# UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE CUENCA

# CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO
A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRÓNICO

PROYECTO TÉCNICO CON ENFOQUE INVESTIGATIVO:

CONTROL DE POSICIÓN DE UNA MASA SUSPENDIDA
MEDIANTE DOS CABLES BAJO LOS EFECTOS DE LA
CATENARIA

**AUTORES:** 

JOHN MATHEWS CASTILLO GUERRERO EDGAR VLADIMIR LOJA BARBECHO

TUTOR:

ING. MARCO ALEXANDER CARPIO ALEMÁN, MGTR.

CUENCA – ECUADOR 2018 CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros, JOHN MATHEWS CASTILLO GUERRERO con documento de identificación N°0105816185 y EDGAR VLADIMIR LOJA BARBECHO con

documento de identificación N°0105199269, manifestamos nuestra voluntad y

cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos

patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación: CONTROL

DE POSICIÓN DE UNA MASA SUSPENDIDA MEDIANTE DOS CABLES

BAJO LOS EFECTOS DE LA CATENARIA, mismo que ha sido desarrollado

para optar por el título de: Ingeniero Electrónico, en la Universidad Politécnica

Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos

cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra

condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En

concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo

final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica

Salesiana.

Cuenca, 31 de julio del 2018

John Mathews Castillo Guerrero

CI: 0105816185

Edgar Vladimir Voja Barbecho

CI: 0105199269

## **CERTIFICACIÓN**

Yo, declaro que bajo mi **tutoría** fue desarrollado el trabajo de titulación: **CONTROL DE POSICIÓN DE UNA MASA SUSPENDIDA MEDIANTE DOS CABLES BAJO LOS EFECTOS DE LA CATENARIA**, realizado por JOHN MATHEWS CASTILLO GUERRERO y EDGAR VLADIMIR LOJA BARBECHO, obteniendo el *Proyecto Técnico con enfoque investigativo*, que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 31 de julio del 2018

Ing. Marco Alexander Carpio Alemán

CI: 0103815338

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, JOHN MATHEWS CASTILLO GUERRERO con número de cédula CI. 0105816185 y EDGAR VLADIMIR LOJA BARBECHO con número de cédula CI. 0105199269, autores del trabajo de titulación: CONTROL DE POSICIÓN DE UNA MASA SUSPENDIDA MEDIANTE DOS CABLES BAJO LOS EFECTOS DE LA CATENARIA certificamos que el total contenido del *Proyecto Técnico con enfoque investigativo*, es de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría

Cuenca, 31 de julio del 2018

John Mathews Castillo Guerrero

CI: 0105816185

Edgar Vladimir Voja Barbecho

CI: 0105199269

## **AGRADECIMIENTOS**

Primeramente doy gracias a Dios y a mi familia por ser parte fundamental en mi vida en todo este tiempo académico, porque gracias a su apoyo incondicional he podido cumplir varias de mis metas planteadas en todos mis años de estudio y he podido ser un gran ejemplo para mis hermanos; además de mi más sentido agradecimiento a la Universidad Politécnica Salesiana por es un pilar en mi vida, ya que gracias a toda la formación salesiana que nos brindaron todos los docentes, he podido llegar a ser una mejor persona, con muchísimos más conocimientos y salesiano de corazón. También agradezco de la manera más cordial a mi tutor Ing. Marco Carpio, quien fue nuestra guía fundamental para que el presente proyecto se realizara de la mejor manera, agradezco su tiempo, apoyo y dedicación que nos brindó. Conjuntamente agradezco a mi compañero Edgar Vladimir Loja, quien fue una persona que me enseñó mucho, gracias a tantas vivencias y dedicaciones pudimos culminar de manera exitosa este proyecto, demostrando ser un gran equipo y compañero frente a todos los retos que se nos plantearon a lo largo de la realización del presente trabajo. Finalmente quiero agradecer de la manera más cordial al Ing. Carlos Tamay, por brindarnos su apoyo y tiempo en todo este proceso de realización del proyecto. Y gracias a todos los docentes y director de carrera de ingeniería electrónica por hacernos crecer tanto de manera personal, cognitiva y lógica para podernos enfrentar a retos y cumplirlos de manera exitosa. "Detrás de cada historia de éxito, hay tantos años de esfuerzo y sacrificio."

John Mathews Castillo Guerrero

No se puede concluir un trabajo tan importante sin poder bridar un gentil agradecimiento a la Universidad Politécnica Salesiana, por la formación y conocimientos adquiridos dentro de la escuela de ingeniería electrónica, además de mi sincero agradecimiento al Ing Marco Carpio, quien en calidad de tutor, brindo lo más preciado que tiene el ser humado, su valioso tiempo y orientación en este proyecto final, a mi compañero Mathews Castillo quien gracias a su capacidad e inteligencia conjuntamente hemos podido culminar con éxito este tesis aprendiendo mutuamente los valores de lealtad, respeto y sobre todo consideración en los días más duros que se trabajó para el alcance de este gran sueño, los momentos compartidos y las experiencias que vivimos en el trabajo diario de este proyecto de, tesis y de vida. También quiero agradecer de manera especial al Ing. Carlos Tamay, el cual gracias a su apoyo, tiempo y ayuda desinteresada se convirtió en parte del mismo. Además de agradecer a la dirección de carrera de la escuela de ingeniería electrónica y docentes quienes fueron parte de esta formación de todos estos años dedicados al estudio de la ingeniería.

Edgar Vladimir Loja Barbecho

## **DEDICATORIAS**

Se lo dedico, primeramente a Dios, por darme la salud y motivación para poder seguir adelante cumpliendo con todas mis metas. A mi madre querida a quien adoro con todo mi corazón, Sandra Guerrero por ser la que luchó siempre a lo largo de mi vida para darme los estudios y gracias a ella he podido alcanzar mi meta de ser Ingeniero. A mi padre Juan Castillo, por apoyarme y darme fuerzas para salir adelante y cumplir lo que me propongo. A mis abuelitos queridos Enma Albán y Edgar Guerrero, ellos han sido mi principal motivación a lo largo de todo este periodo para alcanzar mis metas y logros obtenidos, son como mis segundos padres les adoro abuelitos queridos. A mis ñaños mi Sebuco y mi Valentina, ellos son mi vida entera y todos mis logros se los dedico a ellos, que sepan que tienen un gran hermano como ejemplo a seguir y quien les apoyará siempre a lo largo de sus vidas para hacerles crecer como personas y darles las bases para ser exitosos en la vida. A mi Tía Mayra Guerrero, por ser como una madre para mí y apoyarme siempre en todas mis metas planteadas.

"La inteligencia no es solo el conocimiento, sino la habilidad de aplicar los conocimientos en la práctica utilizando la imaginación."

Gracias a todos,

John Mathews Castillo Guerrero

Esta tesis está dedicada especialmente

A:

Dios, por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado la salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor.

Mi madre Rosa, por darme la vida, y hacerme la persona que hoy en día soy, muchas gracias mamita por ser parte de este sueño, nunca me dejes, te amo con mi vida entera.

Mi padre Vicente, por los ejemplos de perseverancia, constancia que lo caracterizan y que me has infundado siempre, por el valor mostrado para salir adelante, Papi, yo soy una persona agraciada por tener la dicha de que tú me dieras la vida, te amo tanto y espero que nunca me dejes mi viejito.

Mi novia Magaly Bustamante, ella, ha sido y es, la mayor motivación en mi vida encaminada al éxito, fuiste el ingrediente perfecto para poder alcanzar esta dichosa y muy merecida victoria en la vida, el poder haber culminado esta tesis con éxito, y poder disfrutar del privilegio de ser agradecido, y ser grato contigo, con la persona que se preocupó por mí en cada momento y que siempre quiso y quiere, lo mejor para mi porvenir. Te Amo mi Gomita.

Mis hermanas, Silvia, Lourdes y Daysi, por estar conmigo y apoyarme siempre, las quiero mucho mis reinas.

Mis monitos, Steven, Jordi y Helen, sobrinos amados, quiero que vean en mí un ejemplo a seguir.

Es tan maravilloso haber tenido la dicha de que ustedes sean parte de mi vida, y espero la vida me dé la dicha de estar juntos por siempre.

Cuando un sueño se muere, es porque se ha hecho real...!

#### Edgar Vladimir Loja Barbecho

# ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	I
Dedicatoriasl	Ш
Índice General	V
Índice de FigurasV	Ή
ÍNDICE DE TABLAS	X
RESUMEN	X
Introducción	ΧI
Antecedentes del Problema de Estudio	Ш
JUSTIFICACIÓN (IMPORTANCIA Y ALCANCES)XI	V
Objetivos	V
OBJETIVO GENERAL X	V
Objetivos Específico X	V
CAPÍTULO 1: SISTEMA MECÁNICO ACCIONADO POR CABLES	. 1
1.1 Unimotor HD 230VAC, 55MM FRAME.	. 1
1.2 SERVO-DRIVE DST1202	. 3
1.3 cable de acero galvanizado	. 4
1.4 sistema de estudio	. 5
1.5 Controlador pid.	15
1.6 Controlador pid DISCRETO.	16
1.7 linealización extendida.	17
CAPÍTULO 2: MODELAMIENTO DEL SISTEMA DE POSICIÓN DE UNA MAS	SA
Suspendida Mediante Dos Cables Bajo Los Efectos De La Catenaria	18
2.1 identificación de la planta del sistema	18
2.2 ESTIMACIÓN DE la PLANTA UTILIZANDO IDENT DE MATLAB 2	20
2.3 Configuración del servo-drive DST1202	21
2.4 Condiciones para el funcionamiento del motor en la entrada analógica o	de
voltaje2	23

2.5 Modelo matemático
2.6 CONSTRUCIÓN ESRUCTURA
Capítulo 3: Implementación y Análisis de Resultados
3.1 IMPLEMENTACIÓN DEI CONTROLADOR de posición en el sotware labiew
3.2 DISEÑO Y SINTONIZACION DEL CONTROLADOR PID DE posición APLICANDO LINEALIZACION Extendida
3.3 pruebas del CONTROLADOR PID DE POSICION
4.1 CONCLUSIONES544.2 RECOMENDACIONES56REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS57
APÉNDICES
APÉNDICE A: Consideraciones para el conexionado del Servo Driver
APÉNDICE B: Consideraciones para QUE EL MOTOR FUNCIONE en UNA
ENTRADA ANALÓGICA DE VOLTAJE61
APÉNDICE C: Consideraciones para que el control de torque/corriente 64
APÉNDICE D: DIMENSIONES DEL TAMBOR DE ENROLLAMIENTO DE CABLE
APÉNDICE E: DIMENSIONES DE LA CAJA DE AGARRE PARA EL UNIMOTOR HE EMERSON
Apéndice F: Dimensiones de la Caja de Agarre para el Encoder que
POSICIONA LA BARRA70
APÉNDICE G: SISTEMA GENERAL IMPLEMENTADO 71

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Unimotor HD 55mm Frame. (Emerson, 2016)	2
Figura 1.2 Partes Generales del SERVO-DRIVE DST1202. (Emerson, 2016)	3
Figura 1.3 Cable de Acero Galvanizado 6 puntas	4
Figura 1.4 Soluciones planteadas por Leibniz y Huygens, enviadas para se	er
publicadas en el Acta Eruditorum en 1691. (Zárraga, 2010)	5
Figura 1.5 Puente Keshwa Chaca, Perú (Destino I, 2016)	6
Figura 1.6 Puente Akashi-Kaikyo, Kobe, Japón (Monica, 2012)	6
Figura 1.7 Catenaria formada en conductores de distribución eléctrica	7
Figura 1.8 Ferrocarril MADRID. (Benet & Arias & Cuartero & Rojo, 2004)	7
Figura 1.9 Análisis de tensiones axiales	8
Figura 1.10 Elemento diferencial	9
Figura 1.11 La curva catenaria1	. 1
Figura 1.12 Estructura General Control PID	6
Figura 1.13 Estructura controlador PID discreto	6
Figura 2.1 Diagrama de bloques para adquisición de datos de la planta 1	.8
Figura 2.2 Respuesta de la planta frente a un escalón de 6.72 V 1	9
Figura 2.3 (a) Respuesta de la planta en rpm frente a una referencia. (b) Respuest	ta
del motor HD frente a una referencia2	20
Figura 2.4 Modelos ARX generados en la planta del sistema	21
Figura 2.5 Conexiones para controlar el motor con el teclado	23
Figura 2.6 Conexiones para controlar el motor utilizando una entrada analógica	<i>a</i> .
(Emerson, 2016)	25
Figura 2.7 Diagrama de cuerpo libre de las fuerzas que actúan sobre la masa 2	26
Figura 2.8 Sistema de cable y barra accionado por dos cuerdas bajo los efectos de la	la
catenaria3	32
Figura 2.9 Diseño de la Estructura Final del Sistema Utilizado	3
Figura 2.10 (a) Construcción de la Estructura Final del Sistema (b) També	or
personalizado acoplado al motor trifásico de imanes permanentes (c) Servodrive	er
Indexer3	35
Figura 3.1 Diagrama de bloques del sistema3	36
Figura 3.2 Programa general del sistema utilizado para el análisis y control de un	ıa
masa accionada por dos cables bajo los efectos de la catenaria3	37

Figura 3.3 Etapa de ingreso de referencia de una rampa al sistema y visualización de
los datos
Figura 3.4 Etapa para el proceso de adquisición de datos
Figura 3.5 Etapa para habilitación del sistema y cambio de giro del motor
Figura 3.6 Etapa de monitoreo del Controlador de Posición
Figura 3.7 Etapa de protección sobre corrientes y Fuera de rango del sistema 40
Figura 3.8 Etapa para controlar la Velocidad y corriente del motor
Figura 3.9 Etapa para el cálculo efectivo de la posición Xb, Yb de la barra41
Figura 3.10 Etapa para calcular el índice de elasticidad del resorte
Figura 3.11 Etapa para calcular la Longitud de la Catenaria del Cable sometido a
varios tipos de posiciones
Figura 3.12 Respuesta a la rampa del sistema para un desplazamiento vertical
positivo
Figura 3.13 Diagrama general del sistema masa-cable-barra implementado 43
Figura 3.14 Sistema planificador de ganancias del controlador
Figura 3.15 Respuesta del comportamiento del sistema frente a un cambio de
referencia en posición ascendente
Figura 3.16 Respuesta del comportamiento del sistema frente a un cambio de
referencia en posición descendente47
Figura 3.17 Respuesta del comportamiento del sistema frente a varios tipos de
cambios de referencia en posición descendente
Figura 3.18 Respuesta del comportamiento del sistema frente a varios tipos de
cambios de referencia en posición ascendente
Figura 3.19 (a) Respuesta del comportamiento del sistema frente a varios tipos de
cambios de referencia y perturbaciones. (b) Respuesta del comportamiento del
sistema frente a un cambio de referencia y perturbaciones
Figura 3.20 Respuesta del comportamiento del sistema cuando la referencia
sobrepasa los límites de la estructura
Figura 3.21 Curva de Elongación del Resorte
Figura 3.22 Curva de Elasticidad del Resorte
Figura 3.23 Curva en respuesta de velocidad del motor frente a cambios de
referencia
Figura 3.24 Curva en respuesta del comportamiento del ángulo de la barra frente a
varios cambios de referencia

# **RESUMEN**

Mediante el uso de controladores, utilizando un algoritmo planificador de ganancias, se llega a estabilizar una masa en un punto de referencia dado. Con el objetivo de obtener una mejor uniformidad de respuesta, se diseña el sistema de control, mismo que al darle una señal de referencia tipo rampa, permite que el sistema se estabilice de manera suave y se adapte de forma rápida a la referencia planteada, con el fin de evitar el arranque acelerado del motor trifásico y obtener una mejor precisión en la respuesta del sistema. La planta que se analiza consta de dos cables de acero, una masa suspendida y una barra metálica, en donde, el primer cable al estar suspendido bajo el efecto de su propio peso presenta un efecto catenario que estático-dinámico se modela análisis matemáticamente comportamiento; y a su vez el otro cable de acero se encuentra dentro de una barra metálica combinado con un resorte, que permite representar los efectos de elasticidad del cable, lo cual se une a una masa ubicada en el punto de enlace de los elementos ya mencionados.

