sistema. Los resultados sobre el prototipo muestran un excelente comportamiento del esquema de control frente a cambios rápidos en la referencia de velocidad en concordancia de otros autores como [31-35], donde la velocidad del motor de corriente alterna se reduce al 73.33% de su velocidad inicial y se puede restaurar a su estado original en 3 s..

15 CONCLUSIONES

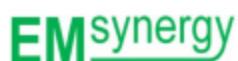
- Se logró el objetivo general del proyecto el cual era controlar la velocidad de un motor monofásico por medio del lenguaje de programación LabVIEW, comunicando la planta y el computador por medio de la tarjeta de desarrollo Arduino, permitiendo que los estudiantes en un futuro puedan realizar prácticas de laboratorio con motores AC y puedan aprender sobre los sistemas mecatrónicos en la industria.
- El sistema implementado funciona correctamente para computadores portátiles  computadores de escritorio, teniendo en cuenta en la máquina debe estar instalado el software LabVIEW y el driver de la tarjeta de adquisición Arduino, dando mayor flexibilidad y versatilidad al uso del motor AC.
- La ejecución y funcionamiento del controlador, permiten realzar las bondades que tiene usar el método difuso en distintas aplicaciones de control, ya que, una vez entendido el principio de funcionamiento, se comprende instantáneamente la facilidad que se tiene en diseñar, implementar y valorar el método diseñado.

16 RECOMENDACIONES

- Al conectar la tarjeta Arduino con el circuito Shield, inicialmente se debe cargar el Firmware en la tarjeta para poder conectarla. Segundo se debe abrir la interfaz de Labview y buscar el puerto COM al cual corresponde la tarjeta y finalmente presionar ejecutar. Al cerrar la aplicación presionar el botón de STOP de la interfaz, no el del programa, puesto que puede generar errores 
- En la implementación de controladores clásicos como los PID, se debe poseer conocimientos teóricos básicos, los cuales permitan realizar aplicaciones robustas ante las necesidades del cliente, ya que si no se ejecuta un procedimiento adecuado será más difícil de implementarlo y de hacer un mantenimiento de este.
- Se recomienda verificar siempre el estado del proceso de una máquina o proyecto a realizar, identificando los recursos que se tienen, y los datos que se enviarán durante su funcionamiento; con el objetivo de enfocar el desarrollo a partir de estas variables, como lo fue en nuestro caso el variador de frecuencia y los voltajes de alimentación de este. Dando así una idea clara de cómo poder controlar la velocidad del proceso, partiendo de su funcionamiento manual.

17 ANEXOS

Anexo A. Datasheet del motor del mixer



AC INDUCTION MOTOR DATA SHEET

General Specification

Model number	M800006
Outline dimension drawing	see figure 4
Nameplate data (1)	See figure 5
Rated frequency	50 Hz
Motor Location	Indoor
Altitude	Less than 1000 meters
Relative humidity	Less than 90%
Ambient Temp	40 degrees C (Max)
Duty Type	Continuous
Weight (approx.)	1.68 Kg
Inertia (approx.)	0.0766 mNm/Rad/sec^2
Friction torque (approx.)	8 mNm
Coupling method	Direct (2)
Terminal connection	Three phase cable (color coded)

Performance Data (1)

Rated Output	13.6 W
Number of poles	4
Rotor type	Squirrel Cage
Rated Voltage (line to line)	14.7 RMS
Maximum continuous phase current	0.91 RMS
Peak phase current : full load	1.83 A
Peak phase current: locked rotor	3.31 A
Efficiency: 50 % load	66 %
Efficiency :75 % load	61 %
Efficiency 100% load	49 %
Power factor (p.u) : 50 % load	0.60
Power factor (p.u) : 75 % load	0.75
Power factor (p.u) : 100 % load	0.82
Speed at full load	1121 RPM
Torque: full load	116 mNm
Torque : locked rotor	109 mNm

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Almatheel, Y. A., & Abdelrahman, A. (2017, January). *Speed control of DC motor using fuzzy logic controller. In 2017 International Conference on Communication, Control, Computing and Electronics Engineering (ICCCCEE) (pp. 1-8). IEEE.*
- [2] Padmanaban, S., Daya, F. J., Blaabjerg, F., Wheeler, P. W., Szczśniak, P., Oleschuk, V., & Ertas, A. H. (2016). *Wavelet-fuzzy speed indirect field oriented controller for three-phase AC motor drive—Investigation and implementation. Engineering Science and Technology, an International Journal, 19(3), 1099-1107.*
- [3] Huanhuan, G. (2017). *The Application of Fuzzy PID Control in Mixer Control System. Smart Factory.*
- [4] XIE, Y., & FU, Y. (2009). *Analysis of Saving Energy of Constant Speed Control system in Truck-mounted Concrete Mixer. Construction Machinery Technology & Management, 11.*
- [5] ZHAO, T. S., & CAI, Y. Q. (2005). *Design of hydraulic control system of concrete agitating lorry. Road Machinery & Construction Mechanization, 11.*
- [6] Kangale, S., Sampathkumar, B., & Mrunmayi, N. R. (2020). *Comparative Analysis Between Conventional and Neuro-Fuzzy Control Schemes for Speed Control of Induction Motor Drive. In Innovations in Electrical and Electronics Engineering (pp. 683-691). Springer, Singapore.*
- [7] Gupta, G., & Gaur, P. (2015, September). *Fuzzy logic controlled-power factor corrected bridgeless buck boost converter-fed brushless DC motor drive. In 2015 International Conference on Computer, Communication and Control (IC4) (pp. 1-6). IEEE.*

- [8] Harkouss, Y., Accouch, O., & Issa, H. (2013). Design and implementation of fuzzy control for batch-type asphalt plant. *International Journal of Internet Manufacturing and Services*, 3(2), 148-164.
- [9] Kholerdi, H. A. (2016). Chaotification and fuzzy PI control of three-phase induction machine using synchronization approach. *Chaos, Solitons & Fractals*, 91, 443-451.
- [10] GANDI, S. S. H., VIVEK, V., & RAVISHANKAR, R. (2016). PFC Cuk Converter Fed BLDC Motor Drive using PI and Fuzzy Controller.
- [11] Liu, M. S., & Zhou, Y. (2007, August). Application of artificial intelligence technology in asphalt concrete mixer control system. In *Fourth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD 2007) (Vol. 4, pp. 159-163)*. IEEE.
- [12] Rakhmawati, R., Murdianto, F. D., & Syah, G. T. I. (2018, September). Performance Evaluation of Speed Controller Permanent DC Motor in Electric bike Using Fuzzy Logic Control System. In *2018 International Seminar on Application for Technology of Information and Communication (pp. 110-115)*. IEEE.
- [13] Xu, D., Wang, B., Zhang, G., Wang, G., & Yu, Y. (2018). A review of sensorless control methods for AC motor drives. *CES Transactions on electrical machines and systems*, 2(1), 104-115.
- [14] Zhang, X., Wang, B., Yu, Y., Zhang, J., Dong, J., & Xu, D. (2020). Analysis and optimization of current dynamic control in induction motor field-weakening region. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 35(9), 8860-8866.
- [15] Usama, M., & Kim, J. (2020). Vector control algorithm based on different current control switching techniques for Ac motor drives. *arXiv preprint arXiv:2005.04651*.

