



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE AUTOSINTONÍA DE
PARÁMETROS DE CONTROL PID EN UN BOBINADOR PARA EL CONTROL DE TENSIÓN
Y MEJORA EN LA EFICIENCIA ENERGÉTICA**

Luis Alfredo Salazar Peralta

Asesorado por el MSc. Ing. Gerson Armando Arredondo Pérez

Guatemala, febrero de 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE AUTOSINTONÍA DE
PARÁMETROS DE CONTROL PID EN UN BOBINADOR PARA EL CONTROL DE TENSIÓN
Y MEJORA EN LA EFICIENCIA ENERGÉTICA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

LUIS ALFREDO SALAZAR PERALTA
ASESORADO POR EL MSC. ING. GERSON ARMANDO ARREDONDO
PÉREZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, FEBRERO DE 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Christian Moisés de la Cruz Leal
VOCAL V	Br. Kevin Armando Cruz Lorente
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Julio González Podszueck
EXAMINADOR	Ing. Luis González López
EXAMINADOR	Ing. Julio Roberto Urdiales
EXAMINADOR	Ing. Miguel Ángel Sánchez Guerra
SECRETARIO	Ing. Francisco González López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE AUTOSINTONÍA DE
PARÁMETROS DE CONTROL PID EN UN BOBINADOR PARA EL CONTROL DE TENSIÓN
Y MEJORA EN LA EFICIENCIA ENERGÉTICA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 30 de abril de 2019.

Luis Alfredo Salazar Peralta

Guatemala, 30 de abril de 2019.

Director
Otto Fernando Andrino González
Escuela de Ingeniería Eléctrica
Presente.

Estimado Director:

Reciba un atento y cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado. El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado los cursos aprobados del primer año y el Diseño de Investigación del (la) estudiante **Luis Alfredo Salazar Peralta** carné número **8811956**, quien opto la modalidad del "PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO". Previo a culminar sus estudios en la Maestría en Energía y Ambiente.

Y si habiendo cumplido y aprobado con los requisitos establecidos en el normativo de este Proceso de Graduación en el Punto 6.2, aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Decimo, Inciso 10.2, del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011, firmo y sello la presente para el trámite correspondiente de graduación de Pregrado.

Sin otro particular, atentamente,

Maestro. Ing. Gerson Armando Arredondo P.
Asesor (a)

Gerson Armando Arredondo Pérez
Ingeniero Electricista
Colegiado No. 14,032

"Id y Enseñad a Todos"

Maestro. Ing. Juan Carlos Fuentes M.
Coordinador de Área
Desarrollo Socio-Ambiental y Energético

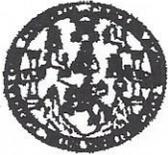


Maestro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotti
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería



Cc archivo/L.Z.L.A.

RESOLUCIÓN DE JUNTA DIRECTIVA: Proceso de Graduación aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Decimo, Inciso 10.2, del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011.



FACULTAD DE INGENIERIA

REF. EIME 29.2019.
23 DE MAYO 2019.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y visto bueno del revisor y la aprobación del Área de Lingüística de su Proyecto de Graduación en la modalidad Estudios de Pregrado y Postgrado titulado: **IMPLEMENTACIÓN DE AUTO SINTONÍA DE PARÁMETROS DE CONTROL PID EN UN BOBINADOR, PARA EL CONTROL DE TENSION Y MEJORA EN LA EFICIENCIA ENERGÉTICA** presentado por el estudiante universitario; Luis Alfredo Salazar Peralta, considerando que el protocolo es viable para realizar el Diseño de Investigación procedo aprobarlo, ya que cumple con los requisitos establecidos por la Facultad de Ingeniería.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

Ing. Otto Fernando Andriño González
Director

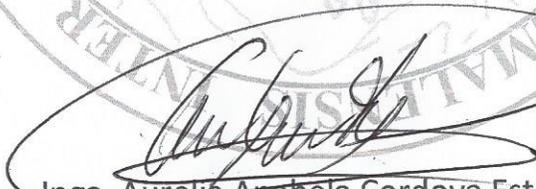
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica





La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE AUTOSINTONÍA DE PARÁMETROS DE CONTROL PID EN UN BOBINADOR PARA EL CONTROL DE TENSIÓN Y MEJORA EN LA EFICIENCIA ENERGÉTICA** presentado por el estudiante universitario: **Luis Alfredo Salazar Peralta**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada

Decana



Guatemala, febrero de 2020

AACE/asga

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por ser mi salvador, mi roca fuerte y mi refugio.
Mis padres	Genaro Salazar y Leonarda Peralta de Salazar por su amor, paciencia y apoyo incondicional.
Mis hijos	Anderson, Cesia y David Salazar Hidalgo por ser herencia de Jehová.
Mis hermanos	Reina Isabel y Arístides Salazar por estar allí siempre.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Porque para siempre es su misericordia.
Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser mi casa de estudios.
Facultad de Ingeniería	Por la enseñanza recibida.
Mis sobrinos	Por animarme en todo tiempo.
Mi familia en general	Por su apoyo.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XI
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	5
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	9
4. JUSTIFICACIÓN	13
5. OBJETIVOS	15
5.1. Objetivo general	15
5.2. Objetivos específicos.....	15
6. NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN	17
7. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL.....	19
7.1. Teoría elemental de control	19
7.2. Sistemas de control	19
7.2.1. Objetivos de control	20
7.3. Estrategias de control.....	20
7.3.1. Control sin retroalimentación	21

7.3.2.	Control con retroalimentación.....	22
7.3.3.	Elementos básicos	23
7.3.4.	Comparaciones	24
7.3.5.	Función de transferencia	24
7.3.6.	Ganancia de transferencia sin retroalimentación	25
7.3.7.	Ganancia de transferencia con retroalimentación ...	26
7.3.8.	Función impulso	28
7.3.9.	Diagrama de bloques	30
7.4.	Sistema de control PID.....	32
7.4.1.	Acción on – off.....	32
7.4.2.	Control proporcional	35
7.4.3.	Control integral	36
7.4.4.	Control derivativo	36
7.4.5.	Control PI	37
7.4.6.	Control PD.....	38
7.4.7.	Control PID.....	38
7.5.	Sintonía de control PID	39
7.5.1.	Método de sintonía Ziegler – Nichols	40
7.5.2.	Método de sintonía por amplitud y fase (método del relay o relevador).....	41
7.6.	Variadores de frecuencia Control Techniques M700	45
7.6.1.	Descripción general.....	46
7.6.2.	Configuración de parámetros	48
7.6.3.	Métodos de programación.....	52
7.6.4.	Módulos opcionales de programación	53
7.7.	Bobinadores	55
7.7.1.	Bobinador de centro	55
7.7.1.1.	Componentes básicos.....	57
7.7.1.2.	Aplicaciones	58

	7.7.1.3.	Dimensionamientos básicos	58
	7.7.1.4.	Estrategias de control	59
8.	ÍNDICE PROPUESTO.....		63
9.	MÉTODOS Y TÉCNICAS.....		67
	9.1.	Tipo de estudio	67
	9.2.	Variables.....	67
	9.3.	Fases de estudio	67
	9.3.1.	Fase 1: exploración bibliográfica	67
	9.3.2.	Fase 2: recolección de datos y casos.....	68
	9.3.2.1.	Bobinador experimental.....	68
	9.3.2.2.	Implementación de algoritmo.....	70
	9.3.2.3.	Medición del tiempo de respuesta del algoritmo	71
	9.3.2.4.	Medición de tensión.....	71
	9.3.2.5.	Medición de eficiencia energética.....	74
	9.3.2.6.	Cálculo del beneficio ambiental	75
	9.3.3.	Fase 3: interpretación de resultados.....	75
10.	TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN.		77
11.	CRONOGRAMA.....		79
12.	FACTIBILIDAD DE LA INVESTIGACIÓN.....		81
13.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		83

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Sistema de motor de combustión y planta generadora de energía	20
2.	Subsistemas de un lazo abierto	21
3.	Componentes de control retroalimentado	22
4.	Ganancia control no retroalimentado	25
5.	Ganancia de lazo cerrado	26
6.	Gráfica de la función impulso	28
7.	Definición función Impulso	28
8.	Transformada de función Impulso	29
9.	Lazo cerrado con ganancia aplicando Laplace	29
10.	Operaciones de bloques serie – paralelo	31
11.	Transposición de sumadores	31
12.	Transposición de bifurcación.....	32
13.	Diagrama de bloques controlador on-off	33
14.	Diagrama de bloques control on-off diferencial	34
15.	Característica de horno eléctrico, control on-off	34
16.	Bloques control proporcional.....	35
17.	Bloques controlador PI	38
18.	Oscilaciones sostenidas con período P_{cr} (P_{cr} se mide en segundos)..	40
19.	Método de sintonización Astrom-Hagglund, método del relevador	43
20.	Ejemplo aplicación del método del Relé, $d=2$	44
21.	Relevador con histéresis	45
22.	Variador de frecuencia Control Techniques M700	47
23.	Teclado de control variador M700	48

24.	Estructura de menú - parámetros variador M700.....	49
25.	Muestra de parámetros de menú 5, variador M700	50
26.	Estructura de bloques, menú 04, variador M700	51
27.	Software de programación Machine Edition Studio	53
28.	Módulo Mci210.....	55
29.	Esquema de bobinador de centro con balancín.....	57
30.	Bobinador de centro con celda de carga	60
31.	Diagrama de bloques de control de bobinador	61
32.	Representación de un bobinador de centro	69
33.	Esquema de bobinador de centro	69
34.	Software de programación Machine Control Studio.....	70
35.	Potenciómetro para la medición del desplazamiento.....	72
36.	Osciloscopio digital con software CTScope	73
37.	Cronograma de actividades	79

TABLAS

I.	Criterios Ziegler - Nichols para ganancia crítica y periodo crítico	41
II.	Tiempo de respuesta del algoritmo a diferentes diámetros	71
III.	Variación de tensión con valores PID aleatorios.....	72
IV.	Variación de tensión con valores PID obtenidos por el algoritmo	73
V.	KWh de consumo con valores aleatorios de control PID	74
VI.	KWh de consumo con valores de control PID proporcionados por el algoritmo	75
VII.	Descripción de inversión para la investigación	81

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
Hp	Caballos de fuerza
π	Constante pi
LD	Diagrama de escalera
CO2	Dióxido de carbono
θ	Entrada – salida de bloque de función
e	Error
G, H	Función de transferencia, ganancia de bloque
$\delta(t)$	Función impulso
K_{cr}	Ganancia crítica
K_d	Ganancia derivativa
K_i	Ganancia integral
K_p	Ganancia proporcional
ε	Histéresis
kW	Kilowatt
kWh	Kilowatt hora
Lb	Libras
IL	Lista de instrucciones
MWh	Megawatt hora
M	Metros
mpm	Metros por minuto
μs	Microsegundo
N	Newtons
P_{cr}	Periodo de oscilaciones en ganancia crítica

<i>Fpm</i>	Pies por minuto
PID	Proporcional integral y derivativo
ST	Texto estructurado
<i>T_d</i>	Tiempo derivativo
<i>T_i</i>	Tiempo integral

GLOSARIO

Balancín o dancer	Pieza o barra dotada de un movimiento oscilatorio que regula, generalmente, otro movimiento, le da un sentido o amplitud diferente.
Bobinador	Un bobinador enrolla un material, tal como alambre de metal, hilo o papel sobre un núcleo, carrete o bobina.
CAM	Movimiento de leva excéntrica.
Control PID	Es un mecanismo de control simultáneo por realimentación ampliamente usado en sistemas de control industrial. Este calcula la desviación o error entre un valor medido y un valor deseado.
Corriente alterna	La corriente alterna (CA) es un tipo de corriente eléctrica en la que la dirección del flujo de electrones va y viene a intervalos regulares o en ciclos.
Corriente directa	La corriente continua o directa (CD) es la corriente eléctrica que fluye de forma constante en una dirección, como la que fluye en una linterna o en cualquier otro aparato con baterías es corriente continua.

FBD	Diagrama de bloques de función.
Función de transferencia	Es un modelo matemático que a través de un cociente relaciona la respuesta de un sistema con la señal de entrada o excitación.
PLC	Controlador lógico programable.
RPM	Revoluciones por minuto.
SFC	Tabla de función secuencial.
Sintonía de control PID	Búsqueda de los valores de las ganancias proporcional, integral y derivativa que tengan el mejor desempeño en el lazo de control.
Variador de frecuencia	Equipo electrónico utilizado para el control de la velocidad de rotación de un motor de corriente alterna, por medio del control de la frecuencia de alimentación suministrada al motor.

RESUMEN

El proceso de sintonía de controladores PID puede realizarse por medio de ensayo y error o, también, por medio del conocimiento de la función de transferencia del sistema.

Diferentes autores plantean métodos distintos para implementar este tipo de control con los valores de ganancias proporcionales, integrales y derivadas óptimas para las diferentes aplicaciones.

Algunos métodos de mayor facilidad que otros o de menores consecuencias para el sistema en estudio. La experiencia de la persona es importante para una correcta implementación.

Este tipo de controlador se encuentra en multitud de aplicaciones, tales como: temperatura, velocidad, posición, tensión, presión, nivel por mencionar algunos. Y cada una de estas aplicaciones con sus respectivos valores de las ganancias proporcionales, integrales y derivadas.

El estudio pretende aplicar este controlador en el proceso de enrollado (bobinado) de material para el control de la tensión de dicho material mientras se bobina.

La implementación es por medio de un variador de frecuencia con capacidad de programación en diferentes lenguajes que se utiliza para variar la velocidad de un motor encargado de bobinar o enrollar dicho material.

El proceso de medición de tensión se realiza en una forma indirecta midiendo el desplazamiento de un balancín cuya posición es modificada por la tensión presente en el material que se está bobinando.

Se genera un algoritmo que mide parámetros requeridos para determinar valores de ganancia proporcionales, integrales y derivadas sugeridos como valores iniciales para el control de la tensión. Este algoritmo se programa en el variador de frecuencia con el software suministrado por el fabricante.

Finalmente, se muestra el resultado de la implementación del algoritmo, así como los consumos de energía eléctrica requeridos durante el proceso.

1. INTRODUCCIÓN

Existen diferentes procesos en la industria en los cuales es necesario controlar la tensión en los procesos de enrollado o bobinado de diferentes materiales. Generalmente, estos procesos están supervisados por controladores PID (Proporciona, Integral, Derivativo) a los cuales es necesario ajustar los valores de ganancia proporcionales, integrales y derivadas para el mejor desempeño del control. Lamentablemente, esto requiere conocer la función de transferencia del sistema la cual no siempre es conocida.

Esto deriva en que los valores de las ganancias sean establecidos por método de ensayo y error con el consecuente consumo de tiempo y pérdida de producción durante el ajuste. En los variadores de frecuencia que se utilizan para variar las revoluciones del motor que se emplean en los enrolladores o bobinadores, generalmente cuentan con la función de control PID, no así, una función de auto parametrización o sintonización del controlador.

Los variadores de frecuencia de alta gama cuentan con la funcionalidad de programación interna o con la opción de módulos adiciones que permiten programación avanzada en diferentes lenguajes de programación. Con esta opción disponible es posible implementar algoritmos que facilitan la sintonización de los parámetros del controlador. El resultado de este estudio será un algoritmo que sea implementado para la auto sintonización de los parámetros PID del controlador por medio del método del relevador o relay para un determinado material durante el proceso de enrollado con un diámetro de rollo no mayor a 10 pulgadas de diámetro y ancho del material no mayor a 1 pulgada.