La sintonización del controlador se realiza en varias etapas diferentes, ya que al ser un sistema de tipo no lineal, este presenta variaciones mismas que no pueden ser gobernadas por un solo conjunto de variables Kp, Ki y Kd. Como solución al problema de la no linealidad, se procede a utilizar el método de la linealización extendida, ajustando diferentes parámetros Kp, Ki y Kd, para el ascenso o descenso de la masa por efecto de la elongación del cable. Las gráficas obtenidas visualizan la solución del problema y la plena acción de los controladores en las etapas correspondientes, dando una respuesta eficiente frente a perturbaciones externas, de esa manera estabilizando la masa en la posición de referencia dada en cada prueba realizada, y al mismo tiempo cumpliendo con los objetivos planteados.

# Introducción

El presente documento, se centra en el análisis de un sistema no lineal, para el cual se diseñó un controlador, basado en un sistema planificador de ganancias, mediante un algoritmo planteado en el Software LabVIEW, que escoge la mejor estimación de constantes KP, KI y KD, para el control PID de posición, en una trayectoria acorde al modelo del sistema mecánico, estabilizando y ubicando la masa utilizada en cualquier posición dada, mediante la evaluación y análisis de la catenaria.

El sistema de análisis está compuesto por: una masa suspendida mediante dos cables, entre los cuales, el primero por acción de su propio peso, toma un efecto catenario, mismo que es recogido bajo la acción de rotación de una tambor personalizado, adaptado en un motor trifásico de imanes permanentes (Unimotor HD frame 55mm), que funciona bajo el mando de un Servo Driver Indexer. El segundo cable está dentro de una barra mismo que esta sujetado a un resorte el cual tendrá como objetivo representar la elasticidad generada en el extremo de la articulación.

Como parte fundamental del objetivo de este proyecto inicialmente se realizó el análisis estático y dinámico, el cual mediante la obtención de un ángulo que se generara en cada punto de referencia se determinara la coordenada vertical, en la punta de la barra donde estará ubicada una masa dada como referencia la coordenada en el eje horizontal, el cual ,este modelo matemático será validado de manera experimental ya que con la ayuda de un flexómetro se constatara la longitud del cable en cada posición del rango de referencia, en lo cual se obtiene una función de transferencia para cada estado en donde el sistema presenta variaciones.

Este documento se ha dividido en cuatro capítulos que están estructurados de la siguiente manera, en el capítulo uno se hace referencia a los equipos a utilizar como es el motor trifásico de imanes permanentes, el servo driver, el cable de acero y un análisis previo del cable bajo los efectos de su peso que genera un efecto catenario al momento de estar suspendido, el segundo capítulo se centra en el estudio del modelo matemático y en base al análisis estático y dinámico de toda la planta, se establecen ecuaciones la cuales tendrán como objetivo ser parte del sistema de

control que se diseña en el mismo apartado, en lo cual se hace un minucioso análisis del diseño del mismo el cual será parte fundamental del proyecto a realizar. El tercer capítulo hace referencia al análisis de resultados, señales y graficas que son generadas bajo la acción del controlador diseñado. El cuarto capítulo es un apartado donde se concluye el trabajo con recomendaciones y un análisis minucioso de experiencias que nos permitieron alcanzar los objetivo de este proyecto.

# ANTECEDENTES DEL PROBLEMA DE ESTUDIO

Los problemas que se consideran en los sistemas de control, básicamente tratan dos pasos fundamentales, enfocados en el análisis, el cual investigas las diferentes características de un sistema existente y enfocado en el diseño, en donde se escogen los componentes para crear un sistema de control que paulatinamente realice una tarea particular. La mayoría de aplicaciones en la industria son sistemas no lineales, para ello se necesita un análisis detallado de sus parámetros, en donde se realiza un proceso matemático que consiste en linealizar, es decir realizar una aproximación de modelo del sistema. (Perez M. & Pérez A. & Pérez E, 2008). Pero esta aproximación sirve para un rango de comportamiento establecido, es decir que si cambian sus parámetros es necesario volver a reconfigurar las variables de control.

Para obtener la implementación del control automático sobre un sistema físico, es necesario conocer el modelo matemático en lazo abierto del sistema, teniendo en cuenta el sub-modelo matemático de la planta. En donde característicamente se puede obtener el modelo matemático para un sistema cuerda masa accionada por motores a través de experimentaciones que permitan tomar mediciones en diferentes puntos de operación del elemento, facilitando obtener curvas características del sistema. Considerando el uso y el envejecimiento de los motores en el sistema, que pueden llegar a provocar variaciones en las respuestas del sistema, por lo que se vuelve recomendable la determinación del modelo matemático a través de mediciones experimentales. (Yin & Wang, 2005).

# JUSTIFICACIÓN (IMPORTANCIA Y ALCANCES)

Debido a la incertidumbre del comportamiento de los cables suspendidos, es importante desarrollar un modelo matemático que nos permita analizar el comportamiento del sistema catenario, ya que de acuerdo a la trayectoria que realice el sistema se pueden ir constatando las variables físicas como son la velocidad, aceleración, tensión, elongación y momentos de inercia, ya que para este estudio se modela un cable suspendido, el cual es contraído y expandido mediante el uso de motores de corriente continua en sus extremos.

Al ser un modelo no lineal debido al comportamiento físico que genera el mismo, el control que se realiza para tensionar la cuerda debe tener relación directa con el modelo de la catenaria, es decir que aplicando diferentes técnicas de linealización, se debe concluir con un sistema robusto que permita darle trayectoria a la masa suspendida en el cable.

El análisis del comportamiento estático-dinámico del sistema catenario, permite conocer el comportamiento del cable que a su vez permite mantener el equilibrio de la masa, lo cual al ingresar perturbaciones al mismo, este debe responder y mantenerse constante de acuerdo al rango de control que se aplique.

Los sistemas catenarios son muy utilizados para el diseño de puentes colgantes, así como para el movimiento que desplaza cargas suspendidas como ascensores, transportadores etc. Este modelo a plantear permite aportar técnicas para el diseño de muchos más sistemas que tengan aplicaciones con catenarias, y el desarrollo de diferentes tecnologías dentro de este campo de estudio.

# **OBJETIVOS**

#### **OBJETIVO GENERAL**

 Diseñar un control de posición de una masa suspendida en dos cables, bajo los efectos de catenaria

#### **OBJETIVOS ESPECÍFICO**

- Implementar el modelo estático-dinámico el sistema considerando los efectos de catenaria.
- Imponer una función de trayectoria y velocidad que permita mover la masa uniformemente.
- Controlar el movimiento y elongación de los extremos de los cables de la catenaria con el uso de motores que se muevan bajo el efecto de control de posición.

# CAPÍTULO 1: SISTEMA MECÁNICO ACCIONADO POR CABLES

El sistema está constituido por elementos mecánicos y dispositivos de control, los cuales permiten el desplazamiento de las cuerdas, las mismas que posicionarán una masa en un punto determinado. Dichos elementos utilizados se describen a continuación:

#### 1.1 UNIMOTOR HD 230VAC, 55MM FRAME.

El Servomotor utilizado, es un motor trifásico de imanes permanentes Unimotor HD de la serie de motores servo CA sin escobillas, proporcionando soluciones compactas de baja inercia para aplicaciones que requieren par muy alto durante la aceleración y desaceleraciones rápida de cualquier trabajo, como se muestra en la Figura 1.1. El perfil de torque HD de Unimotor está estrechamente relacionado con Servo accionamientos Digitax ST, que proporcionan una sobrecarga máxima de 300% para un rendimiento dinámico máximo. También se encuentra equipado de un encoder absoluto que muestra alta resolución, para la aplicación propuesta. (Emerson, 2016)



Figura 1.1 Unimotor HD 55mm Frame. (Emerson, 2016)

#### Características principales:

- Rango de par: 6,4 a 166 lb-in (0,72 a 18,8 Nm).
- Alta relación de par a inercia para un alto rendimiento dinámico.
- Compacto y poderoso.
- Freno de mantenimiento opcional.
- Conformidad IP65.
- Diseño de estator segmentado.
- Rendimiento de clase mundial.
- Devanado para adaptarse a 230 V y 460 V.
- Las velocidades incluyen 2000, 3000, 4000 y 6000rpm.
- Grandes ejes para aumentar la rigidez torsional.
- Múltiples opciones de comentarios:
  - o Codificador Intensivo: alta precisión, resolución media
  - Inductivo absoluto: precisión media, medio resolución, vuelta única y vuelta múltiple.
  - SinCos / absoluto óptico: alta precisión, alta resolución, vuelta única y vuelta múltiple.
  - Resolver: robusto para aplicaciones extremas y condiciones; menor precisión, resolución media. (Emerson, 2016)

#### 1.2 SERVO-DRIVE DST1202

Digitax ST Indexer, es un servo driver diseñado para aplicaciones sencillas e independientes de posicionado, integra múltiples buses de campo y entradas/salidas (E/S), que permiten su interconexión a otros componentes de automatización. Como se puede observar en la Figura 1.2. Genera a su vez perfiles de movimientos punto a punto, que incluyen los movimientos relativos, absolutos, rotatorios positivos y negativos, así como de registro y origen, funcionando como un controlador de sistema independiente, formando parte de un sistema distribuido en el que los comandos se envían a través de un bus de campo o señales de entrada/salida digitales. (Emerson, 2016).



Figura 2.2 Partes Generales del SERVO-DRIVE DST1202. (Emerson, 2016)

#### Aplicaciones típicas

- Tablas de indexado y platos divisores
- Posicionamiento rápido de unas cintas transportadoras
- Máquinas de alimentación por posición
- Troqueladoras, punzonadoras, etiquetadoras
- Mecanismos de transferencia
- Dispensación rápida y precisa de líquidos

**Tabla 1.1 Características del Servo Driver Indexer Implementado en el proyecto.** (Emerson, 2016).

Características técnicas del Servo-Driver DST1202			
Tensión Nominal	230 V		
Nº de Fases de Entrada	1		
Intensidad Nominal	2.4 A		
Intensidad Pico	4.8 A		
Tensión de Suministro Eléctrico	200V-240V+/-10% monofásico		
Rango de Frecuencias Admisibles	48 Hz a 65 Hz		
E/S analógica y digital	1 salida de relé 3 entradas digitales 3 entradas/salidas bidireccionales 1 entrada para desactivación segura del par 1 entrada analógica de alta resolución (16 bits + signo) 1 entrada analógica estándar (10 bits + signo) 2 salidas analógicas 1 entrada de captura (1μs)		

#### 1.3 CABLE DE ACERO GALVANIZADO

En el presente proyecto se utiliza un cable de acero galvanizado, el cual posee una resistencia de ruptura y diámetro de cable efectivo, como se presenta en la Tabla 1, para soportar la masa propuesta en el sistema y adaptarse de manera óptima en el tambor de enrollamiento. Véase la Figura 1.3.



Figura 3.3 Cable de Acero Galvanizado 6 puntas

Tabla 1.2 Características Cable De Acero Implementado (TecniCables, 2014)

Características técnicas del cable de acero		
Diámetro del Cable	2mm	
Resistencia a la Ruptura	425Kg	
Peso Por 5m	0.45Kg	

#### 1.4 SISTEMA DE ESTUDIO

#### 1.4.1 LA CATENARIA

A lo largo de la historia el científico Galileo Galilei se mostró interesado por la curvatura que generaban los cables suspendidos, así como cadenas y líneas de transmisión eléctrica de los ferrocarriles, por lo cual, mediante sus investigaciones publicadas en 1638, determinaba que aquella curva se asemejaba a la de una parábola. A los 17 años de edad, Christian Huygens demostró por primera vez que aquella curva que se formaba en los cables suspendidos, eran generados por la acción de su propio peso, lo cual los análisis planteados en esa fecha, no respondían matemáticamente a la ecuación de una parábola. En 1690 fue cuando el matemático suizo Jakob Bernoulli publica en el Acta Eruditorum, proponiendo descubrir la función matemática que defina la curva de la cadena colgante, fue así que en 1691 los matemáticos Gottfried Leibniz, Christian Huygens y Johann Bernoulli, motivados por aquel desafío planteado, obtienen por primera vez la fórmula de esta deformación física de la cadena colgante, la que posteriormente Huygens la denomina con el nombre de Catenaria, término que se deriva del latín Catena, que significa Cadena. (Zárraga, 2010) (Irvine, 1981)

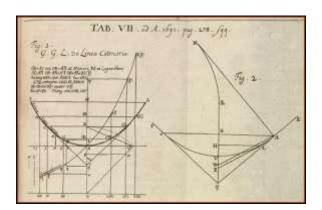


Figura 4.4 Soluciones planteadas por Leibniz y Huygens, enviadas para ser publicadas en el Acta Eruditorum en 1691. (Zárraga, 2010)

#### 1.4.2 Catenaria en la Ingeniería Estructural

La curva catenaria, desde la antigüedad ha dado soluciones para los diversos tipos de sistemas estructurales como son los puentes colgantes fabricados con sogas, en la actualidad el uso de los cables de acero de alta resistencia aplicados a la ingeniería estructural genera diversas ventajas como es la durabilidad y mejoras en

los diseños, ya que al utilizar estos cables, los costos de construcción de las estructuras se vuelven más accesibles. (Addis, 2013)



Figura 5.5 Puente Keshwa Chaca, Perú (Destino I, 2016)

En la actualidad el uso de los cables para la construcción de puentes se ha convertido en soluciones estructurales eficientes de las cuales se pueden admirar diferentes tipos de obras que en su momento fueron catalogadas como records mundiales, como es el puente Akashi-Kaikyo.



Figura 6.6 Puente Akashi-Kaikyo, Kobe, Japón (Monica, 2012)

#### 1.4.3 CATENARIA EN LA INGENIERÍA ELÉCTRICA

El análisis de los cables colgantes de transmisión eléctrica, también determina un modelo catenario, por el cual los ingenieros estructurales analizan los esfuerzos verticales que producen los conductores debido a su propio peso, los esfuerzos transversales que se genera en los conductores de acuerdo a la fuerza que ejerce el viento sobre los mismos y los esfuerzos longitudinales que son provocados en las bases que soporta la línea de transmisión, debida a la tracción longitudinal que determinan los conductores eléctricos. (Dávila & Sánchez)

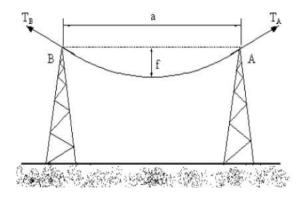


Figura 7.7 Catenaria formada en conductores de distribución eléctrica.

Sin embargo el uso del modelo catenario es imprescindible para el diseño de redes de transmisión, lo cual permite a los diseñadores de torres eléctricas, tener una referencia más exacta sobre las tensiones futuras a las que las torres estarán expuestas por acción de los conductores, permitiendo una mejor solidificación y cimentación de las bases y apoyos de las mismas sobre la superficie terrestre.

# 1.4.4 CATENARIA COMO LÍNEA AÉREA DE CONTACTO

Sin duda una de las aplicaciones más comunes es la de los cables en los ferrocarriles, ya que el tendido de estos cables en forma de conductores eléctricos, de forma longitudinal permite la alimentación de las unidades de tren que se mueven bajo la acción de motores eléctricos. Estos trenes se energizan mediante el uso de pantógrafos, el cual permite la captación de la energía eléctrica desde la línea aérea de contacto. (Benet & Arias & Cuartero & Rojo, 2004)



Figura 8.8 Ferrocarril MADRID. (Benet & Arias & Cuartero & Rojo, 2004)

#### 1.4.5 MODELO MATEMÁTICO DE LA CATENARIA

La curva catenaria que forma un cable colgante es analizada y comprobada en (Irvine, 1981), ya que para esto se asume que el cable se comporta como un sistema que actúa bajo cargas continuas. El análisis parte fundamentalmente de las ecuaciones de equilibrio planteadas sobre un elemento diferencial de un pedazo del mismo que está sometida a tensiones.

El cable es un cuerpo, cuya dimensión apreciable es la longitudinal, teniendo en cuenta que las dimensiones de su sección transversal son despreciables frente a su longitud, este cable se puede curvar sin esfuerzo alguno y no se deforma o estira ante esfuerzos de tensión ya que el mismo únicamente es capaz de trasmitir internamente una tensión axial.

En la Figura 1.9 vemos un trozo de hilo limitado por los extremos A y B, un punto intermedio m, en donde aparecen las tensiones axiales que naturalmente, por ser un punto de unión entre dos tramos son -T y +T estan en equilibrio, las fuerzas exteriores que se miran son  $F_1$  y  $F_2$  lo que se asume que el conjunto de fuerzas estará en equilibrio.

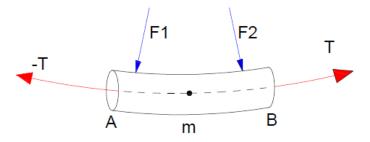


Figura 9.9 Análisis de tensiones axiales

Las ecuaciones que definen la curva que adopta la cuerda ante las fuerzas exteriores, se generan de acuerdo a las ecuaciones de equilibrio, en la Figura 1.10 se muestra un tramo de cuerda de dimensión diferencial ds, en el lado izquierdo del elemento se tiene la tracción -T y por el lado derecho de ds se tiene la tensión T + dT debido a que hay una diferencial ds esa diferencial dt es la vaciación de T al pasar de un punto m de extremo izquiedo de la diferencial hacia el extremo derecho.

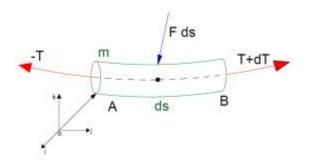


Figura 10.10 Elemento diferencial

Las ecuaciones que definen la curva que adopta la cuerda ante las fuerzas exteriores, se generan de acuerdo a las ecuaciones de equilibrio, en la Figura 1.10 se muestra un tramo de cuerda de dimensión diferencial ds, en el lado izquierdo del elemento se tiene la tracción -T y por el lado derecho de ds se tiene la tensión T+dT debido a que hay una diferencial ds esa diferencial dt es la vaciación de T al pasar de un punto m de extremo izquiedo de la diferencial hacia el extremo derecho.

$$\vec{F} * d\vec{s} \tag{1}$$

#### 1.4.6 CONDICIONES DE EQUILIBRIO

• La primera condición de equilibrio, indica que la resultante de fuerzas que actúan sobre un cuerpo solido se anulan, de acuerdo a la Figura 1.10 estas fuerzas son:

$$-\vec{T} + (\vec{T} + d\vec{T}) + (\vec{F} * d\vec{s}) = 0$$
 (2)

$$d\vec{T} + (\vec{F} * d\vec{s}) = 0 \tag{3}$$

$$d\vec{T} = -(\vec{F} * d\vec{s}) \tag{4}$$

• La segunda condición de equilibrio indica que la sumatoria de los momentos de torsión de las fuerzas aplicadas al solido es cero en cualquier punto del espacio, de acuerdo a la figura 7, los momentos existentes son:

$$\left(-\overrightarrow{om} \times \overrightarrow{T}\right) + \left[\left(\overrightarrow{om} + d\overrightarrow{s}\right) \times \left(\overrightarrow{T} + d\overrightarrow{T}\right)\right] + \left[\left(\overrightarrow{om} + \frac{d\overrightarrow{s}}{2}\right) \times \left(\overrightarrow{F} * d\overrightarrow{s}\right)\right]$$
 (5)

El producto de dos infinitésimos de primer orden  $d\vec{s}$  son infinitésimos de segundo orden, el cual serán despreciados, realizando los productos vectoriales correspondientes y reduciendo la ecuación (3) se tiene la siguiente expresión:

$$d\vec{s} \times \vec{T} = 0 \tag{6}$$

Lo que indica que el diferencial  $d\vec{s}$  y  $\vec{T}$  son paralelos coincidentes en dirección, determinando que la tensión que se ejerce al elemento diferencial  $d\vec{s}$  T es axial, lo cual determina que la tensión ejercida a la cuerda se representa de la siguiente manera:

$$\vec{T} = T \left( \frac{dx}{ds} \vec{i} + \frac{dy}{ds} \vec{j} + \frac{dz}{ds} \vec{k} \right) \tag{7}$$

$$\vec{F} = F_x \vec{\iota} + F_y \vec{J} + F_z \vec{k} \tag{8}$$

De acuerdo a (4) se obtiene la siguiente relacion:

$$\frac{d\vec{T}}{d\vec{s}} = -\vec{F} \tag{9}$$

$$\frac{d}{ds}\left(T*\frac{dx}{ds}\vec{i}\right) + \frac{d}{ds}\left(T*\frac{dy}{ds}\vec{j}\right) + \frac{d}{ds}\left(T*\frac{dz}{ds}\vec{k}\right) = -F_x\vec{i} - F_y\vec{j} - F_z\vec{k}$$
(10)

$$\frac{d}{ds}\left(T*\frac{dx}{ds}\right) = -F_x\tag{11}$$

$$\frac{d}{ds}\left(T*\frac{dy}{ds}\right) = -F_y \tag{12}$$

$$\frac{d}{ds}\left(T*\frac{dz}{ds}\right) = -F_z \tag{13}$$

Estas ecuaciones permiten determinar la curva que adopta la cuerda, en este caso se aplica para modelar la catenaria generada por la cuerda colgante que se muestra en forma de diagrama, en la Figura 1.11.

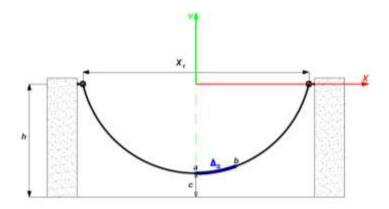


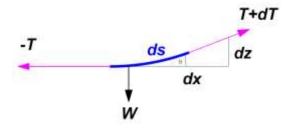
Figura 11.11 La curva catenaria

Sabiendo que la catenaria es la curva que adopta una cuerda suspendida de dos puntos, misma que está sometida únicamente a su propio peso, para su análisis se utilizaran las ecuaciones cartesianas de equilibrio, mismas que se dedujeron anteriormente, debido a que la carga uniforme en dirección x no existe la ecuación (11) se representa de la siguiente manera:

$$\frac{d}{ds}\left(T*\frac{dx}{ds}\right) = 0\tag{14}$$

Integrando (14) se obtiene:

$$T * \frac{dx}{ds} = T_0 \tag{15}$$



En donde:

T= Tensión que ejerce el peso propio de la cuerda.

 $\frac{dx}{ds}$ = Esta razón de cambio determina el  $cos\theta$ .  $T_0$ = Es la proyección horizontal de la tensión de la cuerda.

W= Es el peso por metro lineal.

El peso uniforme W de la cuerda está repartido en dirección vertical, es decir  $F_z = -W$ , por lo que la ecuacion (13) toma la siguiente forma:

$$d\left(T * \frac{dz}{ds}\right) = W * ds \tag{16}$$

Integrando la ecuación se obtiene:

$$T * \frac{dz}{ds} = W * s + C \tag{17}$$

De acuerdo a las condiciones de frontera mostrado en la Figura 1.10, si la curva la definimos con un mínimo x=0. Tomando como referencia el origen del arco, para s=0, la  $\frac{dz}{ds}=0$ , entonces la constante de integración C=0 quedando de la siguiente manera:

$$T * \frac{dz}{ds} = W * s \tag{18}$$

Relacionando las ecuaciones (15) y (18), miembro a miembro se obtiene la variación de z en funcion del parametro x:

$$\frac{dz}{dx} = \frac{W * s}{T_0} \tag{19}$$

Es decir que la variación en el eje z está en función de la razón de cambio entre la tensión inicial y el peso uniforme de la cuerda por metro lineal de la siguiente manera:

$$\frac{T_0}{W} = b \tag{20}$$

$$\frac{dz}{dx} = z'(x) = \frac{s}{b} \tag{21}$$

Derivando por segunda vez z'(x) se obtiene:

$$\frac{dz'(x)}{dx} = \frac{1}{h} * \frac{ds}{dx} \tag{22}$$

Sabiendo que la longitud de arco está dada por la siguiente ecuación:

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 \tag{23}$$

$$\frac{ds}{dx} = \left(\sqrt{1 + \left(\frac{dz}{dx}\right)^2}\right) \tag{24}$$

Quedado la ecuación (22) de la siguiente manera:

$$\frac{dz'(x)}{dx} = \frac{1}{b}\sqrt{1 + (z')^2}$$
 (25)

Separando variables para poder integrar nuevamente se obtiene:

$$\int \frac{dz'(x)}{\sqrt{1+(z')^2}} = \int \frac{dx}{b} \tag{26}$$

$$\ln\left(z' + \sqrt{1 + \left(z'(x)\right)^2}\right) = \frac{x}{b} + c \tag{27}$$

De acuerdo a las condiciones de frontera,z'(x=0)=0, el  $\ln(1)=0$ , por ende la constante de integración C=0.

$$\ln\left(z' + \sqrt{1 + \left(z'(x)\right)^2}\right) = \frac{x}{b} \tag{28}$$

A continuación se le aplica las propiedades exponenciales a la ecuación (28):

$$z'(x) + \sqrt{1 + (z'(x))^2} = e^{\frac{x}{b}}$$
 (29)

$$\sqrt{1 + \left(z'(x)\right)^2} = e^{\frac{x}{b}} - z' \tag{30}$$

Elevando al cuadrado ambos miembros, utilizando las propiedades algebraicas, se despeja z'(x) quedando de la siguiente manera:

$$z'(x) = \frac{1}{2} \left( e^{\frac{x}{b}} - e^{-\frac{x}{b}} \right) \tag{31}$$

Volviendo a integrar la función se obtiene:

$$dz(x) = \frac{1}{2} \left( e^{\frac{x}{b}} - e^{-\frac{x}{b}} \right) dx \tag{32}$$

$$z(x) = \frac{b}{2} \left( e^{\frac{x}{b}} + e^{-\frac{x}{b}} \right) + c \tag{33}$$

De acuerdo las condiciones de frontera, planteadas en el problema, para x=0, z=b, resulta que la constante de integración es C=0, finalmente ordenando términos se determina la ecuación general de la catenaria formada por una cuerda colgante.

$$z(x) = b \left( \frac{e^{\frac{x}{b}} + e^{-\frac{x}{b}}}{2} \right) \tag{34}$$

$$z(x) = b * \cosh\left(\frac{x}{h}\right) \tag{35}$$

Para determinar la longitud de arco utiliza la ecuación (21)

$$s = z'(x) * b$$

$$z'(x) = \frac{dz}{ds} = b * \operatorname{senh}\left(\frac{x}{b}\right)$$
 (36)

$$s = b * \operatorname{senh}\left(\frac{x}{b}\right) \tag{37}$$

Para determinar la tensión T ejercida en la cuerda, se puede deducir de acuerdo a la ecuación (15)

$$T\frac{dx}{ds} = T_0$$

Derivando la ecuación (37) se obtiene:

$$ds = \cosh\left(\frac{x}{b}\right)dx\tag{38}$$

$$T\frac{dx}{\cosh\left(\frac{x}{b}\right)dx} = T_0 \tag{39}$$

$$T = T_0 \frac{z}{h} \tag{40}$$

La tensión en cualquier punto del cable es igual a la cota de altura del puto considerado respecto al eje z = 0 con la consideración de que para x = 0 es z = b finalmene se obtiene de acuerdo a la ecuación (20):

$$T = z * W \tag{41}$$

#### 1.5 CONTROLADOR PID.

Generalmente un controlador es un sistema que mediante algoritmos matemáticos y físicos, nos permite mantener el valor de una variable en un determinado valor de referencia. Un controlador tiene tres diferentes acciones como las descritas a continuación:

#### La acción proporcional.

Este tipo de controlador se encarga de crear una salida proporcional a la señal de error, lo cual se compone generalmente de la diferencia entre el valor objetivo y la variable que se está procesando.

#### • La acción diferencial.

Este controlador es el encargado de eliminar el error que resulta de la acción proporcional, manteniendo el error mínimo con la misma velocidad que se genera y así evitar que el mismo se incremente.

#### La acción Integral

Este controlador es el encargado de eliminar el error en estado estacionario que se genera por las perturbaciones exteriores que el controlador proporcional no corrige, la señal de error es integrada y posteriormente sumada a la acción proporcional y derivativa.

La suma de estas tres acciones de control general la función principal del controlador PID en tiempo continuo que determina la ecuación (42). (Carpio, 2013)

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

$$\tag{42}$$

En dónde:

u(t): Variable de control

 $K_p$ : Es la constante proporcional.

e(t): Es la diferencia entre la referencia y la respuesta del controlador.

 $T_i$ : Es el tiempo que ajusta la acción integral.

 $T_d$ : Es el tiempo que ajusta la acción derivativa.

Y su función de transferencia de acuerdo a la transformada de Laplace resulta:

$$C_{PID}(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \tag{43}$$

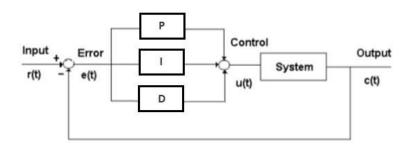


Figura 12.12 Estructura General Control PID

#### 1.6 CONTROLADOR PID DISCRETO.

Este controlador es de tipo digital ya que trabaja con señales discretas, en la Figura 1.13 se puede ver que mediante sistemas de adquisición de datos, se muestrea la señal, misma que será procesada, este controlador es capaz de calcular una ecuaciones en diferencias para cada intervalo de muestreo denominado como tiempo real, esta ecuación general del PID se compone de ecuaciones en diferencias donde están incluidos todos los parámetros del controlador como muestra la ecuación (43). (Carpio, 2013)

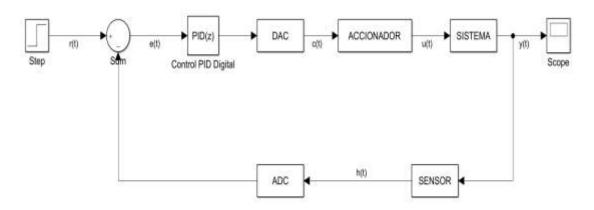


Figura 13.13 Estructura controlador PID discreto

$$u(t) = K_p \left[ e(t) + \frac{T_c}{T_i} \sum_{i=1}^t e(i) + \frac{T_d}{T_c} [e(t) - e(t-1)] \right] + u(0)$$

Ahora se realiza un aproximando de la ecuación diferencial, obteniendo u(KT) a partir de los valores e(t) en los predios de muestreo, obteniendo la respectiva aproximación discreta (44):

$$u(KT) = K_p * e(KT) + \frac{K_p}{T_i} \sum_{K=0}^{K-1} e(KT) * T + K_p * T_d \left[ \frac{e(nT) - e[(K-1)T]}{T} \right]$$
(44)

En dónde:

u(t): Variable de control.

u(0): Variable de control inicial.