Los resultados obtenidos de esta implementación serán la reducción de tiempo en la puesta en marcha para ese sistema de control de bobinador, así como la consecuente reducción de material de desperdicio durante el proceso de sintonización del controlador. También se verificará la eficiencia energética del proceso con los parámetros sintonizados por este algoritmo contra parámetros aleatorios del controlador y observar el ahorro de energía durante el proceso de enrollado.

Para la realización de este estudio se utilizará un bobinador experimental para rollos con las dimensiones dadas anteriormente. Se utilizarán variadores de frecuencia programables con módulos opcionales de control. También se cuenta con software suministrado por el fabricante de los equipos para graficar los diferentes valores requeridos por este estudio. Se realizarán pruebas de enrollado con las dimensiones ya mencionadas, durante el proceso se realizarán graficas de los valores tales como tensión, velocidad, corriente, consumo kW. El bobinador experimental contará con un sistema de dancero o balancín que está equipado con un contrapeso, la tensión será medida en forma indirecta por medio del desplazamiento de este balancín y dicho desplazamiento graficado por el software. Los variadores de frecuencia que se utilizarán en este estudio cuentan con la medición de kWh que se requiere para determinar el consumo de energía durante el proceso.

En el capítulo 1 se presentará una revisión bibliográfica sobre los fundamentos teóricos del tema y los conceptos básicos. En el capítulo 2 se realizará un dimensionamiento básico del bobinador experimental. Se realizará la implementación básica del algoritmo de control en el variador de frecuencia utilizando el software de programación de los equipos utilizados. También se realizarán las pruebas experimentales y la recopilación de datos. En el capítulo 3, se analizarán los resultados obtenidos, se calculará la eficiencia energética y

se realizará discusión de resultados. Finalmente, se presentarán las conclusiones obtenidas del estudio y las recomendaciones pertinentes.

2. ANTECEDENTES

En Guatemala son aplicados los controladores automáticos de procesos con lazo abierto y lazo cerrado de control, sus aplicaciones son diversas desde controles de nivel, temperatura hasta controles de movimiento y tensión. Todos estos por lo general basados en el controlador PID.

Según la publicación *Métodos de sincronización de controladores pid que operan con servo mecanismos* (Ruiz, 2003), las técnicas de sintonización de controladores PID generalmente se realizan por métodos experimentales, o conociendo la dinámica del proceso en cuestión.

En la publicación *Diseño del controlador pid* (Cantarero, 2002), muchas veces en los procesos de control en la industria no se conoce la relación de transferencia de la aplicación necesaria para poder determinar los valores de ajustes del control PID. En la actualidad, existen controladores en módulos compactos donde los distintos parámetros pueden ser ajustados manualmente. Muchos de los equipos ofrecidos hoy cuentan con la opción de auto sintonía, controladores, principalmente, aplicados a lazos de control de temperatura.

En la publicación *Automatic tuning of simple regulators with specifications on phase and amplitude margins* (Aström & Hägglund, 1984), el controlador PID, si bien tiene un amplio uso industrial, no es utilizado correctamente en algunas aplicaciones. Esto trae como resultado que sistemas de control, que pueden proporcionar resultados satisfactorios, operen insatisfactoriamente.

En la publicación Controladores pid, ajuste empirico (Morilla, 2006), las principales causas de mala operación del control son:

- “Ajustes inadecuados de los parámetros de control: un buen número de los controles instalados en la industria son sintonizados manual mente, sin realizar un estudio de las características del proceso. Parametrizando el controlador de este modo puede proporcionar buenos resultados según el conocimiento de operación. La obtención de un ajuste manual satisfactorio puede resultar una tarea difícil para la persona que trata de implementar este tipo de controlador” (Morilla, 2006).
- Otro factor de mal funcionamiento es la errónea elección del actuador. Dimensionamientos erróneos, fricciones, histéresis, entre otros, pueden ser causa de mal funcionamiento del sistema.
- Los sensores influyen cómo se comporta el sistema. En muchas aplicaciones no se filtra la señal recibida mezclada con ruido asociado a las señales eléctricas.

Como se mencionó anteriormente, muchos de los controladores existentes cuentan con ajustes de auto sintonía de sus parámetros. Por lo general, estos controladores no son aplicados a los sistemas de control de tensión de sistemas de enrollado o bobinadores de material plástico.

En la publicación *A frequency response based adaptive control for center driven web winders* (Zhijun, 2002), este tipo de control se ha implementado en diferentes equipos por medio de un controlador lógico programable (PLC). En este estudio se muestra una técnica de auto sintonía de los parámetros PID del controlador basado en un modelo matemático del proceso, que, por lo general,

los datos de la maquinaria no están disponibles, así como el escaso tiempo que se tiene durante el proceso de puesta en marcha de los equipos.

En esta investigación se implementará un sistema de auto sintonía de parámetros PID del controlador de tensión para un bobinador de centro, aprovechando las ventajas de programación de los variadores de frecuencia *control echniques*.

En la publicación Programa integral de asistencia tecnica y capacitacion para la formacion de especialistas en ahorro y uso eficiente de energia electrica de Guatemala (CNEE, 2010), los variadores de frecuencia han sido aplicados ampliamente en sistemas de bobinadores de material plástico en sustitución de motores de corriente directa, ampliamente utilizados con anterioridad hasta el advenimiento del variador de frecuencia con mejores prestaciones y técnicas que mejoran la estabilidad del control de revoluciones y control del torque producido por el motor.

El trabajo contempla la implementación de la auto sintonía de parámetros PID por la implementación del meto del relevador, primeramente, mencionado por Aströn & Hägglund (1984), al control de tensión de un bobinador de centro, utilizando las técnicas de programación disponibles en los variadores de frecuencia *control techniques* e implementando dicha técnica en un bobinador de prueba experimental.

En la publicación *A frequency response based adaptive control for center driven web winders* (Zhijun, 2002), la implementación de algoritmos de auto sintonía inicial por el método de amplitud y fase han mostrado resultados satisfactorios en determinar los parámetros PID iniciales de operación de un control de tensión con variaciones menores al 10 % de la tensión fijada.

En la publicación *Experimental evaluation of automatic tuning of pid controllers for an electro-mechanical system* (Wang, Freeman, & Rogers, 2017), la técnica de auto sintonía por el método de amplitud y fase o relevador, se ha implementado satisfactoriamente en sistemas electromecánicos experimentales con resultados satisfactorios de alto desempeño en la aplicación experimental.

Según la publicación *Diseño del controlador pid* (Cantarero, 2002), el método de amplitud y fase o relevador, también es beneficioso, ya que permite tener control de las oscilaciones del proceso y según los valores que utilizemos no se ve afectado por las señales de ruido o perturbaciones de la señal de control.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Existen diferentes equipos de control en el mercado, con los cuales se puede realizar control PID en diferentes aplicaciones. Generalmente estos controladores no cuentan con función de auto sintonía de los parámetros PID del controlador o son adquiridos como opcionales en los paquetes de software de programación incrementando así su costo. Los valores de las ganancias proporcionales, integrales y derivadas del controlador deben ser ajustados a la mejor condición de operación del sistema, evitando con esto variaciones en el control del proceso que realizan. Diferentes métodos han sido implementados por diferentes autores, algunos más complejos que otros, requiriendo mayor capacidad de cómputo, así como el conocimiento del personal que los puede implementar.

Usualmente, durante la puesta en marcha de un sistema de control de tensión para un bobinador no se dispone de tiempo suficiente para realizar ajustes por ensayo y error, ya que esto conlleva a generar desperdicio del producto, así como bajas velocidades de producción. La experiencia del técnico o ingeniero encargado de la puesta en marcha es apreciada en estos casos, pero no es decisiva para determinar los ajustes más precisos que garanticen la correcta operación del sistema.

Dependiendo del nivel del técnico y de las herramientas con las que cuenta, así también será el tiempo requerido para implementar estos sistemas de control. Las variaciones en la tensión del bobinador pueden conducir a que el producto final no se encuentre conforme a normas de calidad en mercados más exigentes, cerrando la oportunidad de alcanzar mejores mercados de

exportación. Existen también disponibles softwares especializados en la sintonización de los parámetros de ganancia del control PID con la consecuente inversión por la compra de los mismos, así como el entrenamiento para una correcta utilización de estas herramientas.

Las nuevas tecnologías han permitido la creación de variadores de frecuencia con características más allá de ser un simple variador de la frecuencia suministrada a un motor. Implementando en algunas marcas y modelos técnicas de programación bajo la norma IEC 61131-3, otros en programación escalera y otros en programación de texto estructurado. La utilización de variadores de corriente alterna se ha extendido grandemente dadas las nuevas prestaciones, su uso en bobinadores de todos los tamaños ha reemplazo gran parte de los sistemas DC que antiguamente dominaban este tipo de aplicaciones. Los variadores de corriente directa utilizados en el control de motores DC, tienen la particularidad de operar con factores de potencia bajos, incrementando la corriente en el sistema, con el incremento consecuente de las pérdidas en cables, transformadores, y los demás componentes del sistema de distribución, haciendo por este lado, menos eficiente los sistemas de DC con variador. Los motores DC también requieren un mantenimiento poco más esmerado, ya que cuentan con escobillas y conmutadores que requieren mantenimiento periódico y cierto grado de dedicación para prolongar el tiempo de vida de estos motores, generando costos de mantenimiento adicionales si los comparamos con un motor de corriente alterna.

Los sistemas de producción actual, así como las velocidades a las cuales operan, requieren técnicas de sintonía de parámetros del controlador PID con un bajo margen de error para la correcta operación; con esto evitar variaciones en la tensión del producto cuando es bobinado. Se requiere que la técnica que se implemente pueda ser utilizada nuevamente y, de esta manera, reducir los

tiempos de desarrollo de las aplicaciones de este tipo. La implementación también debe ser de fácil comprensión para el ingeniero o técnico encargado de la puesta en marcha, así como permitir ajustar los parámetros en forma manual de ser necesario. Los sistemas de control de tensión originales estaban implementados con motores de corriente directa con un suministro variable por medio de un variador DC. Estos equipos operan, generalmente, con factores de potencia bajos, incrementando la corriente que requieren para su operación, esto produce calentamiento en cables y transformadores, además de posibles penalizaciones por bajo factor de potencia. Las nuevas tecnologías permiten el empleo de nuevos materiales y formas de construcción de los motores de corriente alterna, produciendo motores de corriente alterna con eficiencias superiores al 95 % y los variadores de corriente alterna con factores de potencias cercanos a 100 %.

Esto lleva a plantear la pregunta principal de este estudio: ¿Es factible establecer un algoritmo de auto sintonía de parámetros de control PID utilizando un variador de frecuencia *control techniques* M700 programable en un bobinador experimental por el método de fase y margen de amplitud para el control de tensión y mejorar la eficiencia energética?

Para responder a esta interrogante se deberán contestar las siguientes preguntas auxiliares:

- ¿Qué tiempo le toma al sistema de control realizar la auto sintonía de parámetros del controlador PID?
- ¿Cuánto se reducirá la variación de tensión al implementar el algoritmo de auto sintonía para un controlador de tensión de un bobinador?

- ¿En qué medida mejora la eficiencia energética mediante la implementación de un algoritmo de auto sintonía para control de tensión con los valores calculados por este algoritmo?
- ¿Cuánto es el beneficio energético con la implementación del algoritmo de auto sintonía?

4. JUSTIFICACIÓN

La realización de la investigación se justifica en la línea de investigación de gestión y uso eficiente de la energía de la maestría en energía y ambiente.

El ahorro energético es un punto importante actualmente en la mayoría de las empresas, así como la reducción de tiempos de producción y tener un mínimo de material de desperdicio para reproceso. La implementación de nuevas técnicas de control está relacionada con las políticas de ahorro energético adoptadas por las empresas y sus metas de reducción de costos.

El método de auto sintonía de parámetros de controladores PID proporciona ajustes más exactos para la operación de dichos controles, reduciendo el tiempo de ajuste invertido con las técnicas de ensayo y error. Parámetros más exactos proporcionan controles más precisos, reduciendo la cantidad de material no conforme, evitando el reproceso y, por consiguiente, reduciendo el consumo energético requerido en reprocesar nuevamente estos productos, con el beneficio ambiental que esto conlleva.

Este trabajo presentará una investigación de la técnica de auto sintonía en un bobinador experimental para determinar el procedimiento de implementación de esta técnica en un equipo de control utilizado en este tipo de aplicación.

Con esta investigación se realizará una herramienta de ajuste automático para los parámetros de un controlador PID aplicado a un control de tensión de un bobinador. Obteniendo los beneficios de ahorro en tiempo de implementación, ya que el algoritmo de control implementado reducirá el tiempo

requerido para obtener los parámetros del controlador PID. Reducción de material de desperdicio al tener los parámetros de control adecuados al proceso y valores de tensión más estables, reduciendo la cantidad de producto no conforme al estándar de producción o del cliente. Reduciendo el consumo energético, ya que las cantidades de material no conforme al estándar de producción son menores no siendo necesario reprocesar estos ahorrando energía.

Al finalizar este estudio, los resultados obtenidos serán de beneficio para todas aquellas personas relacionadas con este tipo de aplicación de control de tensión, también serán beneficiadas aquellas empresas que en sus procesos de fabricación utilizan bobinadores con control de tensión al incrementar la calidad de los productos. Se tendrán beneficios ambientales ya que las cantidades de materiales de desperdicio y costos energéticos por reproceso son reducidos.

5. OBJETIVOS

5.1. Objetivo general

Determinar la mejora en el control de tensión y ahorro energético en un bobinador experimental al aplicar auto sintonía de los parámetros PID del controlador del bobinador por el método de fase y margen de amplitud.

5.2. Objetivos específicos

- Determinar el tiempo que le toma al algoritmo de auto sintonía encontrar los parámetros para la operación del control PID.
- Determinar la variación de tensión al implementar el algoritmo de auto sintonía para un controlador de tensión de un bobinador.
- Determinar la eficiencia energética al implementar el algoritmo de auto sintonía para control de tensión con los valores calculados por este algoritmo.

6. NECESIDADES POR CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN

El trabajo de investigación contribuirá como una alternativa para poder determinar los parámetros PID de un control de tensión para un bobinador experimental. El resultado de este trabajo serán los lineamientos para implementar un sistema de auto sintonía para los parámetros PID del controlador de tensión.

El bobinador experimental será fabricado como parte del presente estudio para realizar las pruebas del algoritmo de control generado en este estudio. La función principal de este algoritmo es generar los parámetros del controlador PID para mantener una tensión estable durante el proceso de bobinado del material con una variación de tensión no mayor al 20 %. La medición de la tensión se realizará en una forma indirecta por medio de un balancín con un peso establecido midiendo el desplazamiento del mismo y registrando dicha variación.

Las pruebas de tensión para este bobinador se realizarán con un solo tipo de material, para rollos de bobinado no mayor a 10 pulgadas de diámetro. La medición de la potencia consumida se realiza por medio de los equipos utilizados los cuales cuentan con medición de potencia incorporada.

Para medir si existe ahorro energético al implementar este tipo de algoritmo se realizarán pruebas antes y después de la implementación.

Al finalizar este estudio, se tendrán datos recopilados durante las pruebas con el bobinador experimental para comparación y referencia de otras

aplicaciones similares, consumos de energía y porcentajes de variación de tensión. También se tendrá la base para un algoritmo de auto sintonía por el método de fase y margen de amplitud que puede ser implementado en diferentes controladores.

7. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

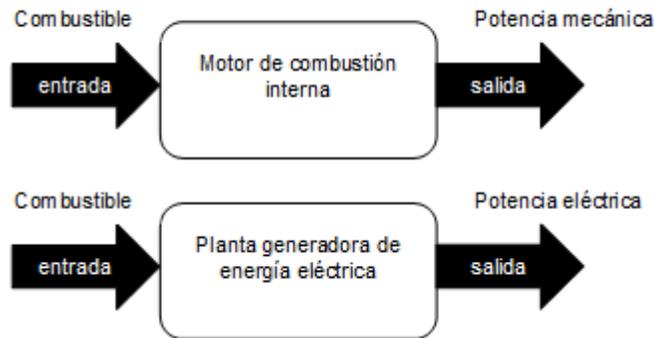
7.1. Teoría elemental de control

El propósito principal de este capítulo, es mostrar los principios y conceptos básicos de la teoría sobre el control automático, sus objetivos y componentes principales. Se hace mención de sistemas de lazo sin retroalimentación y con retroalimentación, controlador PID con su aplicación específica a control de tensión de bobinador.

7.2. Sistemas de control

“El término sistema se emplea para describir un conjunto de componentes que interactúan, alrededor de los cuales se dibuja una frontera imaginaria de modo que solo es de interés la interacción entre la entrada o entradas y su salida o salidas, sin necesidad de estudiar en detalle las interacciones entre los componentes que lo forman”. Puede ser concebido como la interacción de un grupo de elementos donde lo importante es la interacción entre las salidas y las entradas. Un sistema puede ser un motor de combustión interna o una planta de generación de energía eléctrica. (Bolton, 2001, p. 5)

Figura 1. **Sistema de motor de combustión y planta generadora de energía**



Fuente: elaboración propia.

La figura 1 muestra la representación de dos sistemas mediante una caja indicando el sistema y flechas indicando su entrada o su salida según la dirección de las mismas.

7.2.1. Objetivos de control

Es decir, que control es un conjunto de dispositivos que se encargan de administrar o regular el comportamiento de otros sistemas, para reducir los errores de fallo así alcanzar los resultados propuestos. Debe tener robustez y estabilidad frente a las perturbaciones, además, ser altamente eficiente según criterios preestablecidos.

7.3. Estrategias de control

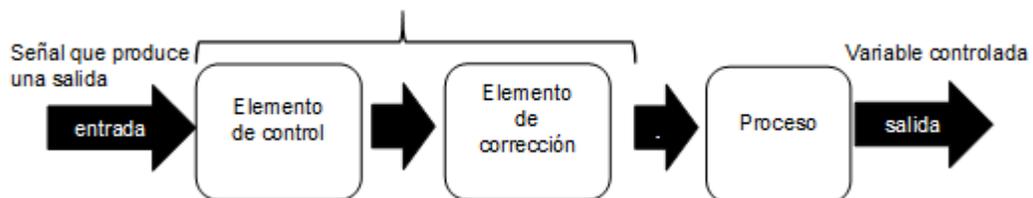
Existen dos estrategias comunes para un sistema de control, conocidos como sistema de control sin retroalimentación y con retroalimentación.

7.3.1. Control sin retroalimentación

El control de lazo abierto tiene la característica que las variables que controlan el proceso circulan en una sola dirección. No existe retroalimentación de las señales que se controlan. Los ajustes están basados en la experiencia o en modelos matemáticos, por los cuales la señal de control es procesada para producir una señal de control o salida. Un ejemplo puede ser una lavadora de ropa, donde el ciclo da inicio según la posición del selector con un determinado tiempo, la lavadora no tiene conocimiento de la calidad de lavado o de limpieza de la ropa al final del ciclo.

“Se puede considerar que un sistema en lazo abierto consiste en algunos subsistemas básicos arreglados en forma lineal. Estos elementos pueden ser distintos, equipos separados, pero todas las funciones que cumple cada subsistema se deben preservar” (Bolton, 2001, p. 6). Generalmente un sistema de lazo abierto consta del controlador y el proceso a controlar.

Figura 2. Subsistemas de un lazo abierto

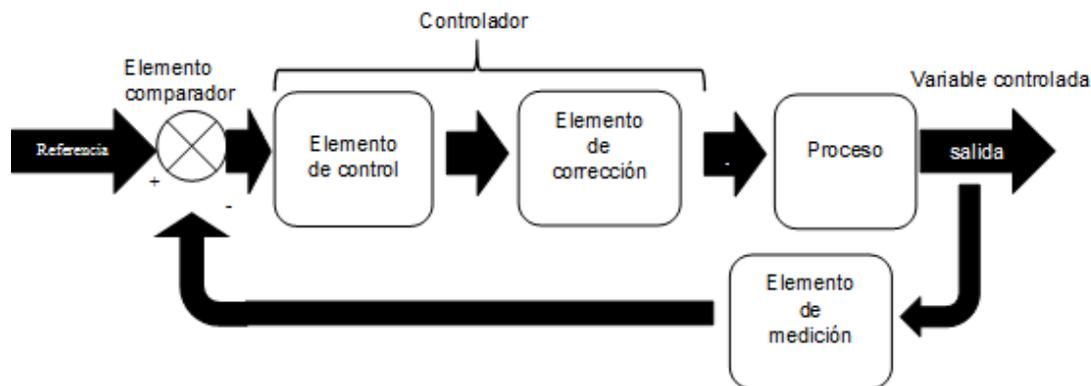


Fuente: elaboración propia.

7.3.2. Control con retroalimentación

“En el sistema de control de lazo cerrado el controlador se alimenta de la señal de error de desempeño, la cual representa la diferencia entre la señal de entrada y la señal de realimentación con el fin de reducir el error y llevar la salida del sistema a un valor deseado, el término lazo cerrado siempre indica una acción de control realimentado para reducir el error del sistema” (Carrillo, 2011, p. 3).

Figura 3. Componentes de control retroalimentado



Fuente: elaboración propia.

Los subsistemas pueden no ser elementos separados o partes distintas, pero todas sus funciones de los subsistemas están presentes. La entrada principal es el valor requerido y la variable de salida, es el valor real del proceso que se controla. Este lazo de control retroalimentado tiene la característica de ser insensible a los disturbios externos al sistema. Realiza una comparación de variables de referencia y medición, determinando el error para tomar las acciones necesarias para minimizarlo.

7.3.3. Elementos básicos

Las partes básicas de un sistema de control se listan a continuación:

- Elemento de comparación. Este elemento realiza una comparación entre valor de referencia y la variable controlada determinando el error entre ambas, matemáticamente se expresa como:

Ecuación 1 elemento comparador de error

$$\text{Señal de error} = \text{Valor de referencia} - \text{Valor medido}$$

- Elemento de control. Es el elemento que decide la acción a realizar cuando se tiene un error, también se le llama controlador a un elemento que incluye el elemento de control y la unidad de corrección.
- Elemento de corrección. Es el elemento encargado de realizar una modificación en el proceso al reducir el error, también se le conoce como actuador.
- Elemento proceso. El proceso o planta es donde se controla la variable de salida, esto puede ser un horno, un intercambiador de calor, un tanque donde se desea controlar el nivel.
- Elemento de medición: este elemento genera una señal en relación a la variable de control, esta señal ingresa al comparador para generar el error que luego ingresa al elemento de control.

La característica principal de este lazo de control es la retroalimentación que proporciona el circuito del elemento de medición.

7.3.4. Comparaciones

En resumen, los lazos de control cerrado, necesitan una señal de retroalimentación proporcional a la variable de control. Esta señal se compara con la referencia y el error produce la corrección por medio del controlador. Los lazos cerrados son menos propensos a soportar los disturbios exteriores al sistema. Los lazos de control abiertos, por lo contrario, no realizan medición de la variable controlada, no existe una retroalimentación y son aplicables a aquellos procesos como las lavadoras domésticas, donde una retroalimentación del resultado final no es requerida.

7.3.5. Función de transferencia

“Se define como el cociente de la variable de salida en estado estable entre la entrada en estado estable para un sistema o subsistema” ((Bolton, 2001, p. 7). También se le conoce como ganancia del sistema.

Ecuación 2. Función de transferencia

$$\text{función de transferencia } G = \frac{\text{salida en estado estable}}{\text{entrada en estado estable}}$$

Se hace mención como ejemplo, una máquina dispensadora de golosinas, se ingresa una moneda y se obtiene el despacho de una golosina. La relación de transferencia para esta máquina dispensadora será 1 golosina / moneda. Si el sistema es lineal, al ingresar dos monedas saldrán dos golosinas. La función guarda las siguientes propiedades:

- Está definida para sistemas lineales que no varían en el tiempo.

- No depende de la entrada y su magnitud.
- Inicialmente las condiciones son cero.
- Si es conocida la ganancia para el sistema, pueden aplicarse diferentes señales a la entrada y estudiar la salida para conocer las propiedades del sistema.

7.3.6. Ganancia de transferencia sin retroalimentación

A continuación, se presenta la ganancia de transferencia sin retroalimentación.

Figura 4. **Ganancia control no retroalimentado**



Fuente: elaboración propia.

Un control no retroalimentado se muestra en la figura 4 con las ganancias para cada uno de los elementos que forman el sistema, aplicando la definición de ganancia de transferencia tenemos:

$$\text{funcion de transferencia elemento 1, } G1 = \frac{\theta_1}{\theta_i}$$

$$\text{funcion de transferencia elemento 2, } G2 = \frac{\theta_2}{\theta_1}$$

$$\text{funcion de transferencia elemento 3, } G3 = \frac{\theta_o}{\theta_2}$$

La ganancia global del sistema es $G = \theta_o/\theta_{oi}$, se obtiene:

$$G = \frac{\theta_1}{\theta_i} * \frac{\theta_2}{\theta_1} * \frac{\theta_o}{\theta_2}$$

Sustituyendo por la ganancia de cada uno de los elementos se obtiene la función de transferencia de lazo abierto:

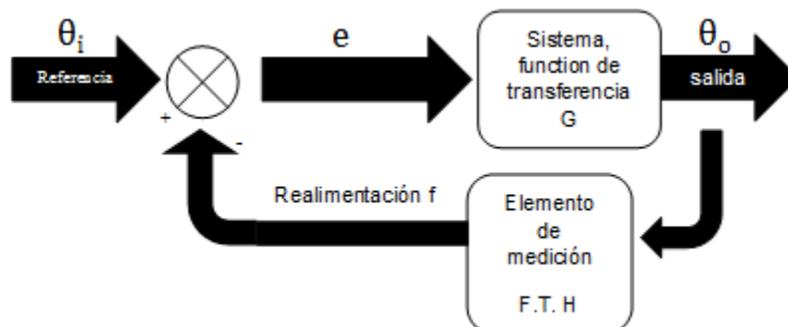
$$G = G_1 * G_2 * G_3$$

Se define, entonces, la ganancia para lazo abierto, como el producto de la ganancia de cada bloque.

7.3.7. Ganancia de transferencia con retroalimentación

A continuación, se presenta la ganancia de transferencia con retroalimentación.

Figura 5. Ganancia de lazo cerrado



Fuente: elaboración propia.

La figura 5 muestra un esquema de sistema de lazo cerrado. La ganancia del sistema es $= \theta_o/\theta_{oi}$. Cada elemento tiene su función de transferencia, entonces:

$$G = \frac{\theta_o}{e}$$

$$H = \frac{f}{\theta_o}$$

$$e = \theta_i - f$$

Sustituyendo f y e, acomodando los términos en las ecuaciones anteriores

$$f = H\theta_o$$

$$e = \theta_i - H\theta_o$$

$$G = \frac{\theta_o}{\theta_i - H\theta_o}$$

$$G\theta_i - GH\theta_o = \theta_o$$

$$G\theta_i = (1 + GH)\theta_o$$

$$\frac{G}{(1 + GH)} = \frac{\theta_o}{\theta_i}$$

La ecuación anterior es válida para un sistema con retroalimentación negativa. Con retroalimentación positiva, el denominador cambia a $(1 - GH)$. Es

importante mencionar que, si el sistema está compuesto de varios subsistemas en trayectoria recta, en este caso, la ganancia G es:

$$G = G_1 * G_2 * G_3 * \dots G_n$$

Si se tiene que el sistema está compuesto por 3 sub bloques, la ganancia de lazo cerrado será:

$$\frac{\theta_o}{\theta_i} = \frac{G_1 * G_2 * G_3}{(1 + (G_1 * G_2 * G_3)H)}$$

7.3.8. Función impulso

Un concepto que se aplica en el estudio de controladores es la función impulso, llamada también delta de Dirac, representada como $\delta(t)$ y su definición:

Figura 6. **Gráfica de la función impulso**



Fuente: Carrillo, A. J. (2011). *Sistemas automáticos de control*.

Figura 7. **Definición función Impulso**

$$\delta(t) = \begin{cases} 1 & -\varepsilon \leq t \leq \varepsilon \quad \therefore \varepsilon \rightarrow 0 \\ 0 & t > \varepsilon, t < -\varepsilon \end{cases}$$

Fuente: Carrillo, A. J. (2011). *Sistemas automáticos de control*.

Esto es un cambio súbito de magnitud unitaria en un tiempo igual a cero. Al aplicar una perturbación cuando un sistema se encuentra en reposo se puede describir el comportamiento de un sistema. Aplicando Laplace y sacando su transformada a la función de impulso unitario se obtiene:

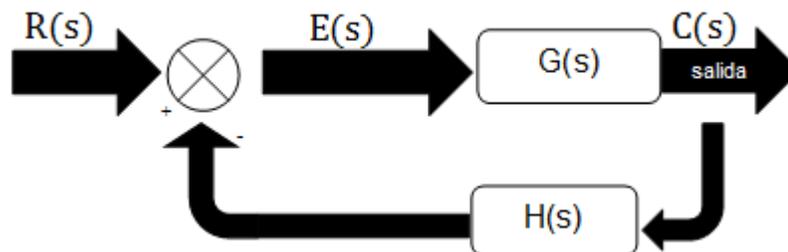
Figura 8. **Transformada de función Impulso**

$$\mathcal{L}[\delta(t)] = \int_0^t \delta(t) e^{-st} dt = 1$$

Fuente: Carrillo, A. J. (2011). *Sistemas automáticos de control*.

“En la teoría de control frecuentemente se usan funciones de transferencia para describir las relaciones entre salida y entrada de sistemas que se modelan por medio de ecuaciones diferenciales lineales invariantes en el tiempo” (Carrillo, 2011). Aplicando este concepto, se tiene:

Figura 9. **Lazo cerrado con ganancia aplicando Laplace**



Fuente: elaboración propia.

$$G_T(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)}$$

La anterior ecuación representa el modelo que se requiere para estudiar el desempeño de los sistemas de control retroalimentados que se reducen a esta forma.