 $K_p$ : Es la ganancia.

e(t): Error Muestreado.

 $T_i$ : Es el tiempo integral.

 $T_d$ : Es el tiempo derivativo.

 $T_c$ : Es el periodo de control.

e(nT): Señal Muestreada.

e[(K-1)T]: Muestra Anterior.

*T*: Periodo de Muestreo.

#### 1.7 LINEALIZACIÓN EXTENDIDA.

Para el diseño de controladores no lineales, existen varios métodos de aproximación, entre los cuales, se encuentra el método de linealización extendida, el mismo que se basa en el método de la linealización aproximada (Jacobiana), el cual nos permite conseguir un conjunto de modelos lineales parametrizados en un punto de operación general, bajo la hipótesis de que existe un continuo de puntos de operación en el espacio de entrada y salida del sistema, asociado a cada valor constante del control. (Manzanares & Bolivar, 2006) (Castillo & Pintado & Carpio & Saltarén & Rodríguez, 2017)

La ventaja fundamental de esta técnica está asociada a que, a la par de retener el significado físico de las variables linealizadas, se logra una programación automática de las ganancias del controlador (Ramirez & Marquez & Echeverria & Llanes, 2005)

# CAPÍTULO 2: MODELAMIENTO DEL SISTEMA DE POSICIÓN DE UNA MASA SUSPENDIDA MEDIANTE DOS CABLES BAJO LOS EFECTOS DE LA CATENARIA

#### 2.1 IDENTIFICACIÓN DE LA PLANTA DEL SISTEMA

El modelo utilizado para obtener la identificación de la planta, se presenta en la Figura 2.1, el cual se basa en una referencia PWM al motor trifásico de imanes permanentes, para poder representar el comportamiento del sistema, al aplicar una señal escalón en su entrada y así determinando su respectiva función de transferencia.



Figura 2.1 Diagrama de bloques para adquisición de datos de la planta

Una vez implementado el sistema de acuerdo al diagrama de bloques de la Figura 2.1, se procede a aplicar un escalón de 6.72 V (color amarillo), en la entrada el proceso, obteniendo una respuesta del sistema con un pico máximo de 3.33V

(color azul), como se puede observar en la Figura 2.2, el cual representa el comportamiento de la planta visualmente en el osciloscopio.

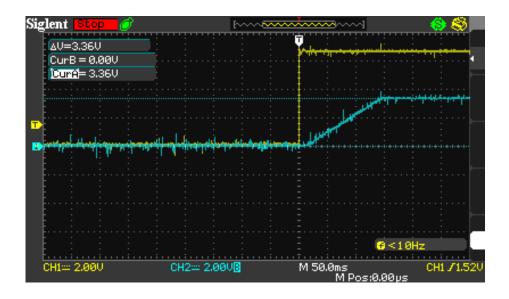
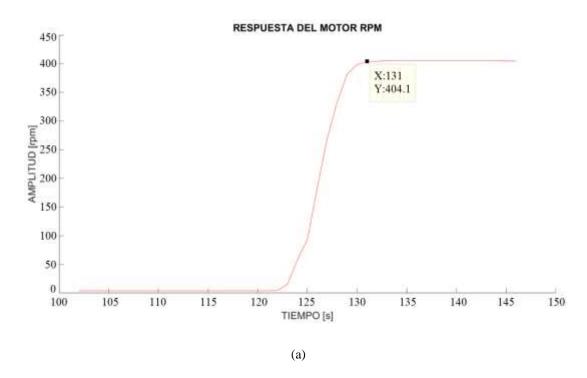


Figura 2.2 Respuesta de la planta frente a un escalón de 6.72 V

Siguiendo con el análisis de la planta identificada, se procede a realizar varias pruebas para determinar la respuesta del motor trifásico de imanes permanentes, frente a varios impulsos, como se puede visualizar en la Figura 2.3 (a), la cual presenta un tiempo de subida de 9 s, a pico de 404.1 rpm, cuando se aplica una referencia de voltaje de 6.72 V al ingreso del sistema.



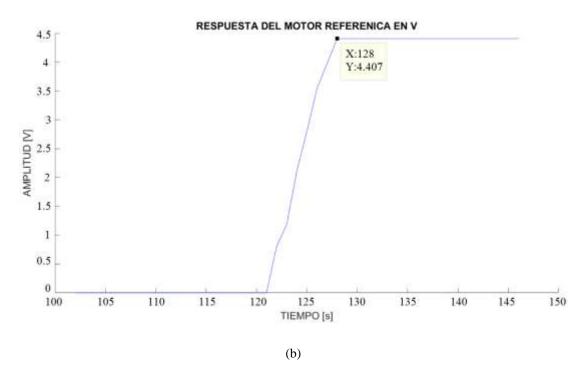


Figura 2.3 (a) Respuesta de la planta en rpm frente a una referencia. (b) Respuesta del motor HD frente a una referencia.

De la misma forma se identificó el comportamiento del motor, al aplica una referencia de voltaje de 6.72 V, como se visualiza en la Figura 2.3 (b), generando una respuesta del sistema con un tiempo de subida de 9 s, a pico de 4.407 V.

#### 2.2 ESTIMACIÓN DE LA PLANTA UTILIZANDO IDENT DE MATLAB

Con los datos obtenidos anteriormente, se procede a generar un archivo que contenga los datos de ingreso y de salida de la planta, para que paulatinamente con el uso del Toolbox del software MATLAB llamado IDENT, generar varios modelos ARX, como se puede observar en la Figura 2.4, para poder determinar la función de transferencia óptima del sistema.

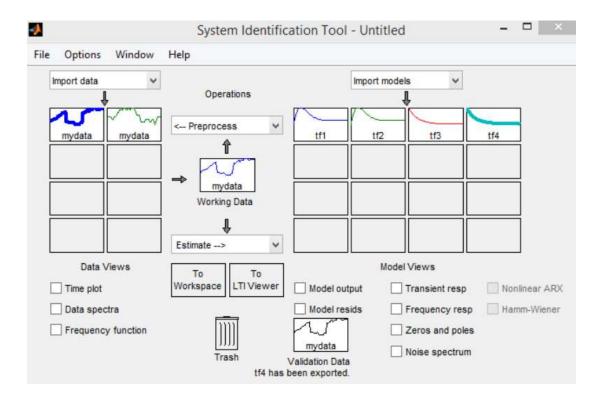


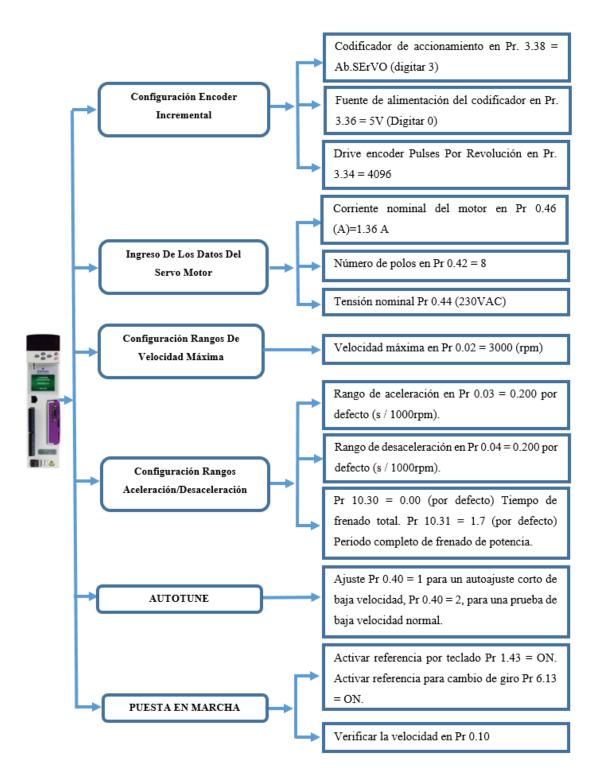
Figura 2.4 Modelos ARX generados en la planta del sistema.

Ahora, los datos de la función de transferencia estimada se exportan al Workspace de MATLAB y se procede a obtener la función deseada, tal como se muestra a continuación:

$$tf = \frac{0.0004675}{s + 0.0009138} \tag{45}$$

#### 2.3 CONFIGURACIÓN DEL SERVO-DRIVE DST1202

Para el accionamiento efectivo del servo driver DST1202, se procede a realizar las consideraciones descritas en el Anexo A, entre las cuales, las más importantes se describen en el presente diagrama de flujo:



Para poner en marcha el servo-motor utilizando el panel del servo-drive se debe realizar la conexión como indica en la Figura 2.5.

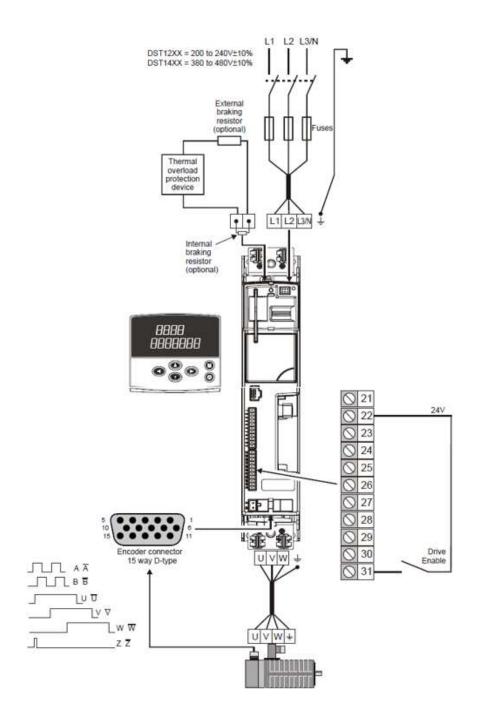
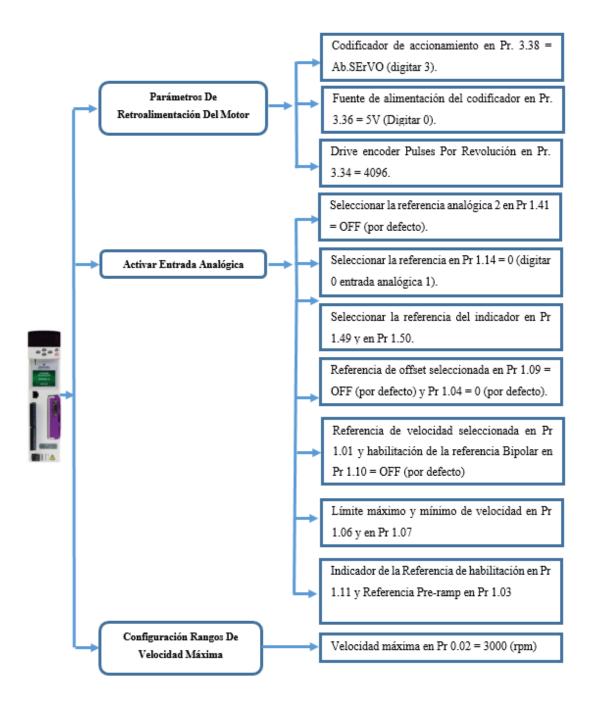


Figura 2.5 Conexiones para controlar el motor con el teclado. (Emerson, 2016)

# 2.4 CONDICIONES PARA EL FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR EN LA ENTRADA ANALÓGICA DE VOLTAJE

Para el accionamiento efectivo del servo driver DST1202, en configuración de entrada analógica para el funcionamiento del Unimotor HD, se procede a realizar

las consideraciones descritas en el Anexo C, D, entre las cuales, las más importantes se describen en el presente diagrama de flujo:



Para poner en marcha el servo-motor utilizando una entrada analógica del servo-drive se debe realizar la conexión como indica en la Figura 2.6.

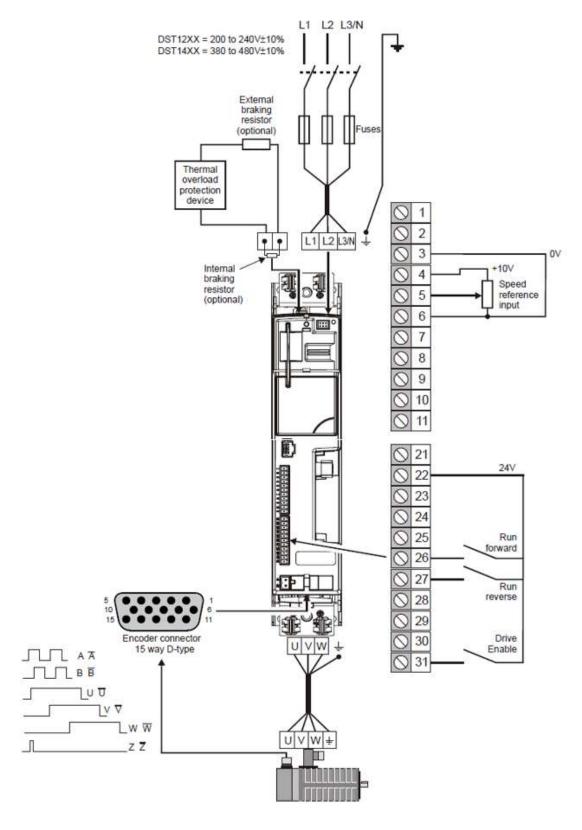


Figura 2.6 Conexiones para controlar el motor utilizando una entrada analógica. (Emerson, 2016)

#### 2.5 MODELO MATEMÁTICO

#### 2.5.1 ANÁLISIS DEL SISTEMA MECÁNICO

El sistema consta estructuralmente de dos postes, el primer poste A, suspende la cuerda catenaria y el segundo poste B, el cual contiene una articulación mecánica, mismo que da movilidad a una barra metálica que consta internamente por otro cable de acero y un resorte en su punta de la articulación, como se puede observar en la Figura 2.9.

# 2.5.2 ANÁLISIS CINEMATICO DE LA MASA SUSPENDIDA ENTRE LOS CABLES

El movimiento de la masa, esta bajo el efecto de la tension generada en la punta de la barra, obteniendo ésta una velocidad y por ende dos tipos de aceleraciones, tangencial y normal respectivamente, en la Figura 2.7 se realiza el diagrama de cuerpo libre en donde se puede determinar las fuerzas que actuan sobra la masa.

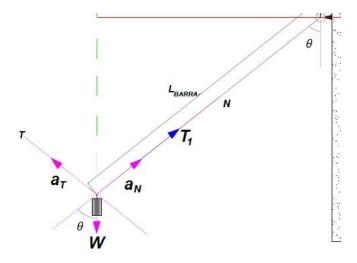


Figura 2.7 Diagrama de cuerpo libre de las fuerzas que actúan sobre la masa

En un sistema de referencia con dos ejes de aceleración normal y tangencial se analiza la masa de acuerdo al sumatoria de fuerzas de la siguiente manera.

$$\sum F_n = m \, a_n \qquad a_n = \frac{v^2}{L_{Barra}}$$

$$T_{1} - W \cos \theta - W_{Barra} \cos \theta = m \frac{v^{2}}{L_{Barra}}$$

$$T_{1} - (W + W_{Barra}) \cos \theta = m \frac{v^{2}}{L_{Barra}}$$

$$T_{1} = m \frac{v^{2}}{L_{Barra}} + (W + W_{Barra}) \cos \theta$$

$$(46)$$

De igual manera:

$$\sum F_T = m a_t$$

$$-W \sin \theta - W_{Barra} \sin \theta = m a_t$$

$$a_t = -\left(\frac{(W + W_{Barra}) \sin \theta}{m}\right)$$
(47)

La ecuación de aceleración que relaciona el desplazamiento y velocidad a lo largo de una trayectoria está dada por:

$$a_t ds = v dv$$

El diferencial de superficie determina la longitud de desplazamiento de acuerdo al ángulo que genera la trayectoria.

$$ds = L_{Barra} d\theta (48)$$

Reemplazando (48) en (47)

$$-\left(\frac{(W+W_{Barra}) \, \operatorname{sen} \theta}{m}\right) L_{Barra} \, d\theta = v dv$$

Integrando ambos lados

$$-\frac{L_{Barra}}{m}(W+W_{Barra})\int_{0}^{\theta} \sin\theta \ d\theta = \int_{v_{i}}^{v_{f}} v dv$$

$$-\frac{L_{Barra}}{m}(W + W_{Barra})[-\cos\theta]_{\theta_i}^{\theta_f} = \left[\frac{v^2}{2}\right]_{v_i}^{v_f}$$

$$\frac{L_{Barra}}{m}(W + W_{Barra})(\cos\theta_f - \cos\theta_i) = \frac{{v_f}^2}{2} - \frac{{v_i}^2}{2}$$

Si se asume que la velocidad inicial es cero en la ecuación (49), esta se resume a la siguiente expresión, en donde la velocidad que toma la barra depende de acuerdo a la posición angular  $\theta$ , donde se encuentre la misma.

$$\frac{L_{Barra}}{m}(W + W_{Barra})(\cos\theta_f - \cos\theta_i) = \frac{v_f^2}{2}$$

$$v = \sqrt{\frac{2L_{Barra}}{m}(W + W_{Barra})(\cos\theta_f - \cos\theta_i)}$$
 (49)

En donde de acuerdo a esta variación de velocidad se puede obtener la tensión que se genera en el extremo de la barra T que depende plenamente de la posición angular  $\theta$ , como se muestra en la expresión (46) .

$$T_1 = m \frac{v^2}{L_{Barra}} + (W + W_{Barra}) \cos \theta$$

# 2.5.3 ANÁLISIS DE POSICION DE LA MASA BAJO EFECTOS DE LA CATENARIA

La Figura 2.9 muestra el sistema mecánico. Para este análisis, se toma como referencia el punto de intersección de los dos elementos, de acuerdo al diagrama de cuerpo libre del sistema en equilibrio, se obtiene las siguientes relaciones.

$$T_{OX} - T_X = 0$$

$$T_{OY} + T_Y - W = 0$$

$$T_O \sin \theta + T_O \sin \theta = 0,2721$$

$$T_O = \frac{0,2721}{2\sin \theta}$$

Empleando el mismo punto de partida con la condición de equilibro, ahora para el cable, en donde se obtiene la siguiente relación.

$$\frac{d(T\cos\alpha)}{ds} = 0, (50)$$

$$\frac{d(T\sin\theta)}{ds} = \rho g \tag{51}$$

Esta relación se cumple para todo punto s que está dentro del rango de [0; L]

En donde se asume que la componente horizontal de la tensión es constante

$$T(s)\cos\alpha(s) = k > 0$$

Sustituyendo T(s) en la ecuación (2) se obtiene que

$$\frac{d(Ttan(\alpha))}{ds} = \frac{\rho g}{k} = u$$

Equivalentemente

$$u = \frac{d \tan \alpha(s(x))}{dx} \frac{dx}{ds} = \frac{dy'(x)}{dx} \frac{1}{\sqrt{1 + y'(x)^2}}$$

$$u = \frac{y''(x)}{\sqrt{1 + y'(x)^2}}$$

Realizando integración en ambos miembros la relación toma la forma

$$arg senh \ y'(x) = ux + C1 \implies y'(x) = senh(ux + C1)$$

Nuevamente integrando finalmente se obtiene la relación

$$y(x) = \frac{\cosh(ux + C_1)}{u} + C_2$$
 (52)

La expresión hiperbólica (52) representa la ecuación general de la catenaria, una curva dependiente te tres parámetros u,  $C_1$ ,  $C_2$ , mismas que pueden ser determinadas de acuerdo a las condiciones iniciales del problema.

De la misma manera se obtiene la función de longitud de la función catenaria y(x) es

$$L = \int_{X_a}^{X_a} \sqrt{1 + y'(x)^2} \, dx = \int_{X_a}^{X_b} \sqrt{1 + \operatorname{senh}^2(ux + C_1)} \, dx$$

$$= \left[\frac{\operatorname{senh}(ux + C_1)}{u}\right] x_b$$

$$L = \frac{\operatorname{senh}(ux_b + C_1) - \operatorname{senh}(ux_0 + C_1)}{u}$$
(53)

De acuerdo a las condiciones que rige el sistema mecánico, la función se remite a las siguientes condiciones de frontera

$$y(0) = 0$$
$$y(r) = 0 \tag{54}$$

Reemplazando en la función de la catenaria y realizando la igualdad

$$y(0) = \frac{\cosh (u(0) + C_1)}{u} + C_2 = y(r) = \frac{\cosh (u(r) + C_1)}{u} + C_2 = 0$$

Aplicando la identidad trigonométrica

$$\cosh(a) = \cosh(-a)$$

Y sabiendo que

$$u = \frac{\rho g}{k}$$

$$u(0) + C_1 = -u(r) - C_1$$

$$C_1 = -\frac{ur}{2} = -\frac{\rho gr}{2T_0}$$

Donde se determina que  $C_1$  es una función constante, inversamente proporcional a la tensión que ejerce la barra sobre la cuerda de acero.

Partimos de la ecuación (54), para determinar la siguiente constante  $C_2$ .

$$C_2 = -\frac{\cosh\left(ur - \frac{ur}{2}\right)}{u}$$

$$C_2 = -\frac{\cosh\left(\frac{ur}{2}\right)}{u}$$

Finalmente la ecuación que modela la posición de la cuerda catenaria del sistema mecánico en el intervalo |0; Xb|.

$$y(x) = T_0 \frac{\cosh\left(\frac{\rho g}{2T_0}(2x - Xb)\right) - \cosh\left(\frac{\rho gr}{2T_0}\right)}{\rho g}$$
 (55)

# 2.5.4 MODELO Y POSICIÓN DE LA BARRA EN EL SISTEMA MECÁNICO

Para este análisis se representa la barra como un segmento de recta que intersecta las condiciones de frontera como se muestra e la Figura 2.7

Por la trigonometría del problema se obtiene

$$\theta = \cos^{-1}\left(\frac{Xc - Xb}{L}\right)$$

Dónde:

Xc: Separación de Postes

Xb: Punto Referencia Inicial

 $L_B$ : Longitud de la Barra

 $\theta$ : Ángulo generado por la barra y el eje horizontal superior.

La pendiente de la barra esta denotada de la siguiente manera

$$m = \frac{L_B \sin \theta}{Xc - Xh}$$

La ubicación geométrica de la barra es modelada por la ecuación del segmento de recta entre los intervalos |0; Xb|

$$Yb = \frac{L_B \sin \theta (Xb - Xc)}{Xc - Xb} + Yc \tag{56}$$

De acuerdo a la ecuación (56) se determina la posición del punto Yb que conjuntamente con el punto inicial Xb se determina la posición de la masa que se suspende del cable y la barra.

La longitud del cable que forma una catenaria por efecto de su propio peso es determinada mediante la ecuación (55) la cual está limitada por el intervalo |0; Xb|.

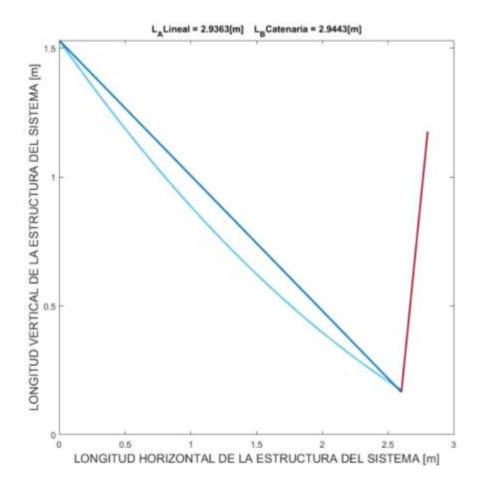


Figura 2.8 Sistema de cable y barra accionado por dos cuerdas bajo los efectos de la catenaria

La Figura 2.8 determina la simulación del sistema mecánico, comparado con respecto a una función lineal en el mismo intervalo |0; Xb|.

#### 2.6 CONSTRUCIÓN ESRUCTURA

Luego del análisis previo, se procedió a realizar el diseño y construcción del sistema mecánico, el cual consiste en varias etapas vistas en la Figura 2.9, las cuales se describen a continuación:

- 1) Estructura General: Se encuentra construida con 3 diferentes barras rectangulares (25 cm (ancho) x 10 cm (alto) x 3mm (espesor) diámetro exterior), de material acero laminado, lo cual forma una estructura rectangular final de 3m de largo por 1.5m de alto.
- 2) Sistema de Enrollamiento: Está conformado por el soporte de acero para el motor, también contiene un Tambor con paso de 0.7mm especificado en el Anexo D, E, el cual se conecta con una chumacera de mesa de 1pulg de diámetro y el motor correspondiente para enrollar el cable de acero de 2mm utilizado

- 3) Barra: Está compuesta por un material de acero de 1.35 m de largo y cm de diámetro interno, la cual se comporta como un brazo conectado con dos chumaceras y un sistema conformado por un encoder, como se puede ver en el Anexo F, para poder medir el ángulo en donde se encuentre la barra en cualquier posición asignada.
- 4) Masa del Sistema: El sistema trabaja con una masa en forma de cilindro de 0.5 lb de peso y 5 cm de alto y 4 cm de diámetro interno.
- 5) Resorte: Se encuentra ubicado dentro de la barra el cual se conecta con el segundo cable del sistema, para que me permita obtener la elasticidad y longitud extendida del resorte, cuando se trabaje en varios rangos de operación.

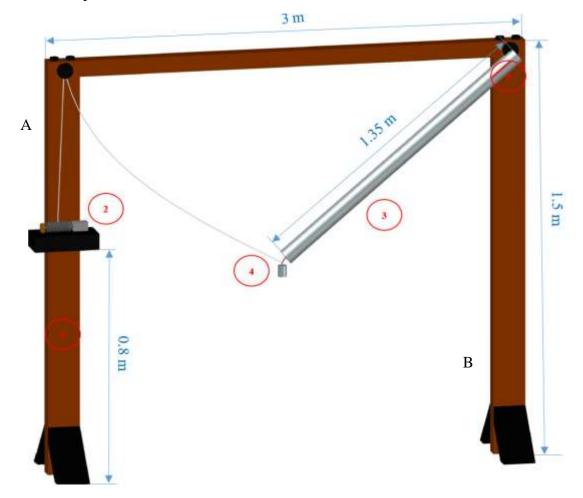


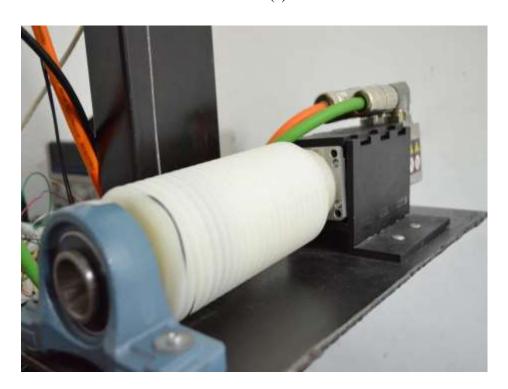
Figura 2.9 Diseño de la Estructura Final del Sistema Utilizado

Paulatinamente, se realizó la construcción del sistema mecánico, de acuerdo a las especificaciones descritas anteriormente, obteniendo una estructura resistente y

estable frente a vibraciones, como se puede visualizar en la Figura 2.10.



(a)



(b)



(c)

Figura 2.10 (a) Construcción de la Estructura Final del Sistema (b) Tambor personalizado acoplado al motor trifásico de imanes permanentes (c) Servodriver Indexer

De acuerdo a lo previsto, se realizaron varios tipos de pruebas en la maqueta construida y se fue colocando secuencialmente el sistema de enrollamiento del cable, con el sistema de medición angular de la barra, para poder controlar todo el sistema constituido por una masa accionada por dos cables bajo los efectos de la catenaria.

# CAPÍTULO 3: IMPLEMENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

El modelo final de implementación, se puede apreciar en el diagrama de bloques de la Figura 3.1. El cual dispone de una referencia de posición para el controlador, que paulatinamente tiene el análisis previo de la catenaria del cable generada a lo largo del rango de operación, el cual se conecta con la planta del sistema y generar la retroalimentación del mismo con el encoder previsto y logrando determinar el número de vueltas que tiene que disponer el unimotor HD para alcanzar la posición deseada

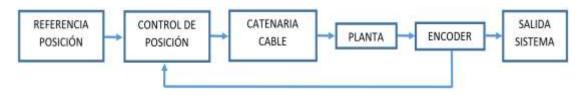


Figura 3.1 Diagrama de bloques del sistema

# 3.1 IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROLADOR DE POSICIÓN EN EL SOTWARE LABIEW

Se ha diseñado un controlador en el software de LabVIEW, este software nos permite tener una apreciación más profunda del control que se realizara, ya que nos facilita el uso de bloques que contiene algoritmos matemáticos que minimizan el proceso de diseño. Además este software también es intuitivo ya que presenta una interfaz gráfica que permite poder ingresar los parámetros, mismos que componen el sistema de control digital. La Figura 3.2 muestra las etapas del sistema de control, que se explican a continuación.

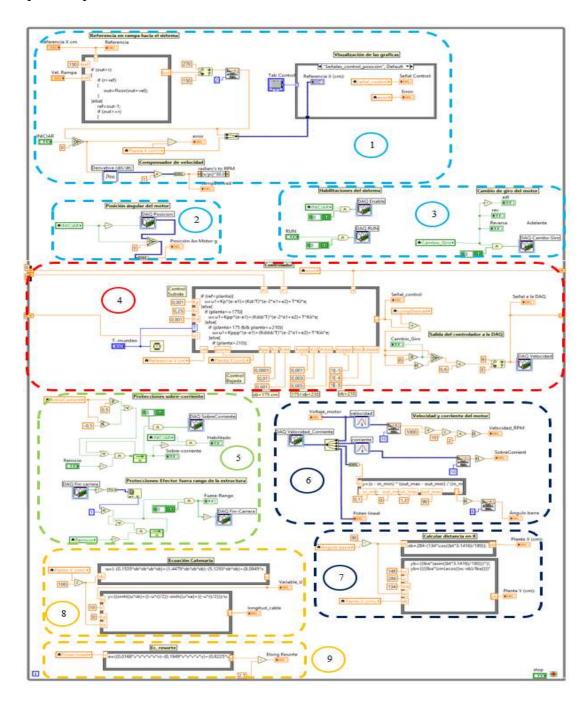


Figura 3.2 Programa general del sistema utilizado para el análisis y control de una masa accionada por dos cables bajo los efectos de la catenaria.