7.3.9. Diagrama de bloques

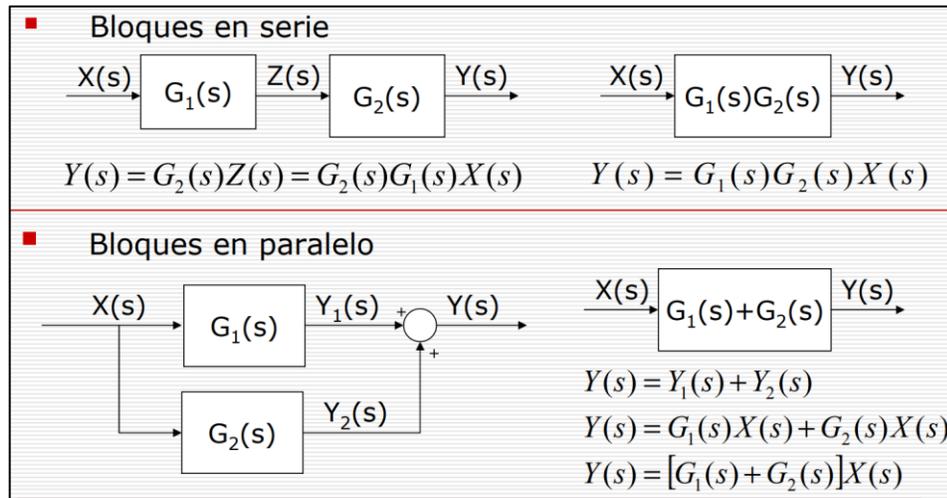
“Un diagrama de bloques de un sistema es una representación gráfica de las funciones que lleva a cabo cada componente y el flujo de señales, tales diagramas muestran las relaciones existentes entre los diversos componentes, a diferencia de una representación matemática puramente abstracta, un diagrama de bloques tiene la ventaja de indicar de forma más realista el flujo de las señales del sistema real” (Ogata, 2010, p. 12).

Es un procedimiento muy útil en la teoría de control. El primero en aplicar esta herramienta fue James Watt para controlar la velocidad de su máquina de vapor y que implemento en esta máquina. Tiene la particularidad de que en cada bloque se indica la ganancia de cada bloque, el sentido de flujo se representa por flechas, las salidas tienen las unidades de las entradas multiplicadas por las unidades de la ganancia del bloque.

Los diagramas de bloques están formados principalmente por bloques, flechas, puntos de suma y derivaciones. Estos componentes están representados en la figura 9.

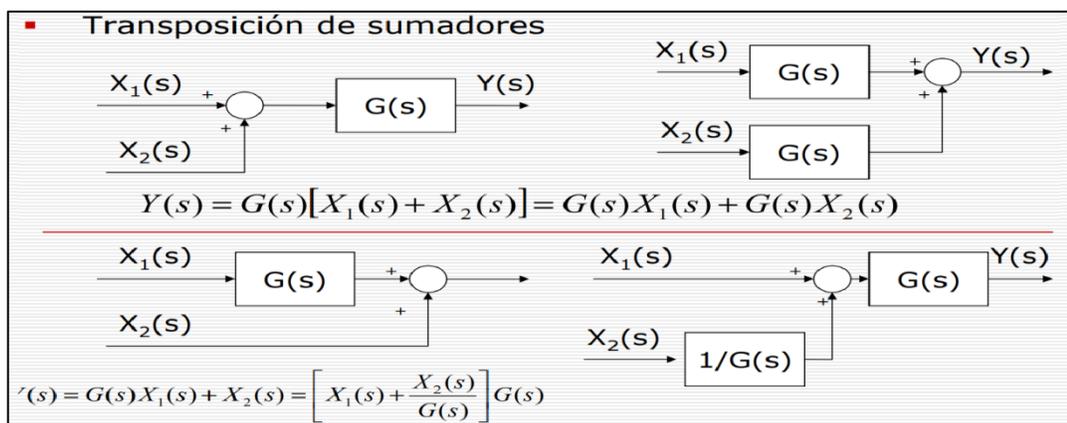
Estos diagramas se pueden operar algebraicamente. Las siguientes figuras muestra operaciones con bloques:

Figura 10. Operaciones de bloques serie – paralelo



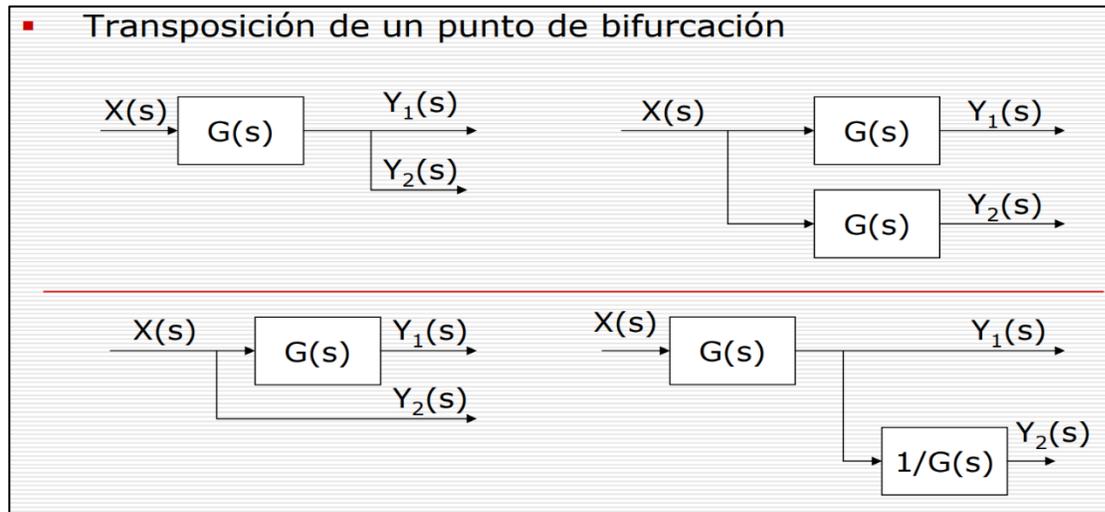
Fuente: Blanco, D., Barber, R., Malfaz, M., & Salichs, M. (n.d.). *Universidad Carlos III*.
 Recuperado de <http://ocw.uc3m.es/ingenieria-de-sistemas-y-automatica/senales-y-sistemas/temas/tema-5-diagrama-de-bloques>.

Figura 11. Transposición de sumadores



Fuente: Blanco, D., Barber, R., Malfaz, M., & Salichs, M. (n.d.). *Universidad Carlos III*.
 Recuperado de <http://ocw.uc3m.es/ingenieria-de-sistemas-y-automatica/senales-y-sistemas/temas/tema-5-diagrama-de-bloques>.

Figura 12. **Transposición de bifurcación**



Fuente: Blanco, D., Barber, R., Malfaz, M., & Salichs, M. (n.d.). *Universidad Carlos III*.
Recuperado de <http://ocw.uc3m.es/ingenieria-de-sistemas-y-automatica/senales-y-sistemas/temas/tema-5-diagrama-de-bloques>

7.4. Sistema de control PID

Como se menciona anteriormente, una de sus partes importantes es el bloque controlador, el cual, se encarga de realizar la corrección según la magnitud y dirección del error. Seguidamente, se describen las diferentes acciones que pueden integrar el bloque controlador.

7.4.1. Acción on – off

Este tipo de control consta de dos acciones conectado y desconectado. Es un control básico basado en la activación o desactivación del actuador. Puede ser aplicado utilizando la retroalimentación, en este modo la acción está en proporción al error que se tiene entre la entrada deseada y el valor medido, o se

controla por acción de tiempo donde no se tiene un sistema de medición que proporcione retroalimentación de la medición de la salida y cuyo ejemplo es el de una lavadora doméstica.

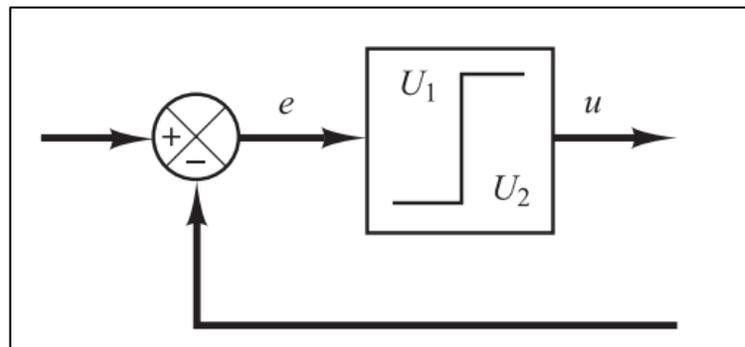
Utilizando un sistema retroalimentando, por ejemplo, de un horno o sistema de calefacción, si la temperatura medida se encuentra por abajo del valor requerido, se activa el actuador, cuando la medición de temperatura está por encima del valor deseado, se desactiva el actuador. Si es un horno eléctrico el actuador puede ser la resistencia encargada de producir el calor dentro del horno.

$$u(t) = U_1 \text{ para } e(t) > 0$$

$$u(t) = U_2 \text{ para } e(t) < 0$$

Siendo los valores U constantes y generalmente $U_2 = 0$.

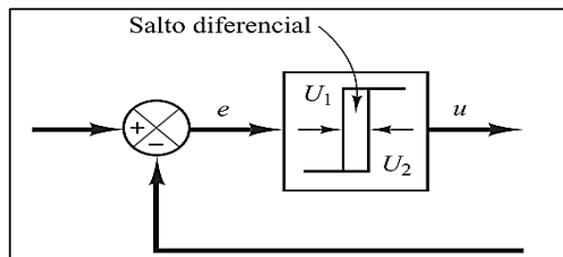
Figura 13. **Diagrama de bloques controlador *on-off***



Fuente: Ogata, K. (2010). *Ingeniería de control moderna*.

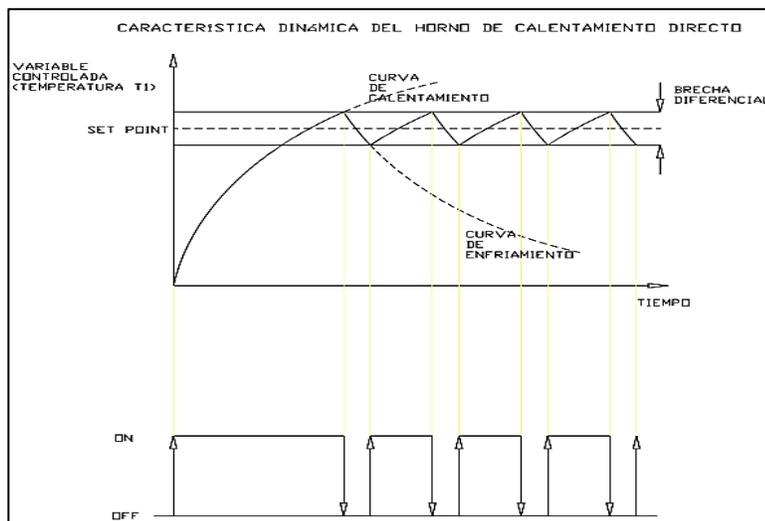
También se utilizan controladores *on-off* con rango diferencial o histéresis, esto permite cierto desplazamiento de la señal $u(t)$ por más tiempo hasta que el valor del error se desplaza más allá del cero.

Figura 14. **Diagrama de bloques control *on-off* diferencial**



Fuente: Ogata, K. (2010). *Ingeniería de control moderna*.

Figura 15. **Característica de horno eléctrico control *on-off***



Fuente: Golato, M. (n.d.). *Sistemas de control*. Recuperado de https://catedras.facet.unt.edu.ar/sistemasdecontrol/wp-content/uploads/sites/101/2016/04/5_Acciones-de-control_2016.pdf

7.4.2. Control proporcional

Para esta acción de control la salida es una proporción del error. Se expresa como:

$$u(t) = K_p e(t)$$

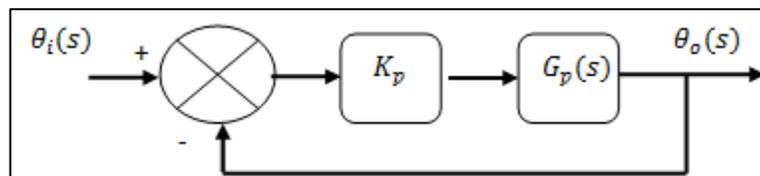
Aplicando la transformada de Laplace:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p$$

Siendo K_p la ganancia proporcional: “Cualquiera que sea el mecanismo real y la forma de la potencia de operación, el controlador proporcional es, en esencia, un amplificador con una ganancia ajustable” (Ogata, 2010).

Se muestra, a continuación, el diagrama de bloques.

Figura 16. Bloques control proporcional



Fuente: elaboración propia.

7.4.3. Control integral

La salida para este control es una proporción de la integral del error en el tiempo y se expresa como:

$$salida = K_i \int_0^t e(t)dt$$

Donde K_i es constante ajustable. Aplicando la transformada, se obtiene la ganancia:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s}$$

La constante K_i se denomina ganancia integral. “La salida en cualquier tiempo es, entonces, proporcional a la acumulación de los efectos de los errores pasados” (Bolton, 2001).

7.4.4. Control derivativo

Ahora, se aplica la derivada a la entrada del control y se obtiene el control derivativo:

$$salida = K_d \frac{de}{dt}$$

A la constante K_d se le conoce como ganancia derivativa. Este es un control que reacciona a la velocidad con que cambia la entrada, es decir, si inicialmente se tenía cero error y no existe variación, la salida es cero, si por el contrario el valor de la señal de error cambia, se tiene una salida en el control,

esta salida no corresponde en sí con el valor de error, sino con respecto a su rapidez de cambio. Por lo general, este bloque controlador se utiliza en combinación con otros bloques. Su ganancia es:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_d s$$

7.4.5. Control PI

Este bloque controlador se conoce como control proporcional – integral, combina los anteriores controladores. Su definición es:

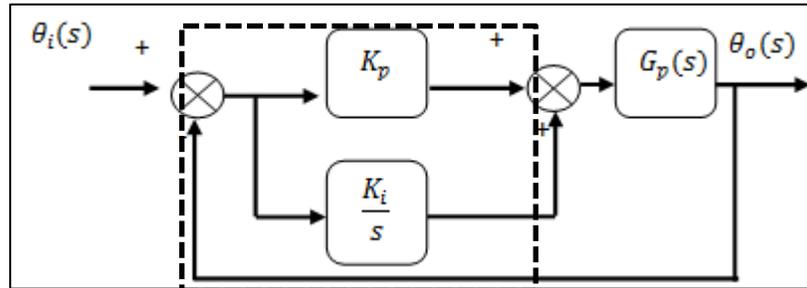
$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt$$

Su ganancia expresada por:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right)$$

Siendo la denominación de T_i tiempo integral. El diagrama de bloques es:

Figura 17. Bloques controlador PI



Fuente: elaboración propia.

7.4.6. Control PD

La acción para este control proporcional – derivativo está definida como se muestra a continuación:

$$u(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt}$$

Nuevamente, aplicando la transformada, se obtiene la siguiente ganancia:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p(1 + T_d s)$$

Siendo T_d el tiempo derivativo.

7.4.7. Control PID

Se puede observar que cada uno de los controles anteriores tienen diferentes características y combinándolos se produce un mejor sistema de

control, se conoce como controlador PID a la acción proporcional combinada con la acción derivativa e integral. Se representa por la siguiente expresión:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt}$$

Su ganancia para este control aplicando la transformada de Laplace:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

7.5. Sintonía de control PID

“Para cada uno de los modelos de control expuestos: proporcional, integral o derivativo, se requiere conocer los valores de las constantes, K_p , T_i y T_d . Las técnicas de sintonización de controladores PID generalmente se realizan por métodos experimentales, o conociendo la dinámica del proceso en cuestión” (Ruiz, 2003, p. 7).