En la figura 3.3 se observa la adecuación del dato de ingreso al controlador, al ser una referencia puntual, es procesada, de tal manera que se genere una señal de ingreso al controlador de tipo rampa. Esta configuración permite generar y obtener la mejor trayectoria óptima, ya que de acuerdo a esta configuración de tipo rampa, el controlador permite atenuar el arranque del motor trifásico de imanes permanentes y así prevenir movimientos bruscos que se podrían suscitar al momento de realizar un cambio de referencia puntual.

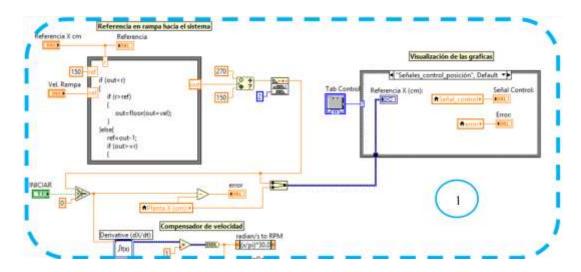


Figura 3.3 Etapa de ingreso de referencia de una rampa al sistema y visualización de los datos

La Figura 3.4 muestra cómo se realiza el proceso de adquisición de la señal angular que genera el movimiento de la barra.

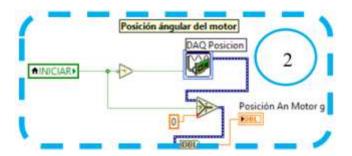


Figura 3.4 Etapa para el proceso de adquisición de datos

El sistema mecánico cuenta con una tarjeta electrónica con contactos de habilitación física, estos permite la comunicación entre el driver del unimotor HD con el software de diseño, así como también la habilitación de los parámetros que

determinan el sentido de giro del servomotor. Todos estos datos ingresan al driver mediante dicha tarjeta, como se puede ver en la Figura 3.5.

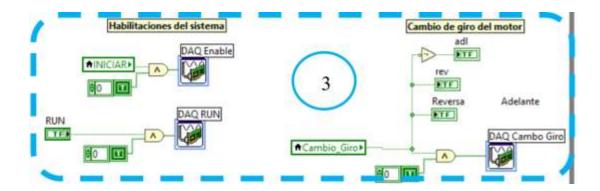


Figura 3.5 Etapa para habilitación del sistema y cambio de giro del motor.

Cuando el unimotor HD, recibe la señal de control, este experimenta aceleraciones bruscas, mismas que distorsionan el enrollamiento del cable, motivo por el cual se ha determinado que no es posible realizar un control optimo con las constantes KP, KI y KD fijas para el rango de desplazamiento vertical positivo de los elementos mecánicos (cable y barra), ya sea en el estado de subida y bajada respectivamente. Para solucionar este inconveniente, se realiza una operación de control planificador de ganancias.

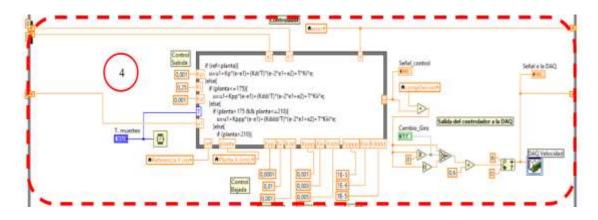


Figura 3.6 Etapa de monitoreo del Controlador de Posición

Las protecciones en los sistemas de control son indispensables, para lo cual, el sistema mecánico consta de contactos de fin carrera que desconectaran la alimentación eléctrica del unimotor cuando la barra experimente trayectorias que estén fuera del rango de análisis.

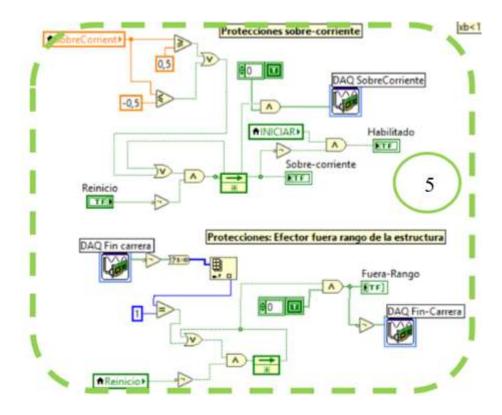


Figura 3.7 Etapa de protección sobre corrientes y Fuera de rango del sistema

Mediante la comunicación entre la tarjeta de adquisición de datos DAQ y el software de diseño LabVIEW, se establece rangos como la velocidad óptima y la corriente máxima de operación. Al sobrepasar dicho umbral de corriente LabVIEW envía la señal de desconexión eléctrica hacia el driver, mismo que se encarga de apagar el motor trifásico garantizando la seguridad y funcionamiento del mismo.

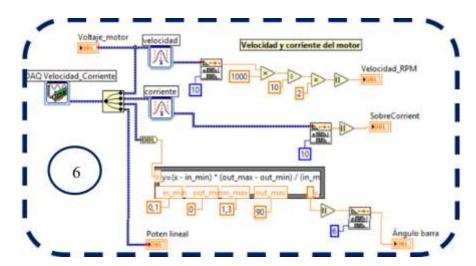


Figura 3.8 Etapa para controlar la Velocidad y corriente del motor

La señal de desplazamiento angular de la barra, que posiciona la masa en el punto horizontal Xb, es utilizada por el software, el cual mediante las ecuaciones que rigen el modelo matemático del sistema físico se determina la posición vertical Yb de la masa como muestra las Figuras 2.8 y 3.9.

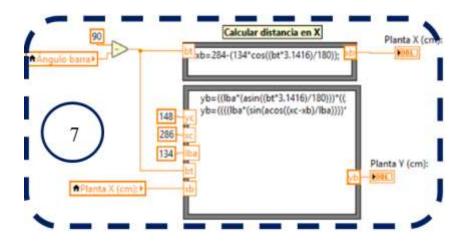


Figura 3.9 Etapa para el cálculo efectivo de la posición Xb, Yb de la barra

Estos datos de realimentación son procesados y comparados con la señal de referencia, dando como resultado de la comparación un valor de error, el cual será enviado hacia la etapa de control, como indica la Figura 3.10.

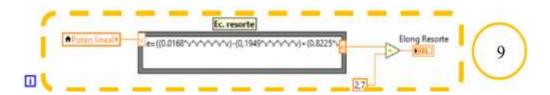


Figura 3.10 Etapa para calcular el índice de elasticidad del resorte.

Las propiedades físicas de la cuerda, así como la posición de la masa en el punto Xb y Yb, todos estos parámetros que conforman el modelo matemático determinan la longitud que adopta la cuerda bajo los efectos de la catenaria, como se puede apreciar en la Figura 3.11.

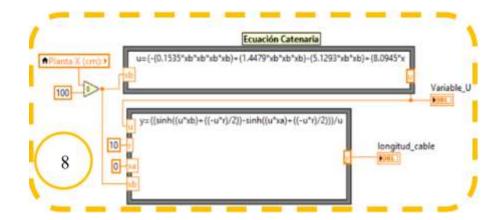


Figura 3.11 Etapa para calcular la Longitud de la Catenaria del Cable sometido a varios tipos de posiciones.

# 3.2 DISEÑO Y SINTONIZACION DEL CONTROLADOR PID DE POSICIÓN APLICANDO LINEALIZACION EXTENDIDA

Para tratar la no linealidad de la planta, se aplica el método de la linealización aproximada, obteniendo un sistema de tipo lineal, el cual trabaja en varios puntos de operación, que permiten sintonizar el controlador, adquiriendo un sistema estable, como se puede observar en la Figura 3.12. Dando una trayectoria rampa al sistema, se consigue un modelo de primer orden de la planta de control, con un tiempo de subida de 2.2 s y un tiempo de estabilización de 5.9 s.

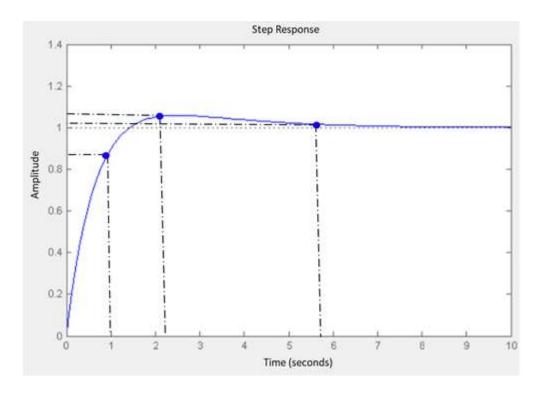


Figura 3.12 Respuesta a la rampa del sistema para un desplazamiento vertical positivo

Paulatinamente se obtuvieron los valores respectivos de las constantes proporcionales (KP), integrales (KI) y derivativos (KD) para el controlador, mejorando el tiempo de estabilización del sistema y alcanzando un comportamiento óptimo y rápido para la referencia de posición deseada en la planta.

Tabla 3.1 Constantes del controlador PID del sistema para un desplazamiento vertical positivo

Constantes Controlador PID		
Kp	0.01	
Ki	0.25	
Kd	0.01	

Para una mejor sintonización en el sistema, se realiza una aproximación en distintos rangos de operación descritos en la Figura 3.13, los cuales se manejaran diferentes valores proporcionales (KP), integrales (KI) y derivativos (KD), para varios desplazamientos de la masa en cada movimiento en bajada.

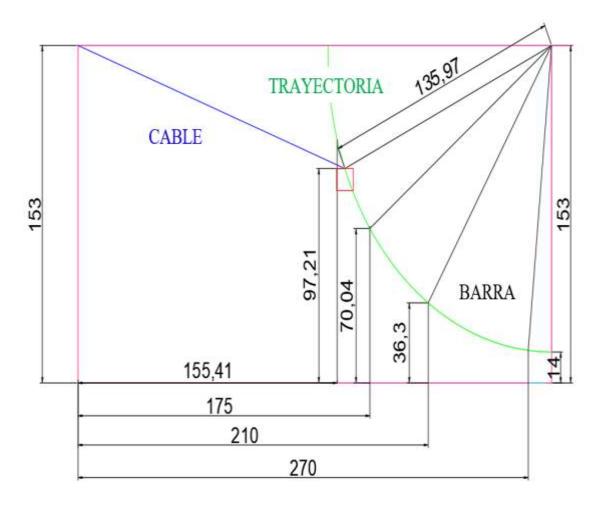


Figura 3.13 Diagrama general del sistema masa-cable-barra implementado

Para lograr una mejor respuesta del sistema en desplazamientos de bajada, se fue analizando en tres diferentes rangos de operación, descritos en la Tabla 3.2, como es el caso de 155 [cm] a 175[cm] se obtuvo una estimación frente a la trayectoria de rampa propuesta del sistema de KP=0.0001, Ki=0.01, KD=0.001, para lo cual se generó un algoritmo de interpolación de constantes, visto en la Figura 3.14, que represente la estimación de todas las constantes y pueda manejar de mejor forma el controlador para una mejor respuesta y estabilización del sistema frente a cambios de referencia y perturbaciones.

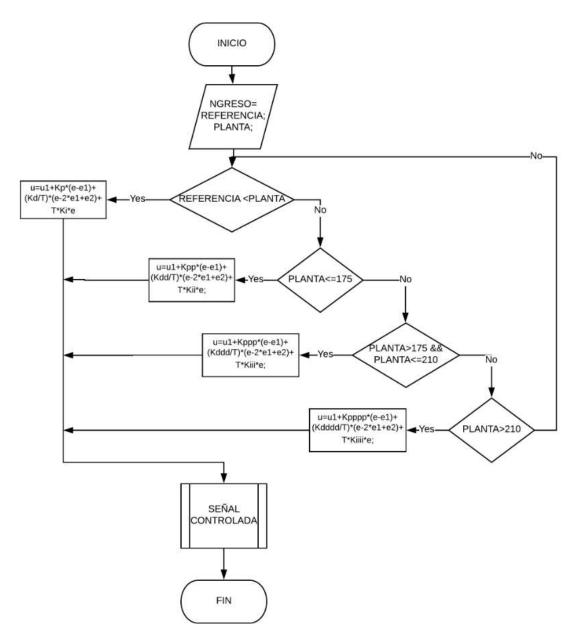


Figura 3.14 Sistema planificador de ganancias del controlador

Tabla 3.2 Constantes del controlador PID del sistema para desplazamientos en bajada

Constantes Controlador PID Posición 1		
Rango de Posición	155[cm]-175[cm]	
Kpp	0.0001	
Kii	0.01	
Kdd	0.001	
Constantes Controlador PID Posición 2		
Rango de Posición	175[cm]-210[cm]	
Kppp	0.001	
Kiii	0.003	
Kddd	0.005	
Constantes Controlador PID Posición 3		
Rango de Posición	210[cm]-270[cm]	
Крррр	1E-5	
Kiiii	1E-6	
Kdddd	1E-5	

#### 3.3 PRUEBAS DEL CONTROLADOR PID DE POSICION

Al posicionar la masa en la referencia X=207cm, la velocidad del motor sigue una trayectoria de tipo rampa como se ve en la Figura 3.15, esta configuración permite dar un arranque suave al motor, lo cual evita el golpeteo del mismo debido al arranque acelerado que produce el cambio de referencia, teniendo en cuenta que este trabaja a una velocidad 700 rpm. En la Figura 3.15 se observa también la señal de referencia de color rojo que inicialmente empieza en X=161.7 cm y la gráfica de color azul que representa la señal de control hacia la referencia final, estabilizándose en un tiempo de 7.9s.

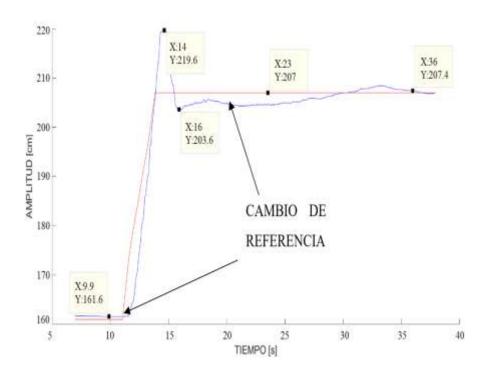


Figura 3.15 Respuesta del comportamiento del sistema frente a un cambio de referencia en posición ascendente

Al cambia de referencia, para este caso se posiciona X=158cm, en donde se puede observar la Figura 3.16, como el controlador sigue una trayectoria de función rampa, la misma que suaviza la velocidad de arranque del unimotor, siendo la señal de color azul la respuesta del controlador misma que se estabiliza en un tiempo de 4.8 s.

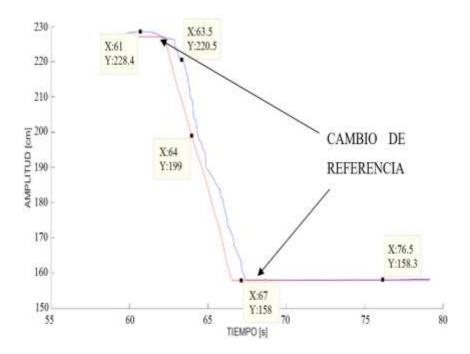


Figura 3.16 Respuesta del comportamiento del sistema frente a un cambio de referencia en posición descendente

Para determinar la veracidad del controlador por etapas y su funcionamiento, se procedió a realizar cambios de referencia, en la Figura 3.17 se puede visualizar la acción del controlador en cada posición referencial, dado que al ser un cambio de referencia descendiente no existe mucha variación con respecto a la señal de control y que la masa se estabiliza con su propio peso ya que no se presenta ningún tipo de tensión adicional, mejor se libera el cable de manera continua.