“Muchas veces en los procesos industriales, no se dispone de la ganancia del sistema necesaria para poder determinar los valores de ajustes del controlador PID. En la actualidad, existen controladores en módulos compactos donde los distintos parámetros pueden ser ajustados manualmente” (Cantarero, 2001, p. 11). Muchos de los equipos ofrecidos hoy en día cuentan con la opción de auto sintonía, controladores principalmente aplicados a lazos de control de temperatura.

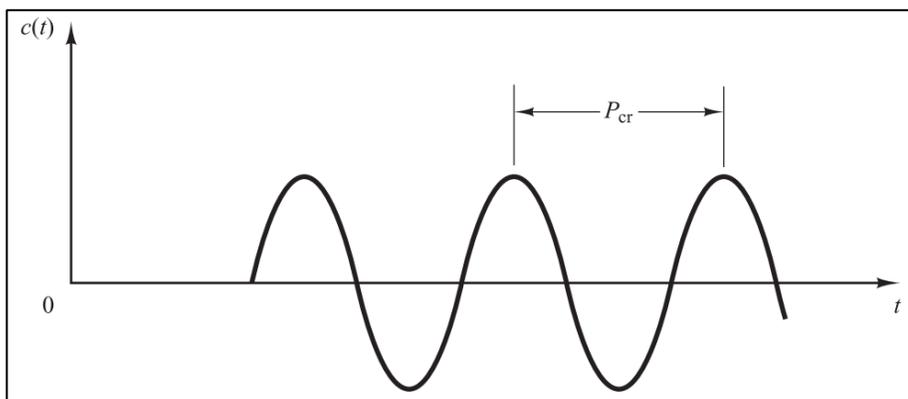
“El controlador PID, si bien tiene un amplio uso en la industria, no es utilizado convenientemente en muchas ocasiones. Esto implica que lazos de

control, que en principio podrían proporcionar excelentes resultados, funcionan de una forma insatisfactoria” (Aström, 1984, p. 8).

7.5.1. Método de sintonía Ziegler – Nichols

Este método se basa, principalmente, en observación experimental y su posterior análisis, el método presentado se conoce como Método de la última ganancia. Es necesario que las funciones integral y derivativa del control PID queden fuera durante las mediciones. Para la ganancia K_p se establece un valor bajo y, luego, se incrementa gradualmente. Estos incrementos se mantienen hasta que se consiga que la salida oscile sostenidamente, si la salida no presenta oscilaciones, entonces, este método no puede ser aplicado. La ganancia a la cual se obtienen estas oscilaciones sostenidas se conoce como ganancia crítica K_{cr} ; al período de las oscilaciones se le conoce como P_{cr} cuando se tiene la ganancia crítica. Este período se determina experimentalmente.

Figura 18. **Oscilaciones sostenidas con período P_{cr} (P_{cr} se mide en segundos)**



Fuente: Ogata, K. (2010). *Ingeniería de control moderna*.

Los valores de ganancia para el controlador PID, se obtienen de la siguiente tabla:

Tabla I. **Criterios Ziegler - Nichols para ganancia crítica y periodo crítico**

Modo de control	K_p	T_i	T_d
P	$0.5K_{cr}$	∞	0
PI	$0.45K_{cr}$	$\frac{1}{1.2}P_{cr}$	0
PID	$0.6K_{cr}$	$0.5P_{cr}$	$0.125P_{cr}$

Fuente: Ogata, K. (2010). *Ingeniería de control moderna*.

7.5.2. Método de sintonía por amplitud y fase (método del relay o relevador)

“El método del Relay para auto sintonía de controles PID es un método simple para evitar ensayo y error y minimiza la posibilidad de que la planta opere cercana al límite de estabilidad” (Wilson, 2005, p. 4).

El método del Relay presenta las siguientes ventajas (Sousa):

- Requiere poco procesamiento matemático.
- Identifica la característica del modelo alrededor de su frecuencia crítica.
- Se adapta a varios procesos industriales.

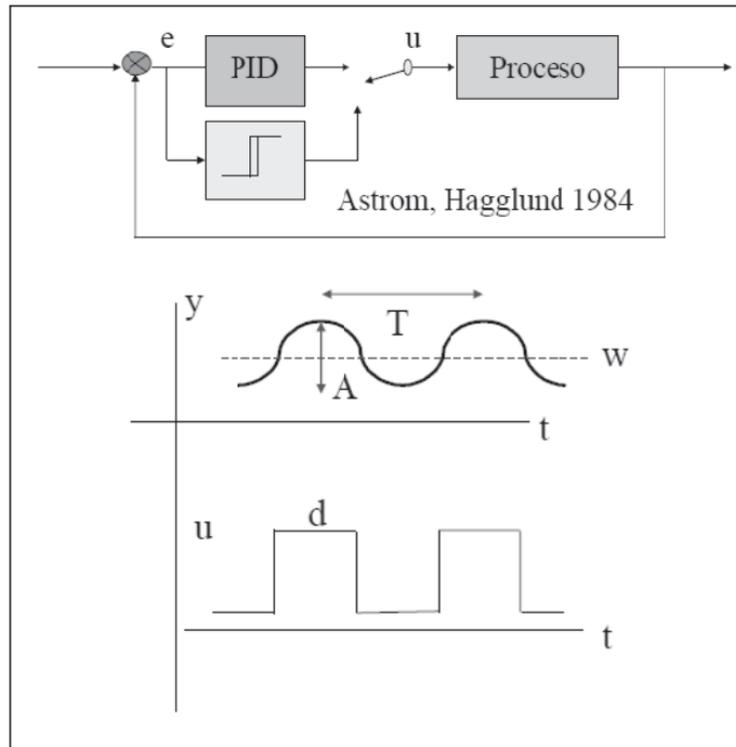
- Su aplicación no requiere conocimiento previo del modelo matemático del sistema.
- Aplicable en producción, ya que los disturbios de control se limitan por los parámetros de prueba del relay.
- Baja sensibilidad a las perturbaciones.

“Este método incorpora un relé (Relay) que provoca oscilaciones controladas en el proceso que permiten la identificación de características dinámicas del mismo” (Ruge, 2011), este método fue primeramente presentado por Astrom-Hagglund (Aströn & Hägglund, 1984, p. 12).

El principio de operación del relevador lo describe Hernández (1998) seguidamente:

La salida del controlador solo puede ser máxima o mínima de acuerdo al valor de la entrada y al valor de referencia. En un relevador con acción inversa, cuando el valor de la variable sobre pasa el valor de referencia la salida del controlador es mínima, cuando el valor de la variable es menor que el valor de referencia la salida del controlador es máxima. Esta operación produce una oscilación, con amplitud constante de la variable controlada alrededor del valor de referencia. (Hernandez, 1998).

Figura 19. **Método de sintonización Astrom-Hagglund, método del relevador**



Fuente: Ruge, A. (2011). *Optimización de señal de control en reguladores PID con arquitectura antireset Wind-Up*. Recuperado de <http://www.scielo.org.co/pdf/tecn/v15n30/v15n30a03.pdf>

Las constantes del controlador PID se calculan de la siguiente manera: midiendo la amplitud de la oscilación, así como el período de la oscilación, luego se aplica la siguiente ecuación para determinar K_{cr} :

$$K_{cr} = \frac{4d}{\pi a}$$

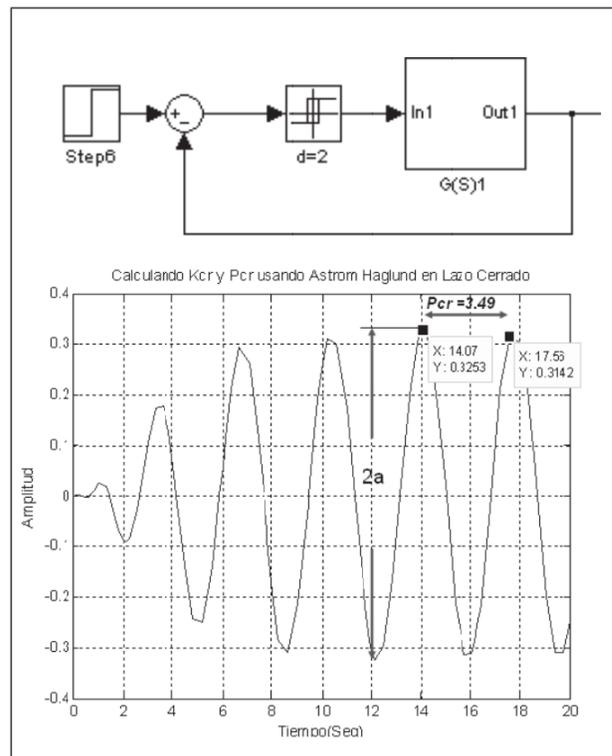
Obtenido el valor de K_{cr} , se procede con las siguientes ecuaciones:

$$Kp = 0.6 * Kcr$$

$$Ki = \frac{Kp}{Ti} = \frac{Kp}{0.5 * Pcr}$$

$$Kd = Kp * (0.125 * Pcr)$$

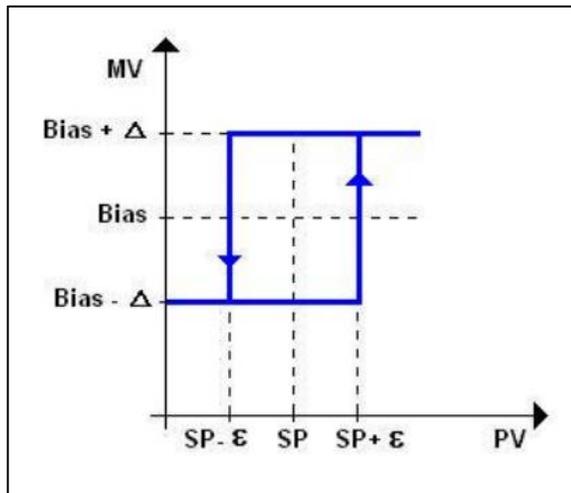
Figura 20. **Ejemplo aplicación del método del Relé, d=2**



Fuente: Ruge, A. (2011). *Optimización de señal de control en reguladores PID con arquitectura antireset Wind-Up*. Recuperado de <http://www.scielo.org.co/pdf/tecn/v15n30/v15n30a03.pdf>

Hernández y también Sousa hacen modificaciones al método del relé agregando una banda de histéresis para contrarrestar los efectos de posible “ruido” en la medición de la variable de salida.

Figura 21. **Relevador con histéresis**



Fuente: Sousa, M. (n.d.). *Relay method on auto-tuning automation solutions*. Recuperado de <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395139427476/Resumo%20Alargado%20-%20Auto-tuning%20de%20Controladores%20PID%20pelo%20m%C3%A9todo%20Relay.pdf>

Para determinar los parámetros cuando el relevador tiene histéresis, se aplica la siguiente ecuación:

$$K_{cr} = \frac{4d}{\pi\sqrt{a^2 - \varepsilon^2}}$$

Donde ε representa el valor de histéresis.

7.6. **Variadores de frecuencia *control techniques* M700**

En la actualidad, el desarrollo de nuevos componentes y técnicas de control ha permitido la fabricación de equipos sofisticados para variar la frecuencia (v.f.) que se aplica a un motor eléctrico, con gama alta de

prestaciones siendo algunas de estas: posibilidad de operar sin encoder con variaciones muy pequeñas de rpm, posibilidad de programación en diferentes lenguajes, capacidad para instalarles módulos de comunicación y módulos programables con diferentes capacidades. En este capítulo se describe en forma general los v.f. *control techniques* M700 por ser los utilizados en el trabajo de investigación.

7.6.1. Descripción general

“El modelo M700 ofrece Ethernet integrado, realimentación de posición total y control de alto rendimiento de servomotores dinámicos de imanes permanentes, el modelo M700 incrementa al máximo el rendimiento de la máquina porque ofrece más control con sincronización de un eje y de múltiples ejes en red” (Control Techniques, s.f., p. 21).

“Aumenta la productividad de la máquina con la integración de sistema centralizados de control, permite sincronización máxima por medio de su red ethernet, el switch integrado de red permite la facilidad de conexión entre los equipos; permite la instalación de 3 módulos opcionales para control con cualquier tecnología de motor” Control Techniques, s.f., p. 18).

“El algoritmo de control interno permite control de motores en lazo abierto y lazo cerrado, motores de reluctancia síncronos y servomotores PM, permite un ancho de banda de control de hasta 250hz” (Control Techniques, s.f., p. 18).

“Cuenta con un puerto de entrada de encoder con amplia flexibilidad y reduce los costos del sistema al permitir conexión simultanea de encoders; es posible la conexión de encoder y obtener una salida simulada sin utilizar módulos adicionales” (Control Techniques, s.f. p. 18).

Cuenta con un PLC interno y control de movimiento incorporado. El PLC interno se basa en la programación CODESYS permite ejecutar tareas en corto tiempo con el control interno de movimiento y funciones de 1.5 ejes. Se destacan las siguientes características:

- Tiempo de ciclo ajustable hasta 250 μ s
- Capacidad de generar perfiles del movimiento
- Relación de engranes electrónico
- CAM
- Captura de posición

“Aplicaciones típicas control de velocidad y posición para control de transmisión y sincronismo, devanado (bobinadoras), manejo de bobinas, corte de metal, cizalla volante, cuchilla rotativa, bancos de ensayo, imprenta, máquinas empaquetadoras, textiles, carpintería y fabricación de neumáticos” (Control Techniques, s.f., 18).

Figura 22. **Variador de frecuencia Control Techniques M700**

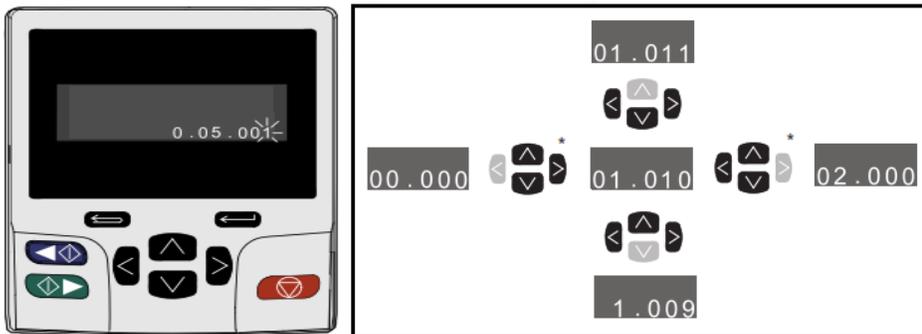


Fuente: Control Techniques. (s.f.). *Control Techniques*. Recuperado de <http://acim.nidec.com/es-es/drives/control-techniques/products/ac-drives/unidrive-m/unidrive-m700>

7.6.2. Configuración de parámetros

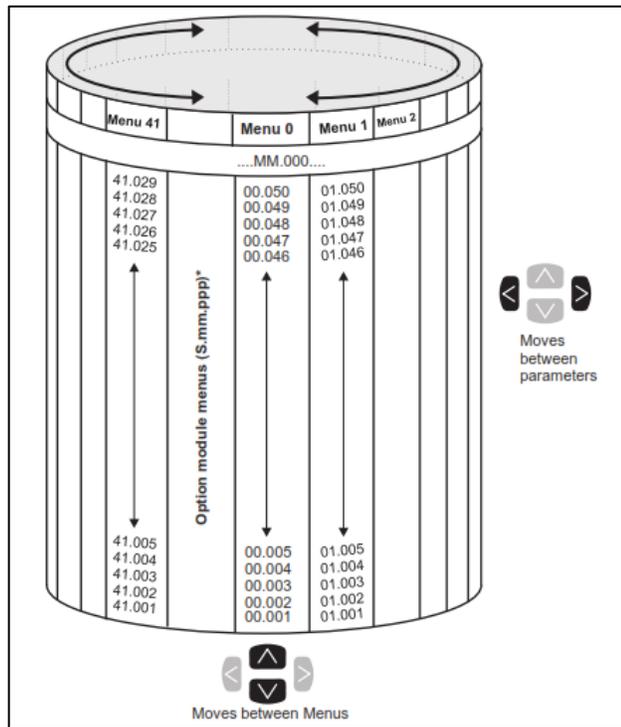
Los diferentes parámetros de configuración están organizados en menús y parámetros. Para poder navegar en los diferentes menús y parámetros se utiliza un teclado de control o *keypad*. Por medio de este teclado se ingresan los diferentes valores de los parámetros que son requeridos para las diferentes aplicaciones. Algunos parámetros comunes son: voltaje de motor, corriente de motor, RPM del motor. Otros parámetros son utilizados dependiendo de la aplicación, como los parámetros del controlador PID.