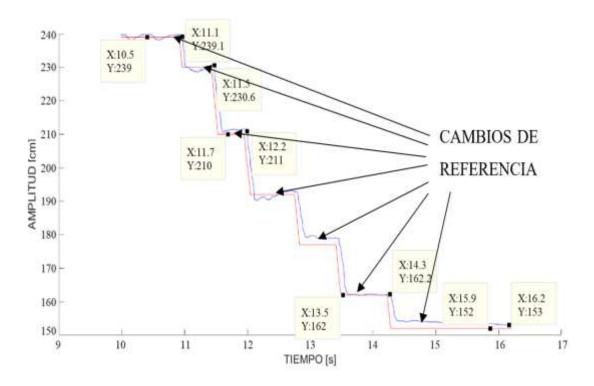


Figura 3.17 Respuesta del comportamiento del sistema frente a varios tipos de cambios de referencia en posición descendente

Al momento que se empieza a ingresar referencias en aumento, la Figura 3.18 muestra los sobrepasos de velocidad que experimenta el unimotor y su estabilización siguiendo la referencia. Como es el caso de la posición X=245.8, presenta un sobrepaso en 41 s, estabilizándose inmediatamente en 5 s hasta alcanzar la referencia.

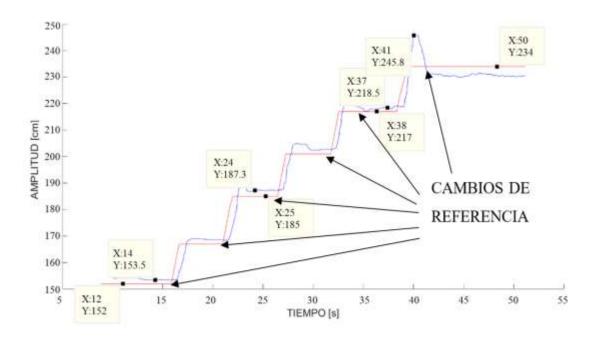
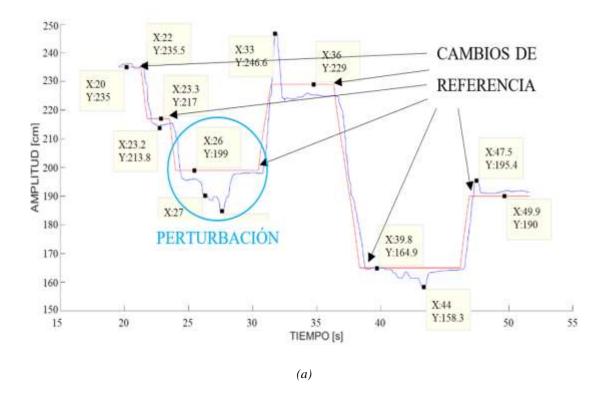


Figura 3.18 Respuesta del comportamiento del sistema frente a varios tipos de cambios de referencia en posición ascendente

Finalmente se aplican algunas perturbaciones, mismas que se pueden observar en la Figura 3.19 (a) y (b), en donde se verifica la acción del controlador frente a estos cambios, lo cual se determina que el controlador aplicado, esta funcionando y tiene una acción rápida frente a estas perturbaciones.



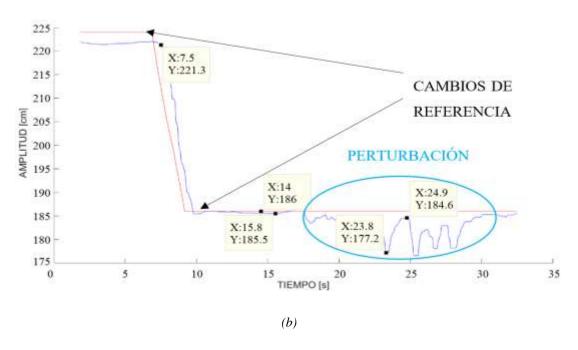


Figura 3.19 (a) Respuesta del comportamiento del sistema frente a varios tipos de cambios de referencia y perturbaciones. (b) Respuesta del comportamiento del sistema frente a un cambio de referencia y perturbaciones

De acuerdo a la mecánica del sistema y por razones de seguridad, se han colocado elementos que garantizan que no se destruya la barra o arranque el cable, por referencias fuera de rango o a su vez distorsiones de velocidad del motor, en la Figura 3.20 se muestra la acción de bloqueo del motor cuando la barra ha alcanzado una posición crítica fuera del rango de análisis.

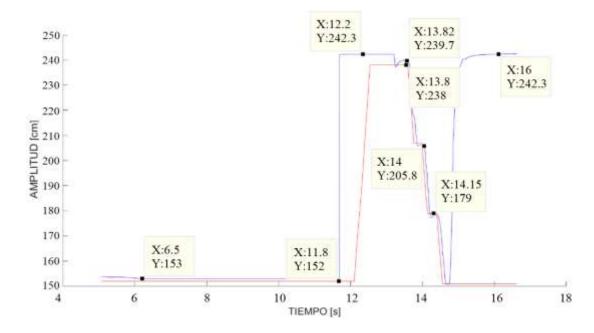


Figura 3.20 Respuesta del comportamiento del sistema cuando la referencia sobrepasa los límites de la estructura

# 3.3.1 COMPORTAMIENTO DEL RESORTE IMPLEMENTADO EN LA BARRA

La barra contiene internamente un sistema de resorte, mismo que varía su desplazamiento de acuerdo a la posición, y tensión que se genera al tensar el cable, en la Figura 3.21 se observa la función polinómica que modela este efecto analizado en las posiciones de referencia donde se empieza a tensar.

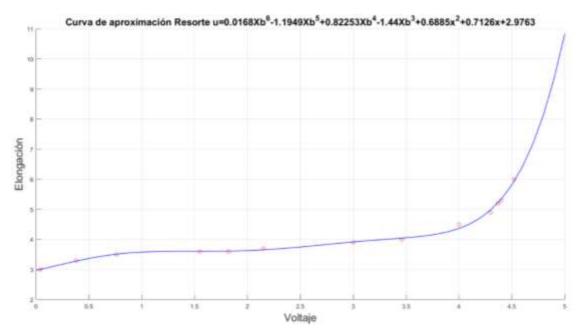


Figura 3.21 Curva de Elongación del Resorte.

La señal del sensor que mide la elongación del resorte está definida desde 0 a 5v, este efecto se produce en una variación de tiempo de acuerdo a la referencia más crítica en donde el estiramiento del resorte está en su totalidad. Este efecto se puede visualizar en la Figura 3.22 que se produce de un cambio de referencia de xb=160 al xb=155 donde se determina una tensión máxima en el cable y el resorte que contiene la barra.

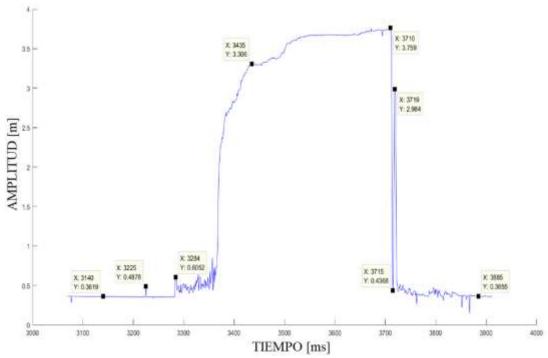


Figura 3.22 Curva de Elasticidad del Resorte.

#### 3.3.2 RESPUESTA EN VELOCIDAD DEL UNIMOTOR HD

La velocidad del unimotor al ser atenuada mediante una función rampa presenta variación de tiempo de respuesta, en la Figura 3.23 se muestra el efecto de la velocidad en cada cambio de referencia que experimenta el motor trifásico de imanes permanentes siguiendo la trayectoria de velocidad especificada.

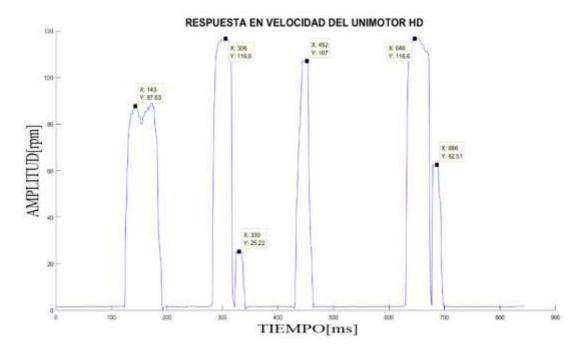


Figura 3.23 Curva en respuesta de velocidad del motor frente a cambios de referencia

#### 3.3.3 RESPUESTA DEL ÁNGULO DE LA BARRA

La posición de la barra es gobernada mediante el control que depende también del ángulo que esta genera en cada puno de referencia, en la Figura 3.24 se observa la variación del ángulo en cada una de las posiciones dadas, donde también se visualiza que el posicionamiento del ángulo de la barra también toma una trayectoria de tipo rampa, misma que se genera por efecto de la trayectoria de velocidad configurada para el motor trifásico.

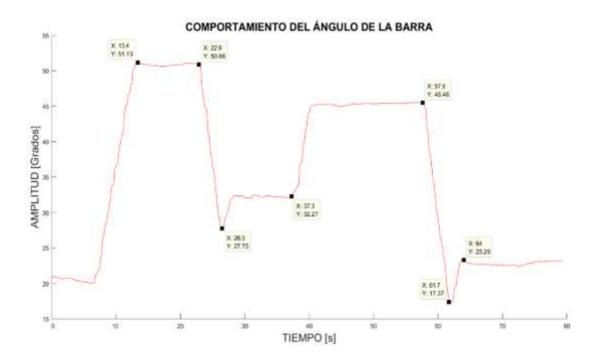


Figura 3.24 Curva en respuesta del comportamiento del ángulo de la barra frente a varios cambios de referencia

### 3.3.4 RESPUESTA DE LA LONGITUD DE LA CATENARIA DEL CABLE

Para cada cambio de referencia, la longitud del cable toma un valor específico. Véase la Figura 3.25.

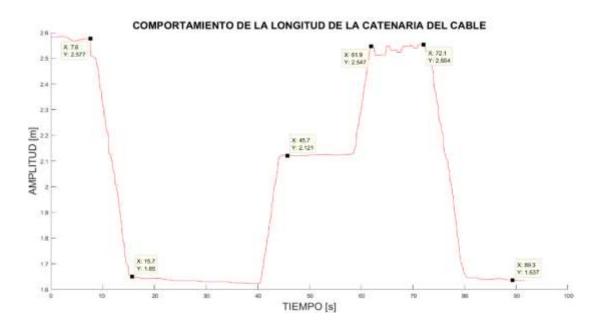


Figura 3.25 Curva en respuesta del comportamiento de la longitud de la catenaria del cable frente a varios cambios de referencia

Como se puede observar en la Figura 3.25, la longitud del cable aumenta con el efecto de la catenaria, acorde a los diferentes rangos de posición establecidos en la referencia.

# CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES Y

# RECOMENDACIONES

### **4.1 CONCLUSIONES**

En la realización del presente proyecto, se pudo determinar la importancia que posee el Unimotor HD Frame 55mm, en su modo control de posición y velocidad, ya que al trabajar con un seguimiento desde un encoder ajustado en el motor, nos permitió contraer y elongar el cable, con la ayuda de un tambor personalizado, para controlar la posición de la masa en varios puntos de operación, presentando comportamientos no lineales en el sistema, los mismos que fueron ajustados para ser representados en funciones de transferencia lineales.

Fue posible el control de posición de un motor trifásico, mediante un diseño de control a doble lazo.

Para la identificación del modelo de la planta, se realizó varios tipos de pruebas que conlleva el sistema, disponiendo del Unimotor HD, el servo driver y el análisis previo estático y dinámico de la catenaria que se forma en el cable utilizado. Se utilizó el análisis estático para determinar la longitud del cable en varios puntos de operación del sistema, dándonos de manera objetiva que el índice de mayor variación

en la longitud del cable, se presenta a partir de 2.7 m de referencia en la horizontal, descrito en la Figura 2.8, con longitudes del cable afectado por la catenaria que llegan a alcanzar los 2.9443m de elongación; ya que en las referencias menores como los 1.7 m, se presenta longitudes de elongación alcanzando los 1.84 m, cuyo valor es el mismo que una longitud lineal, pues el efecto de la catenaria es despreciable.

Como el sistema contiene dos cables de acero, el uno que es accionado por el motor y el otro que limita la barra, permitiendo representar los efectos de catenaria y efectos de elasticidad. Para lograr amplificar el efecto de elasticidad, se colocó un resorte en la barra con el cable de acero, el cual presenta una curva de elongación polinomial de sexto orden. Su comportamiento es variable en diferentes puntos de operación, en función de la contracción o elongación del cable actuado.

Para la calibración y ajuste del sistema de control, se utilizó el método de la linealización extendida, ajustando varios tipos de parámetros Kp, Ki y Kd, en el rango de operación del sistema cuando la masa desciende por efecto de elongación del cable, complementariamente el controlador adopta diferentes valores de KP, Ki y Kd, cuando la masa asciende por efecto de contracción del cable actuado.

Al aplicar una entrada rampa en el sistema en lugar de un escalón, se pudo determinar que la respuesta de operación del sistema, es más precisa, debido a que la exigencia de la referencia no es tan abrupta posibilitando que el motor no reaccione de forma impulsiva. Concluyendo que la mejor trayectoria de ingreso al sistema es una rampa.

### **4.2 RECOMENDACIONES**

La aplicación de una sintonización en mayores segmentos de operación de la trayectoria, permitirá mejorar la respuesta.

Ante cambios de referencia abruptos, se presenta vibraciones del sistema de cuerda, que deberán ser tratados como una etapa adicional.

Otra recomendación importante, es al manejar estos tipos de dispositivos, como el Servo Driver Indexer, se tiene que tomar en cuenta la alimentación trifásica, que no presente un gran índice de armónicos, pues estos afectan de manera considerable al sistema.

Este tipo de proyectos puede expandirse mucho más en cuanto a innovación, control y monitoreo de sistemas no lineales a partir de una trayectoria con limitaciones presentes en la catenaria del cable, en donde, los resultados obtenidos, son la primera parte de una serie de cosas por hacer e innovar en este tipo de sistemas.

# REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Perez, M., Pérez, A., & Pérez, E. Introducción a los sistemas de control y modelo matemático para sistemas lineales invariantes en el tiempo. Facultad de Ingeniería, Departamento de Electrónica y Automática, Universidad Nacional de San Juan. (2008).
- [2] Yin, Y. Z., & Wang, Y. C. Analysis of catenary action in steel beams using a simplified hand calculation method, Part 1: theory and validation for uniform temperature distribution. Journal of Constructional Steel Research, 61(2), 183-211. (2005).
- [3] Emerson, I. A. Manual General, Servo Motores, Unimotor hd, Unimotor fm, NT Series y XV Series, 0.9 1204 lb-in (0.11 136 Nm), 230 V-460 V. (2016)
- [4] Emerson, I. A. Manual General, Digitax ST, Gama de servo accionamientos inteligentes, compactos y dinámicos 1,1 A 8 A, 200 V-400 V. (2016)
- [5] TecniCables, Cables de acero Galvanizado. (2014)
- [6] De Zárraga Mata, S. LA CATENARIA EN ARQUITECTURA. (2010)
- [7] Max Irvine, H. Cable structures. (1981), pags. 3-25, 43-59.
- [8] Addis, B. Las contribuciones de Christopher Wren y Robert Hooke al nacimiento de ingeniería de la construcción moderna. In Actas del Octavo Congreso Nacional de Historia de la Construcción. (2013). (pp. 1-11).
- [9] Destino I. (2016). Keshwa Chaca, el último puente inca. Recuperado de: https://destinoinfinito.com/keshwa-chaca-el-ultimo-puente-inca/
- [10] Monica. (2012). Puente Akashi Kaikyo, Japón. Recuperado de: http://monica-arq.blogspot.com/2012/06/puente-akashi-kaikyo-japon.html
- [11] Dávila, M., & Sánchez, A. Análisis de una Línea de Transmisión Monofásica con Dependencia Frecuencial, No Uniformidades y Efecto Corona.
- [12] Benet, J., Arias, E., Cuartero, F., & Rojo, T. Problemas Básicos en el Cálculo Mecánico de Catenarias Ferroviarias. Información tecnológica, 15(6), 79-87. (2004).
- [13] Carpio, M. Evaluación de desempeño de los controladores digitales PID y predictivo tolerante a fallas, aplicados al control de nivel del líquido en un tanque. Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador. (2013).