Figura 23. Teclado de control variador M700



Fuente: Control Techniques. (s.f.). *Control Techniques*. Recuperado de <http://acim.nidec.com/es-es/drives/control-techniques/products/ac-drives/unidrive-m/unidrive-m700>

Figura 24. Estructura de menú - parámetros variador M700



Fuente: Control Techniques. (s.f.). *Control Techniques*. Recuperado de <http://acim.nidec.com/es-es/drives/control-techniques/products/ac-drives/unidrive-m/unidrive-m700>

También es posible la configuración de los parámetros por medio del software de configuración “Unidrive M connect” (Control Techniques, s.f., p. 19).

Este software permite la conexión al variador de frecuencia por medio de un cable ethernet. Los valores de los parámetros pueden ser monitoreados en línea y almacenados para su posterior uso o análisis.

Este software presenta dos modalidades de visualización de datos: parámetros y bloques. La modalidad de parámetros muestra una lista de los

diferentes parámetros por menú. La modalidad de bloques muestra una serie de bloques en secuencia de los diferentes parámetros según el menú que se visualiza.

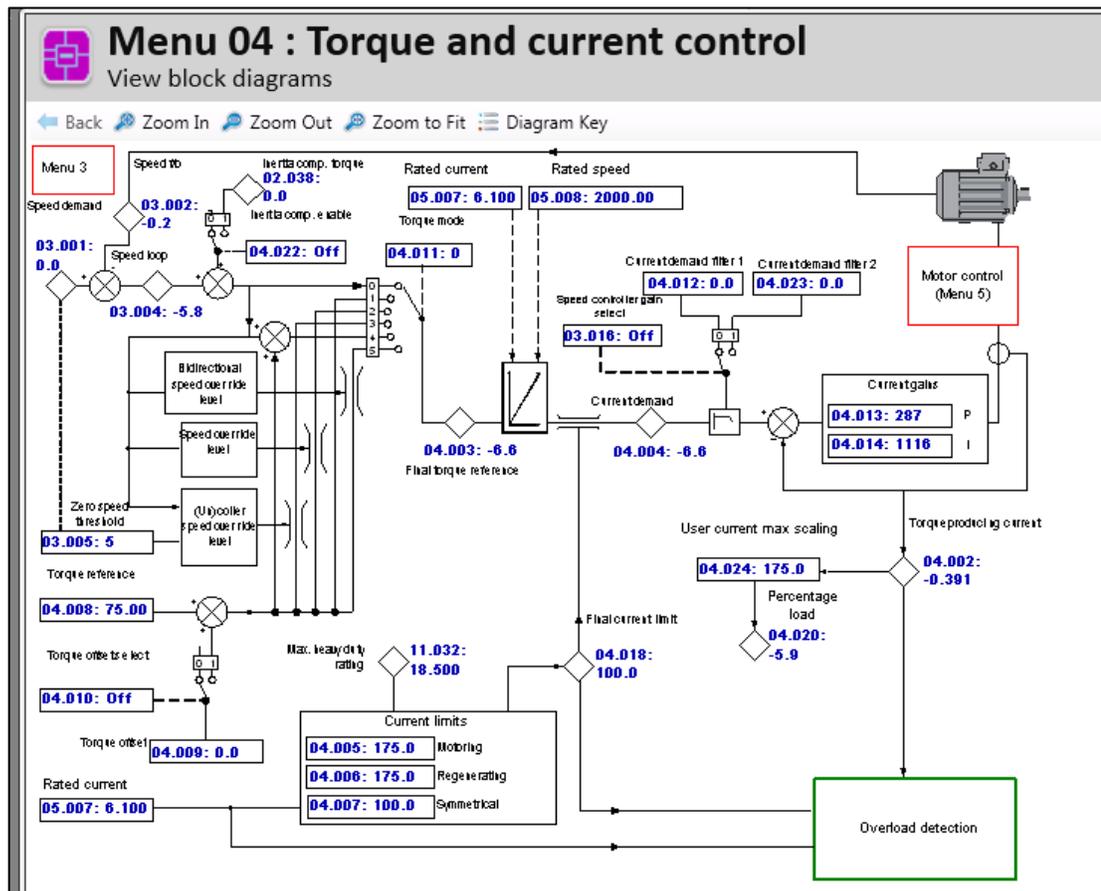
Figura 25. **Muestra de parámetros de menú 5, variador M700**

Parameter	Caption	Categories	Value	Source/Destination
05.000	Parameter mm.000		0	
05.001	Output Frequency		0.0 Hz	
05.002	Output Voltage		2 V	
05.003	Output Power		0.001 kW	
05.005	D.c. Bus Voltage		333 V	
05.007	Rated Current		6.100 A	
05.008	Rated Speed		2000.00 rpm	
05.009	Rated Voltage		220 V	
05.011	Number Of Motor Poles		10 Poles	
05.012	Auto-tune		None	
05.013	Minimal Movement Phasing Test Mode		Free	
05.014	Phasing Test On Enable		Disabled	
05.015	Minimal Movement Phasing Test Current		1%	
05.016	Minimal Movement Phasing Test Angle		0.00 °	
05.017	Stator Resistance		0.608432 Ω	
05.018	Maximum Switching Frequency		12 kHz	
05.019	Minimal Movement Phasing Test Mechanic		-180 °	
05.021	Mechanical Load Test Level		0 %	
05.022	Enable High Speed Mode		Disable	
05.023	D.c. Bus Voltage High Range		336 V	
05.024	Ld		7.258 mH	
05.026	High Dynamic Performance Enable		Off	
05.027	Flux Control Gain		1.0	
05.028	Torque Linearisation Disable		Off	
05.031	Voltage Controller Gain		1	
05.032	Torque Per Amp		1.40 Nm/A	
05.033	Volts Per 1000rpm		86 V	
05.035	Auto-switching Frequency Change		Enabled	
05.036	Auto-switching Frequency Step Size		2	
05.037	Switching Frequency		12 kHz	
05.038	Minimum Switching Frequency		8 kHz	

Fuente: Control Techniques. (s.f.). *Control Techniques*. Recuperado de <http://acim.nidec.com/es-es/drives/control-techniques/products/ac-drives/unidrive-m/unidrive-m700>

Dentro de la gama de parámetros disponibles, se utilizan los parámetros 06.025 y 06.026 que corresponden a los acumuladores de MWh y kWh respectivamente de la energía que se transfiere a través del drive al motor.

Figura 26. Estructura de bloques, menú 04, variador M700



Fuente: Control Techniques. (s.f.). *Control Techniques*. Recuperado de <http://acim.nidec.com/es-es/drives/control-techniques/products/ac-drives/unidrive-m/unidrive-m700>

7.6.3. Métodos de programación

Como se mencionó anteriormente, el variador M700 cuenta con un plc onboard que puede ser programado para ejecutar diferentes aplicaciones y poder controlar la operación del variador M700. Este plc interno cuenta con memoria limitada, así como su capacidad de ejecutar tareas simultaneas esta reducida solamente a dos tareas simultaneas.

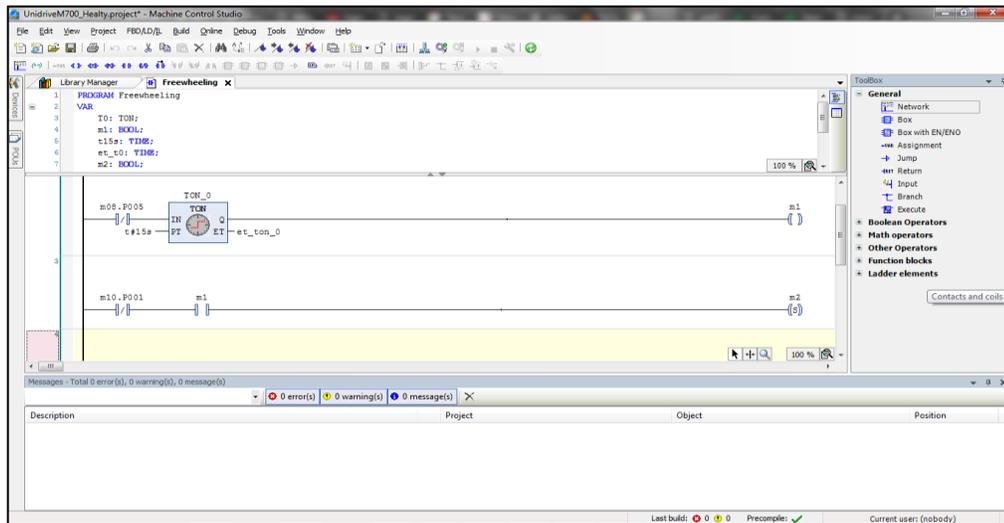
Para realizar la programación de este plc interno y de los módulos opcionales de programación se utiliza el software *Machine Control Studio*.

Este paquete de software proporciona un completo entorno de programación IEC 61131-3 para el variador y opciones de la unidad *Unidrive M* y la interfaz de control de *control techniques*.

Un programa puede escribirse en uno o más de los idiomas admitidos (bloque de funciones, texto estructurado, SFC, ladder o lista de instrucciones) y descargarse en el área de programación integrada en el *Unidrive M*. La operación en tiempo de ejecución puede ser monitoreado y el usuario puede interactuar con el programa estableciendo nuevos valores para las variables del programa y los parámetros de la unidad (Control Techniques, s.f., p. 19).

También está disponible el software de programación SyptPro para programación de módulos opcionales de la serie SI-APP+.

Figura 27. **Software de programación *Machine Edition Studio***



Fuente: Software Machine Edition Studio

7.6.4. **Módulos opcionales de programación**

El MCI210 es un módulo de opción programable por el usuario basado en CoDeSys (*Machine Control Studio*) para *Unidrive M*. Es un Módulo inteligente que amplía la funcionalidad del *Unidrive M* ofreciendo las siguientes características:

- Programación de usuario basada en CoDeSys
- I / O digital
- Unidad de temporizador
- Ethernet integrado (2 puertos)
- Sistema de archivos
- Programación del usuario

“El módulo MCI210 es capaz de ejecutar un programa CoDeSys creado por un usuario con Machine Control Studio (MC Studio). Es un entorno de desarrollo integrado que soporta cinco de los lenguajes de programación de la norma IEC 61131-3, incluido el texto estructurado (ST), Diagrama de escalera (LD), Diagrama de bloques de función (FBD), Tabla de función secuencial (SFC) y Lista de instrucciones (IL)” (Control Techniques, s.f., p. 20).

Cuenta con diferentes tareas que pueden ser utilizadas por el usuario Se listan a continuación:

- Inicial
- Freewheeling
- Reloj0
- Reloj1
- Reloj2
- Reloj3
- Posición
- Evento0
- Evento 1
- Evento 2
- Evento 3
- ErrorTask

“Las tareas Freewheeling, Clockn y Position son tareas cíclicas. Las tareas de Clockn y Position serán ejecutadas en un intervalo establecido por el usuario en MC Studio. La tarea de marcha libre es la tarea de menor prioridad y se ejecutará cuando el recurso del procesador lo permita” (Control Techniques, s.f.).

Figura 28. **Módulo Mci210**



Fuente: Control Techniques. (s.f.). *Control Techniques*. Recuperado de <http://acim.nidec.com/es-es/drives/control-techniques/products/ac-drives/unidrive-m/unidrive-m700>

7.7. Bobinadores

“Los des enrolladores y enrolladores se utilizan en casi todas las industrias de manejo de material en banda, incluyendo papel, plásticos, metales convertidos, ferrosos y no ferrosos, alambre, impresión y textiles. El bobinador es a menudo el factor limitante en el rendimiento de la máquina cuando no se utilizan bobinadoras y desenrolladores continuos. Por otra parte, un estrecho control del bobinador es esencial para la producción de calidad” (Dudzinski, 2000)

7.7.1. Bobinador de centro

Existen dos categorías de bobinadores que predominan en la industria: los bobinadores centrales y los bobinadores de superficie. Existen también combinaciones de ambos, principalmente utilizados para materiales resbaladizos.

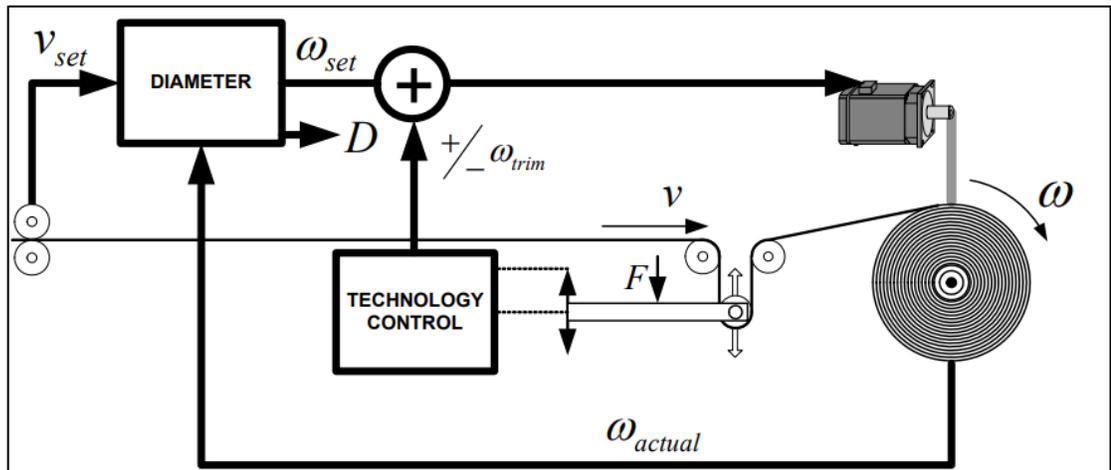
Los controles considerados para bobinadores centrales aplican para desbobinadores centrales, por lo que se consideran indistintamente. En un bobinador de centro o central, un motor hace rotar el núcleo o eje del rollo que se bobina, la unidad puede ser un motor de C.A o motor de C.D, en bobinadores de pequeñas dimensiones suele utilizarse un servo motor.

Las consideraciones de control para un desbobinador central son similares a las de un bobinador central. En un bobinador central, un motor acciona el núcleo o el eje del rollo que se enrolla. Aunque la unidad de motor puede usar cualquier tecnología, las unidades de corriente alterna y las unidades de corriente continua se usan más comúnmente en bobinadores grandes. En bobinadores más pequeños, se pueden usar servomotores.

Generalmente, los bobinadores de centro se controlan por medio de modo velocidad o por medio de modo torque. Si el control se realiza en modo velocidad, el control genera una referencia de velocidad hacia el variador. Luego el variador suministra la corriente necesaria al motor para producir el par requerido para alcanzar la referencia de velocidad.

Si el control se realiza por modo torque, la referencia de torque es transmitida al variador, la velocidad final del motor será la máxima que pueda alcanzar con el torque aplicado.

Figura 29. Esquema de bobinador de centro con balancín



Fuente Morozov, D. (n.d.). *Siemens Industry, Inc.* Recuperado de <https://www.industry.usa.siemens.com/drives/us/en/motion-control-systems-and-solutions/motion-control-success-stories/Documents/IND-converting-WP-Tension-control-center-winders.pdf>

7.7.1.1. Componentes básicos

La Figura 29 muestra un esquema de un bobinador de centro que utiliza un balancín para el control de tensión. Los componentes son:

- Motor principal
- Balancín con un valor de referencia de tensión
- Sensores de desplazamiento de balancín
- Bloques de control

7.7.1.2. Aplicaciones

Los bobinadores de centro se aplican donde se requiere cierta acumulación de material, esto también es función del balancín, ya que también funciona como un acumulador de material, adicional a ejercer una tensión sobre el material que se bobina. Puede ser utilizado donde se requiere relaciones de diámetros hasta 20:1, es decir, el diámetro final del rollo bobinado puede ser 20 veces el diámetro inicial del núcleo del rollo. Si el material que se desea bobinar es sensible a los estiramientos, ya que causa una deformación permanente, el sistema de balancín se requiere con el menor peso posible, así como los componentes de rodamientos y neumáticos deben presentar la menor fricción posible para no afectar el proceso.

7.7.1.3. Dimensionamientos básicos

La siguiente ecuación calcula la potencia requerida del bobinador:

$$\text{potencia del bobinador (kW)} = \frac{\text{Velocidad de línea (mpm)} * \text{Tensión (N)}}{60\,000}$$

$$\text{potencia del bobinador (hp)} = \frac{\text{Velocidad de línea (fpm)} * \text{Tensión (lb)}}{5\,252}$$

mpm = metros por minuto

N = Newtons

fpm = pies por minuto

Si se utiliza un sistema de torque constante en el control, el motor como el variador deben ser dimensionados según la siguiente formula:

$$\frac{\text{motor}}{\text{variador}} (\text{kW}) = \text{Potencia del bobinador (hp)} * \frac{\text{diámetro máximo}}{\text{diámetro mínimo}}$$

$$\text{rev. del motor} \left(\frac{\text{rev}}{\text{min}} \right) = \text{vel linea} \left(\frac{\text{m}}{\text{min}} \right) * \frac{\text{Ratio}}{\pi * \text{diámetro mínimo (m)}}$$

rev = revoluciones

$$\frac{\text{rev}}{\text{min}} = \text{revoluciones por minuto}$$

m/min = metros por minuto

Ratio = relación de reducción de la caja reductora

m = metros

Es necesario hacer notar que las anteriores ecuaciones no consideran las pérdidas por fricción o torques de aceleración o eficiencias, los cuales es necesario considerar en el diseño final.

7.7.1.4. Estrategias de control

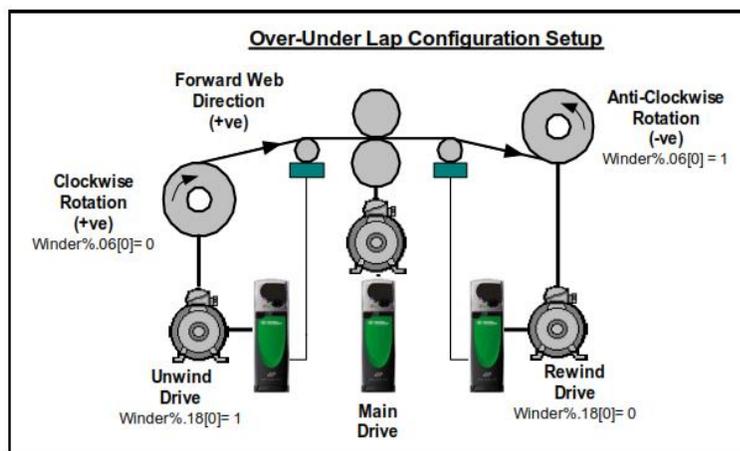
Las estrategias de control para un bobinador de centro son de lo más diversas, hay sistemas de control para bobinador de lazo abierto y sistemas de control de lazo cerrado. Por lo general, los sistemas de lazo abierto se controla la velocidad o el torque en un determinado diámetro. Conforme el material es enrollado el diámetro se incrementa. Este incremento del diámetro requiere una reducción de velocidad del bobinador. Para un sistema de lazo abierto no existe retroalimentación de tensión del material bobinado.

Los sistemas de lazo cerrado cuentan con retroalimentación de medición de tensión por medio de celdas de carga que miden directamente la tensión del material y otros, utilizan un balancín, en cuyo caso se mide el desplazamiento del mismo como una forma indirecta de medir la tensión. La figura 29 representa el caso de un bobinador de centro con balancín.

La figura 30 muestra un esquema de bobinador – desbobinador de centro con celda de carga. Una de las técnicas más precisas de control requiere la medición del diámetro o el cálculo del mismo en función de los parámetros de configuración de la aplicación, así como las revoluciones del bobinador y la velocidad principal de la línea que alimenta el bobinador.

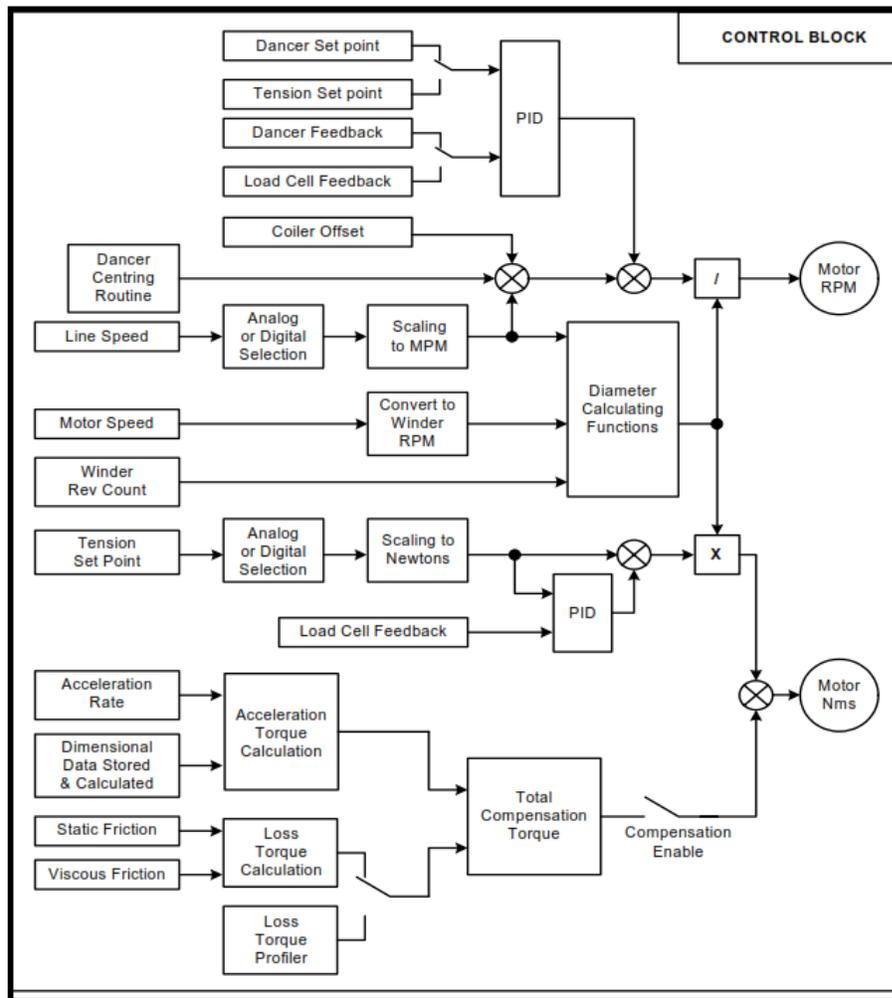
Los controladores más completos incluyen cálculos de la inercia del rollo, fricción de las partes rotativas del bobinador, cálculo de aceleraciones y control PID.

Figura 30. **Bobinador de centro con celda de carga**



Fuente: Control Techniques. (s.f.). *Control Techniques*. Recuperado de <http://acim.nidec.com/es-es/drives/control-techniques/products/ac-drives/unidrive-m/unidrive-m700>

Figura 31. Diagrama de bloques de control de bobinador



Fuente Control Techniques. (s.f.). *Control Techniques*. Recuperado de <http://acim.nidec.com/es-es/drives/control-techniques/products/ac-drives/unidrive-m/unidrive-m700>

8. ÍNDICE PROPUESTO

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y FORMULACIÓN DE PREGUNTAS

ORIENTADORAS

OBJETIVOS

DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

ALCANCES Y LÍMITES

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Teoría elemental de control

1.2. Sistemas de control

1.2.1. Objetivos de control

1.3. Estrategias de control

1.3.1. Control sin retroalimentación

1.3.2. Control con retroalimentación

1.3.3. Elementos básicos

1.3.4. Comparaciones

1.3.5. Función de transferencia

1.3.6. Ganancia de transferencia sin retroalimentación

1.3.7. Ganancia de transferencia con retroalimentación

1.3.8. Función impulso

1.3.9. Diagrama de bloques

- 1.4. Sistema de control PID
 - 1.4.1. Acción *on – off*
 - 1.4.2. Control proporcional
 - 1.4.3. Control integral
 - 1.4.4. Control derivativo
 - 1.4.5. Control PI
 - 1.4.6. Control PD
 - 1.4.7. Control PID
 - 1.4.8. Sintonía de control PID Método de sintonía Ziegler – Nichols
 - 1.4.9. Método de sintonía por amplitud y fase (método del relay o relevador)
 - 1.5. Variadores de frecuencia *Control Techniques M700*
 - 1.5.1. Descripción general
 - 1.5.2. Configuración de parámetros
 - 1.5.3. Métodos de programación
 - 1.5.4. Módulos opcionales de programación
 - 1.6. Bobinadores
 - 1.6.1. Bobinador de centro
 - 1.6.1.1. Componentes básicos
 - 1.6.1.2. Aplicaciones
 - 1.6.1.3. Dimensionamientos básicos
 - 1.6.1.4. Estrategias de control
-
- 2. BOBINADOR DE CENTRO
 - 2.1. Descripción general del bobinador de centro
 - 2.2. Componentes principales
 - 2.3. Diagrama de bloques y función de transferencia de referencia

3. DIMENSIONAMIENTO DEL BOBINADOR EXPERIMENTAL
 - 3.1. Potencia de motor
 - 3.2. Velocidades del bobinador
 - 3.3. Torques

4. IMPLEMENTACIÓN DE ALGORITMO DE CONTROL
 - 4.1. Descripción general del algoritmo
 - 4.2. Diagrama de flujo del algoritmo
 - 4.3. Implementación

5. PRUEBAS EXPERIMENTALES
 - 5.1. Determinación de tiempos de reacción del algoritmo
 - 5.2. Valores de la tensión durante el proceso de bobinado sin la implementación del algoritmo
 - 5.3. Valores de la tensión durante el proceso de bobinado con la implementación del algoritmo
 - 5.4. Energía consumida durante el proceso de bobinado de material sin la implementación del algoritmo
 - 5.5. Energía consumida durante el proceso de bobinado de material con la implementación del algoritmo

6. CÁLCULOS DE EFICIENCIAS Y BENEFICIO AMBIENTAL
 - 6.1. Cálculo de ahorro energético
 - 6.2. Cálculo del beneficio ambiental por reducción de consumo energético

7. RESULTADOS
 - 7.1. Presentación de resultados
 - 7.2. Discusión de resultados

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

9. MÉTODOS Y TÉCNICAS

9.1. Tipo de estudio

Este estudio se considera de tipo cuantitativo descriptivo. Considera el diseño de un algoritmo de auto sintonía que se implementará en un variador de frecuencia y las respectivas mediciones de los efectos sobre el sistema por la implementación de este algoritmo.

9.2. Variables

Las principales variables de estudio para este caso serán la tensión T del material que se enrolla o bobina con variaciones no mayor al 20 % del valor esperado y los kWh (kilowatts hora) correspondientes al consumo de energía durante el procedimiento.

9.3. Fases de estudio

A continuación, se describe cada una de las fases del estudio.

9.3.1. Fase 1: exploración bibliográfica

En esta primera fase se revisará toda la bibliografía pertinente para la explicación del tema de estudio y todos sus componentes. Con esta información se establecerá la base para el diseño del algoritmo de control y su aplicación en el control de tensión de un bobinador.

9.3.2. Fase 2: recolección de datos y casos

Para la recolección de datos del caso de estudio, se presentan las siguientes etapas:

9.3.2.1. Bobinador experimental

En esta etapa se procede a la implementación del bobinador experimental. Se implementará un bobinador o enrollador de centro, operado por un motor eléctrico de corriente alterna y variador de frecuencia para el bobinador y para el alimentador principal o motor de línea. La tensión del bobinador se medirá en forma indirecta por medio de un dancier o balancín, que se desplaza en línea vertical con las variaciones de la tensión que sufre el bobinador.

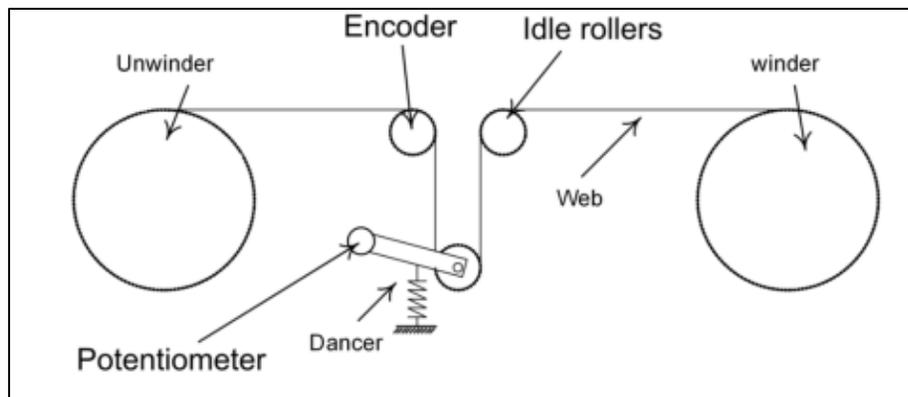
En el balancín o dancier se instalará un peso para ejercer tensión sobre el material que se está bobinando. Todas las pruebas de bobinado se realizarán sobre un mismo material. No se realizarán pruebas con diferentes materiales. Así también, las dimensiones finales de los rollos terminados se establecen en un valor máximo para las pruebas.

Figura 32. **Representación de un bobinador de centro**



Fuente: Aalborg University. (s.f.). *Control adaptativo con autoajuste para bobinadoras web orientadas al centro*. Recuperado de https://projekter.aau.dk/projekter/files/17642396/Adaptiv_control_for_web_winder.pdf. Obtenido de Adaptive Control With Self-Tuning For Center-Driven Web Winders

Figura 33. **Esquema de bobinador de centro**

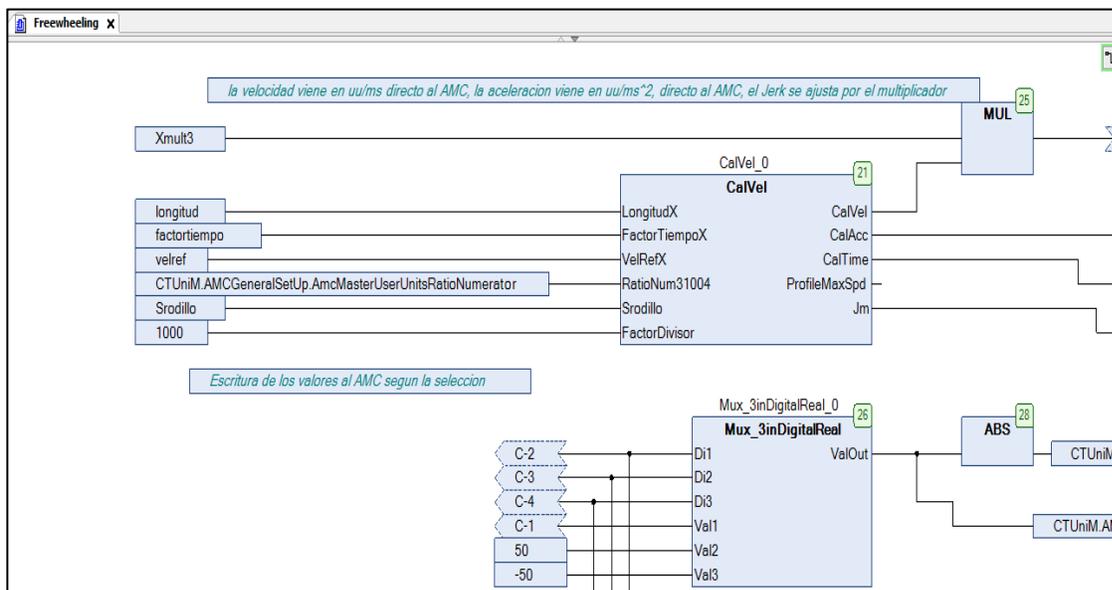


Fuente: Aalborg University. (s.f.). *Control adaptativo con autoajuste para bobinadoras web orientadas al centro*. Recuperado de https://projekter.aau.dk/projekter/files/17642396/Adaptiv_control_for_web_winder.pdf. Obtenido de Adaptive Control With Self-Tuning For Center-Driven Web Winders

9.3.2.2. Implementación de algoritmo

El algoritmo de control será implementado en un variador de frecuencia con capacidad de programación en diferentes lenguajes de programación, siendo estos: programación en texto, programación en escalera, programación en secuencia de funciones y programación en bloques. La programación de este algoritmo se realizará con el software *Machine Control Studio* propio de programación del equipo utilizado.

Figura 34. Software de programación *Machine Control Studio*



Fuente: software Machine Control Studio

9.3.2.3. Medición del tiempo de respuesta del algoritmo

En esta etapa se medirá el tiempo que le toma al algoritmo encontrar los parámetros del controlador PID. La medición del tiempo será implementada en el propio algoritmo utilizando los cronómetros internos con los cuales cuenta el equipo. La precisión de estos cronómetros se encuentra en el rango de los milisegundos, que es suficiente resolución para la medición del tiempo. Se realizará tabulación de los valores medidos para 3 experimentos con diferentes diámetros del rollo bobinado.

Tabla II. **Tiempo de respuesta del algoritmo a diferentes diámetros**

Diámetro	Tensión de referencia	Tiempo de respuesta
0.0508 metros	22.24N	
0.1016 metros	22.24N	
0.1524 metros	22.24N	

Fuente: elaboración propia.

9.3.2.4. Medición de tensión

En esta etapa se medirá tensión en forma indirecta. Se medirá el desplazamiento de un balancín que su movimiento es proporcional a la tensión del material que se está bobinando. Es en este balancín donde aplicaremos la tensión de prueba y el sistema mantendrá la tensión que se ha establecido previamente en el controlador PID. La variación de la tensión está relacionada con la efectividad del sintonizado de los parámetros proporcionales, integrales y derivadas del controlador. El desplazamiento del balancín será medido por un potenciómetro instalado en el sistema.

Figura 35. **Potenciómetro para la medición del desplazamiento**



Fuente: información del fabricante

La señal producida por este potenciómetro será conectada a una entrada analógica de las tres con las que cuenta el variador de frecuencia. Esta señal analógica será registrada gráficamente con el software CTScope de osciloscopio digital suministrado por el fabricante del variador. Este software tiene la capacidad de mostrar gráficamente la forma de la señal y capturar datos para su posterior análisis. Se realizarán tres diferentes pruebas para registro de la variación de la tensión. También se realizan mediciones de tensión utilizando valores del control PID aleatorios y tener un punto de comparación entre los valores aleatorios y los valores obtenidos con el algoritmo.

Tabla III. **Variación de tensión con valores PID aleatorios**

Diámetro	Tensión de referencia	T. MIN	T. MAX	T. PROM
0.0508 metros	22.24N			
0.1016 metros	22.24N			
0.1524 metros	22.24N			

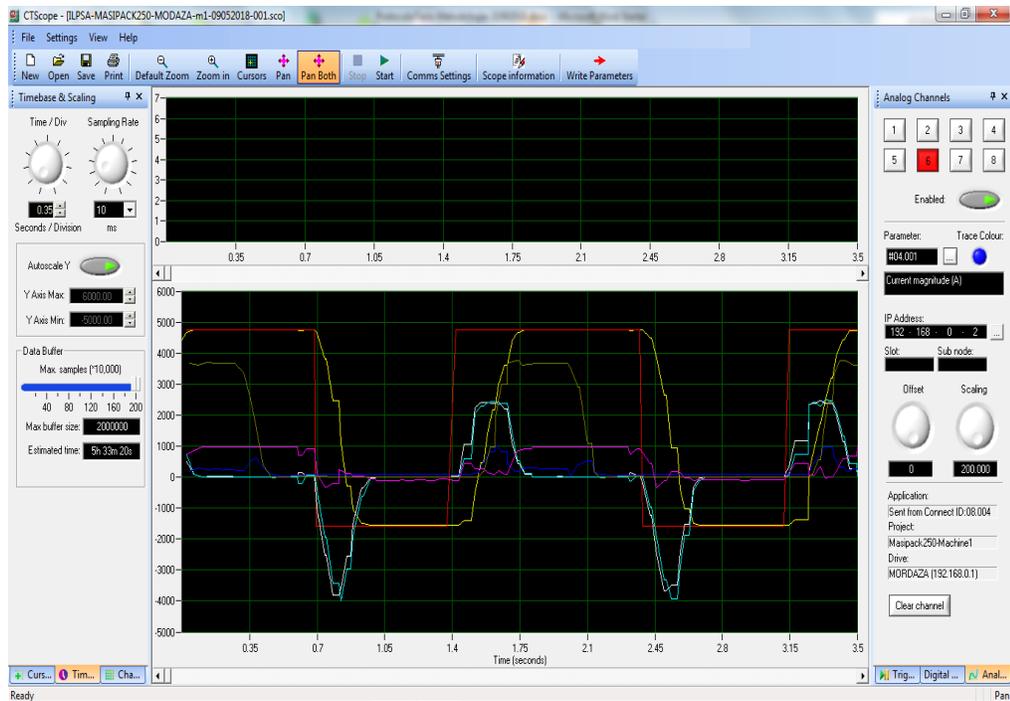
Fuente: elaboración propia.

Tabla IV. Variación de tensión con valores PID obtenidos por el algoritmo

Diámetro	Tensión de referencia	T. MIN	T. MAX	T. PROM
0.0508 metros	22.24N			
0.1016 metros	22.24N			
0.1524 metros	22.24N			

Fuente: elaboración propia.

Figura 36. Osciloscopio digital con software CTScope



Fuente: software CTScope.

9.3.2.5. Medición de eficiencia energética

La eficiencia energética será medida antes y después de implementar la auto sintonía de los parámetros del controlador PID. Las mediciones consistirán en registrar el consumo en kWh durante las pruebas de bobinado para diferentes diámetros y un valor de tensión. El variador utilizado cuenta con medición interna de consumo de kWh. En el algoritmo se implementará la captura de los kWh al inicio y los kWh al final del ciclo de bobinado. El consumo será la diferencia entre ambos valores:

$$\text{kWhConsumo} = \text{kWh capturado al final} - \text{kWh capturado al inicio.}$$

También se realizarán mediciones de kWh con valores aleatorios del controlador PID y tener un punto de comparación con los valores obtenidos del controlador PID del algoritmo.

Tabla V. **KWh de consumo con valores aleatorios de control PID**

Diámetro	Tensión de referencia	kWh inicio	kWh final	kWh consumo
0.0508 metros	22.24N			
0.1016 metros	22.24N			
0.1524 metros	22.24N			

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **KWh de consumo con valores de control PID proporcionados por el algoritmo**

Diámetro	Tensión de referencia	kWh inicio	kWh final	kWh consumo
0.0508 metros	22.24N			
0.1016 metros	22.24N			
0.1524 metros	22.24N			

Fuente: elaboración propia.

9.3.2.6. Cálculo del beneficio ambiental

En esta etapa se calculará el beneficio ambiental con la implementación del algoritmo de auto sintonía. El beneficio ambiental se obtendrá de la reducción del consumo energético implementando el algoritmo de control de auto sintonía. El beneficio ambiental se calculará en relación directa a la reducción de consumo de energía y reducción de CO2 que se obtiene de dicho ahorro. Los datos.

Aunque, también, existen beneficios ambientales al implementar el algoritmo de control por reducción de material de desperdicio no es parte del presente estudio el calcular dicho beneficio ambiental.

9.3.3. Fase 3: interpretación de resultados

Con los datos obtenidos en las fases anteriores se procede a realizarse comparaciones y poder determinar si el algoritmo determina en un tiempo aceptable los parámetros del controlador PID. También se evalúa el desempeño de los valores obtenidos del controlador PID comparando los resultados de variación de tensión con valores aleatorios de los parámetros del control PID y

observar la respuesta del sistema. Por último, se realiza análisis del ahorro energético y su beneficio ambiental.

10. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Para el análisis de auto sintonía del controlador será necesaria la recopilación de información y la interpretación de datos. Para esto se utilizarán las siguientes herramientas:

- Diagramas de bloques de la implementación de programa.
- Tablas de tiempo de respuesta del algoritmo a diferentes diámetros.
- Tablas de variación de tensión para diferentes diámetros valore PID aleatorios.
- Tablas de variación de tensión para diferentes diámetros valore PID auto calculados.
- Tablas de consumo de kWh para diferentes diámetros con valores PID aleatorios.
- Tablas de consumo de kWh para diferentes diámetros con valores PID auto calculados.

Las herramientas estadísticas a utilizar son:

- Determinación de valores máximos, mínimos y promedio para los valores de tensión con valores aleatorios del controlador PID.
- Determinación de valores máximos, mínimos y promedio para los valores de tensión con valores auto calculados del controlador PID.
- Gráficas de curvas monótonas de tensión.
- Gráficas de barras para representación de valores de tensión.
- Gráficas de barras para representación de consumo en kWh.

11. CRONOGRAMA

Para darle un seguimiento detallado al desarrollo de la metodología se establecieron tiempos para el cumplimiento de las respectivas fases.

Figura 37. **Cronograma de actividades**

actividades	Año 2019					
	Enero	febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
Fase1: Exploracion bibliografica	■	■	■			
Fase2: Recoleccion de datos casos		■	■	■	■	
Fase3: Interpretacion de resultados					■	■

Fuente: elaboración propia.

12. FACTIBILIDAD DE LA INVESTIGACIÓN

El presente trabajo de investigación se llevará a cabo con fondos propios del estudiante de maestría. La investigación se considera de tipo descriptiva, Se tendrá una inversión de Q. 7,050.00 detallada en la siguiente tabla:

Tabla VII. **Descripción de inversión para la investigación**

Recursos	Costos
Estructura	Q 2,500.00
Sensores	Q 1,500.00
Fajas	Q 250.00
Poleas	Q 300.00
asesor	Q 2,500.00
total	Q 7,050.00

Fuente: elaboración propia.

Siendo los recursos aportados suficientes para la investigación, se considera que es factible la realización del estudio.

13. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Aalborg University. (s.f.). *Control adaptativo con autoajuste para bobinadoras web orientadas al centro*. Recuperado de https://projekter.aau.dk/projekter/files/17642396/Adaptiv_control_for_web_winder.pdf.
2. Aströn, K. J., & Hägglund, T. (1984). *Automatic tuning of simple regulators with specifications on phase and amplitude margins*. *Automatica Vol 20 No. 5*, 645-651. España: Elsevier
3. Blanco, D., Barber, R., Malfaz, M., & Salichs, M. (n.d.). *Universidad Carlos III*. Recuperado de <http://ocw.uc3m.es/ingenieria-de-sistemas-y-automatica/senales-y-sistemas/temas/tema-5-diagrama-de-bloques>
4. Bolton, W. (2001). *Ingeniería de control*. Mexico: Alfaomega Grupo Editor, S.A. DE C.V.
5. Carrillo, A. J. (2011). *Sistemas automáticos de control*. Santa Rita, Edo. Zulia Venezuela: UNERMB.
6. Control Techniques. (s.f.). *Control Techniques*. Recuperado de <http://acim.nidec.com/es-es/drives/control-techniques/products/ac-drives/unidrive-m/unidrive-m700>

7. Dudzinski, M. (2000). *Understanding center-driven web winders*. Recuperado de <https://www.machinedesign.com/sensors/understanding-center-driven-web-winders-part-1>
8. Golato, M. (n.d.). *Sistemas de control*. Recuperado de https://catedras.facet.unt.edu.ar/sistemasdecontrol/wp-content/uploads/sites/101/2016/04/5_Acciones-de-control_2016.pdf
9. Hernandez, D. (1998). *Autosintonización de lazos de control PID en controladores programables*. Nuevo León, México: Universidad Autónoma de Nuevo León
10. Morilla, F. (2006). *CONTROLADORES PID, AJUSTE EMPIRICO*. Departamento de Informática y Automática, ETSI de informática, UNED .
11. Morozov, D. (n.d.). *Siemens Industry, Inc*. Recuperado de <https://www.industry.usa.siemens.com/drives/us/en/motion-control-systems-and-solutions/motion-control-success-stories/Documents/IND-converting-WP-Tension-control-center-winders.pdf>
12. Ogata, K. (2010). *Ingeniería de control moderna*. Madrid, España: Pearson Educacion, S.A.
13. Ruge, A. (2011). *Optimización de señal de control en reguladores PID con arquitectura antireset Wind-Up*. Recuperado de <http://www.scielo.org.co/pdf/tecn/v15n30/v15n30a03.pdf>

14. Sousa, M. (n.d.). *Relay method on auto-tuning automation solutions*. Recuperado de <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395139427476/Resumo%20Alargado%20-%20Auto-tuning%20de%20Controladores%20PID%20pelo%20m%C3%A9todo%20Relay.pdf>

15. Wilson, D. (2005). Relay - Based PID Tuning. *Automation & Control*. Recuperado de <https://www.semanticscholar.org/paper/Relay-based-PID-tuning-Wilson/8a51b855e2878b1d6ef5fb0473eda05d2463eb76>