- [14] Emerson, I. A. User Guide, Digitax ST, AC variable speed drive for servo motors. Part Number: 0475-0001-01. (2016).
- [15] Soto-Manzanares, Y., & Rios-Bolivar, M. Control PI No lineal Autosintonizado para un Convertidor Buck-Boost. In XII Congreso Latinoamericano de Control Automático. (2006).
- [16] Sira-Ramirez, H., Marquez, R., Rivas-Echeverria, F., & Llanes-Santiago, O. Control de Sistemas no lineales. Perason Education. (2005).
- [17] Castillo-G, J., Pintado-G, M., Carpio-A, M., Saltarén, R., & Rodríguez, A. Linearization and control of a system of pneumatic suspension of a sphere. In Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON), 2017 IEEE XXIV International Conference on (pp. 1-4). IEEE. (2017, August).

# **APÉNDICES**

# APÉNDICE A: CONSIDERACIONES PARA EL CONEXIONADO DEL SERVO DRIVER

### Consideraciones antes de energizar el drive:

- No se proporciona la señal de habilitación de la unidad (terminal 31).
- La señal de ejecución no se da.
- El motor está conectado.
- El dispositivo de retroalimentación está conectado.

# Especificaciones tras encender el Servo-Driver

- Asegurarse que SMARTCARD está instalado (primer encendido solamente)
- Driver indica la presente expresión 'inh'.

## Establecer parámetros de retroalimentación del motor

Configuración básica del encoder incremental:

- Tipo de codificador de accionamiento en Pr. 3.38 = Ab.SErVO (digitar 3): codificador de cuadratura con salidas de conmutación
- Fuente de alimentación del codificador en Pr. 3.36 = 5V (0), 8V (1) o 15V (2) (digitar 0- este valor depende del tipo de motor a utilizar, este caso es el motor 055EDB)
- Las resistencias de terminación deben activarse en Pr 3.39 = 2 (digitar 2).
- Drive encoder Pulses Por Revolución en Pr. 3.34 = 4096 (configurar de acuerdo con el encoder del motor).

Ingrese los detalles de la placa del motor:

- Corriente nominal del motor en Pr 0.46 (1.36A) (configurar de acuerdo con la placa del motor).
- Número de polos en Pr 0.42 = 8 (configurar de acuerdo con la placa del motor).
- Revisar: Pr 0.44 (230VAC Tensión nominal)

Configurar correctamente antes de realizar una prueba de medición de inercia (opcional):

• La velocidad nominal del motor en Pr 5.08=230VAC (configurar de acuerdo con la placa del motor).

• El valor del valor del par del motor por amperio en Pr 5.32 (configurar de acuerdo con la placa del motor).

#### Establecer la velocidad máxima:

• Velocidad máxima en Pr 0.02 = 3000 (rpm) (configurar de acuerdo a la placa del motor).

# Establecer rangos de aceleración / desaceleración:

- Rango de aceleración en Pr 0.03 = 0.200 por defecto (s / 1000rpm).
- Rango de desaceleración en Pr 0.04 = 0.200 por defecto (s / 1000rpm) ver figura 2.

(Si está instalada la resistencia de frenado, configure Pr 0.15 = FAST. Asegúrarse también de que Pr 10.30 y Pr 10.31 estén configurados correctamente, de lo contrario, pueden verse disparos prematuros de 'It.br').

Pr 10.30 = 0.00 (por defecto)- Tiempo de frenado total

Pr 10.31 = 1.7 (por defecto)- Periodo completo de frenado de potencia

Si la resistencia no está instalada, el disparo puede desactivarse configurando Pr 10.37 (o Pr 0.51) en 8. Con la resistencia instalada, Pr 10.37 debe establecerse en 0.

## **Autotune:**

Para realizar una sintonización automática:

- Ajuste Pr 0.40 = 1 para un autoajuste corto de baja velocidad, Pr 0.40 = 2 (digitar 2) para una prueba de baja velocidad normal o Pr 0.40 = 5 para un autoajuste de movimiento mínimo.
- Cierre la run signal (terminal 26 o 27).
- Cierre la Drive Enable signal (terminal 31). La pantalla inferior parpadeará alternativamente 'Auto' y 'tunE', mientras el variador está realizando la prueba.
- Espere a que la unidad muestre "rdy" o "inh" y que el motor se detenga.

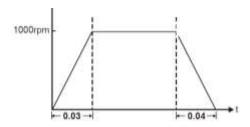
Si el accionamiento se desconecta, no se puede reajustar hasta que se haya desconectado la señal Drive Enable (Terminal 31).

#### Guardar parámetros, si es necesario:

- Ingrese 1000 en Pr xx.00
- Presione el botón de reinicio rojo o activar la entrada digital (reset digital input). Nota: asegúrese de que Pr xx.00 vuelva a 0.

#### Puesta en marcha:

- Activar referencia por teclado Pr 1.43 = ON
- Activar referencia para cambio de giro Pr 6.13 = ON
- Presionar la tecla M para visualizar "rdy ON". El drive está listo para utilizarse.
- Presionar la tecla Start para visualizar en la pantalla "run ON".
- Verificar la velocidad en Pr 0.10



Parámetros de aceleración y desaceleración.

# APÉNDICE B: CONSIDERACIONES PARA QUE EL MOTOR FUNCIONE EN UNA ENTRADA ANALÓGICA DE VOLTAJE

## Puntos a considerar antes de energizar el drive:

- No se proporciona la señal de habilitación de la unidad (terminal 31).
- La señal de ejecución no se da.
- El motor está conectado.
- El dispositivo de retroalimentación está conectado.

#### Especificaciones tras encender el Servo-Driver

- Asegurarse que SMARTCARD está instalado (primer encendido solamente)
- Driver indica la presente expresión 'inh'.

## Establecer parámetros de retroalimentación del motor

Configuración básica del encoder incremental:

- Tipo de codificador de accionamiento en Pr. 3.38 = Ab.SErVO (digitar 3): codificador de cuadratura con salidas de conmutación
- Fuente de alimentación del codificador en Pr. 3.36 = 5V (0), 8V (1) o 15V (2) (digitar 0- este valor depende del tipo de motor a utilizar, este caso es el motor 055EDB).
- Las resistencias de terminación deben activarse en Pr 3.39 = 2 (digitar 2).
- Drive encoder Pulses Per Revolución en Pr. 3.34 = 4096 (configurar de acuerdo con el encoder del motor).

### Ingresar los detalles de la placa del motor:

- Corriente nominal del motor en Pr 0.46 (A) (configurar de acuerdo con la placa del motor).
- Número de polos en Pr 0.42 = 8 (configurar de acuerdo con la placa del motor).
- Revisar: Pr 0.44 (Tensión nominal)

Configurar correctamente antes de realizar una prueba de medición de inercia (opcional):

- La velocidad nominal del motor en Pr 5.08= (configurar de acuerdo con la placa del motor).
- El valor del valor del par del motor por amperio en Pr 5.32 (configurar de acuerdo con la placa del motor).

#### Establecer la velocidad máxima:

• Velocidad máxima en Pr 0.02 = 3000 (rpm) (configurar de acuerdo a la placa del motor).

# Establecer rangos de aceleración / desaceleración:

- Rango de aceleración en Pr 0.03 = 0.200 por defecto (s / 1000rpm).
- Rango de desaceleración en Pr 0.04 = 0.200 por defecto (s / 1000rpm).

(Si está instalada la resistencia de frenado, configure Pr 0.15 = FAST. Asegurarse también de que Pr 10.30 y Pr 10.31 estén configurados correctamente, de lo contrario, pueden verse disparos prematuros de 'It.br').

Pr 10.30 = 0.00 (por defecto)- Tiempo de frenado total

Pr 10.31 = 1.7 (por defecto)- Periodo completo de frenado de potencia

Si la resistencia no está instalada, el disparo puede desactivarse configurando Pr 10.37 (o Pr 0.51) en 8. Con la resistencia instalada, Pr 10.37 debe establecerse en 0.

#### **Autotune:**

Para realizar una sintonización automática:

- Ajuste Pr 0.40 = 1 para un autoajuste corto de baja velocidad, Pr 0.40 = 2 (digitar 2) para una prueba de baja velocidad normal o Pr 0.40 = 5 para un autoajuste de movimiento mínimo.
- Cierre la run signal (terminal 26 o 27).
- Cierre la Drive Enable signal (terminal 31). La pantalla inferior parpadeará alternativamente 'Auto' y 'tunE', mientras el variador está realizando la prueba.
- Espere a que la unidad muestre "rdy" o "inh" y que el motor se detenga.

Si el accionamiento se desconecta, no se puede reajustar hasta que se haya desconectado la señal Drive Enable (Terminal 31). Consulte el Capítulo 8 Diagnóstico en la página 27.

Guardar parámetros, si es necesario:

- Ingrese 1000 en Pr xx.00
- Presione el botón de reinicio rojo o active la entrada digital (reset digital input). Nota: asegúrese de que Pr xx.00 vuelva a 0.

### Activar entrada analógica.

• Seleccionar la referencia analógica 2 en Pr 1.41 = OFF (por defecto)

1.42	Preset reference select	OFF(0) or On(1)	OFF(0)
1.43	Keypad reference select	OFF(0) or On(1)	OFF(0)
1.44	Precision reference select	OFF(0) or On(1)	OFF(0)

• Seleccionar la referencia en Pr 1.14 = 0 (digitar 0 entrada analógica 1 por defecto)

1.14	Reference selector	(0.05)	A1.A2(0), A1.Pr(1), A2.Pr(1), Pr(3),	A1.A2(0)
			PAd(4), Prc(5)	

• Seleccionar la referencia del indicador en Pr 1.49 y en Pr 1.50

Pr 1.49	Pr 1.50	Active Reference
1	1	Analog input 1

• Referencia de offset seleccionada en Pr 1.09 = OFF (por defecto)

1.09   Reference offset select   OFF(0) or On(1)   OFF(0)	OFF(0)	OFF(0) or $On(1)$	Reference offset select	1.09
-----------------------------------------------------------	--------	-------------------	-------------------------	------

• Porcentaje trim en Pr 1.38 = 0 (por defecto)

$\begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$
-------------------------------------------------------

• Referencia de velocidad seleccionada en Pr 1.01

1.01	Speed reference selected	±SPEED_MAX Hz/rpm	

• Habilitación de la referencia Bipolar en Pr 1.10 = OFF (por defecto)

1.1	Bipolar reference enable	OFF(0) or On(1)	OFF(0)
	(0.22)		

• Límite máximo y mínimo de velocidad en Pr 1.06 y en Pr 1.07

1.06	Maximum reference (0.02)	±SPEED_LIMIT_MAX rpm	3,000.0
1.07	Maximum reference (0.01)	±SPEED_LIMIT_MAX rpm	0.0

• Referencia en rejection zone en Pr 1.35

1.35	Reference	in	rejection	OFF(0) or On(1)	
	zone				

• Referencia Pre-ramp en Pr 1.03

1.03	±SPEED_MAX Hz/rpm	

• Visualizar la entrada analógica de Pr 1.36 en la Figura ..

# APÉNDICE C: CONSIDERACIONES PARA QUE EL CONTROL DE TORQUE/CORRIENTE.

• Torque modo selector en (Pr 4.11) Pr 0.14 = 1 (digitar 1 – Torque control)

0.14	Torque mode selector (4.11)	0 to 4	Speed control mode (0)
	•		•

Torque offset select en Pr 4.10 = OFF (por defecto)

4.10	Torque offset select	OFF(0) or On(1)	OFF(0)
------	----------------------	-----------------	--------

Referencia de Torque (Parámetro para referencia de par principal/máximo) en Pr
 4.08 (de acuerdo a lo requerido – Pg-129)

4.10	Torque reference	%MAX_CURRENT_USER+	0.00
------	------------------	--------------------	------

### • Demanda de Torque

4.03	Torque demand	±TORQUE_PROD_CURRENT_MAX %

La demanda de par puede derivarse del controlador de velocidad y / o la referencia y el offset del par. Las unidades de la demanda de par son % del par nominal. El par nominal del 100% se define como el par producido por una corriente activa nominal del 100%

#### • Límite de corriente superior

4.18	Overiding current limit	±TORQUE_PROD_CURRENT_MAX %	
------	-------------------------	----------------------------	--

El límite de corriente aplicado en cualquier momento depende de si el variador está en marcha o regenerando y también en el nivel del límite de corriente simétrica. Pr 4.18 da el nivel de límite que se aplica en cualquier instante.

### • Rango Máximo de Corriente

11.32	Maximum current rating (0.32)	0.00 to 9999.99A
-------	-------------------------------	------------------

### Motor rated current

4.05	Maximum current limit	0 to MOTOR_CURRENT_LIMIT	300.0
		_MAX %	
4.06	Regen current limit	0 to MOTOR_CURRENT_LIMIT	300.0
		_MAX %	
4.07	Symmetrical current limit (0.06)	0 to MOTOR_CURRENT_LIMIT	300.0
		_MAX %	

La demanda actual se deriva de la demanda de par. Siempre que el motor no se debilite en el campo, el par y las demandas de corriente son las mismas. En el rango de debilitamiento del campo, la demanda actual aumenta con un flujo reducido. El nivel de flujo se deriva del modelo de motor dentro de los controladores de accionamiento.

### • Control de velocidad de ganancia selectiva

3.16	Speed controller gain select	OFF(0) or On(1)	OFF(0)
			l.

#### Demanda de Corriente del Filtro 1

4.12   Current demand filter 1 (0.17)   0.0 to 25.0 ms	0.0
--------------------------------------------------------	-----

Se proporciona un filtro de primer orden, con una constante de tiempo definida por Pr 0.17, en la demanda actual para reducir el ruido acústico y la vibración producida como resultado del ruido de cuantificación de realimentación de posición. El filtro introduce un retraso en el bucle de velocidad, por lo que puede ser necesario reducir las ganancias del bucle de velocidad para mantener la estabilidad a medida que aumenta la constante de tiempo del filtro.

#### • Demanda de Corriente del Filtro 2

4.12 Current demand filter 2 0.0 to 25.0 his 0.0	4.12	Current demand filter 2	0.0 to 25.0 ms	0.0
--------------------------------------------------	------	-------------------------	----------------	-----

#### • Current controller gain

4.13	Current controller Kp gain (0.38)	0 to 30,000	200V drive: 75 400V drive: 150
4.14	Current controller Ki gain (0.39)	0 to 30,000	200V drive: 1000 400V drive: 2000

Estos parámetros controlan las ganancias proporcionales e integrales del controlador actual utilizado en el disco abierto. El controlador actual proporciona límites de corriente o control de par de bucle cerrado modificando la frecuencia de salida del variador. El lazo de control también se usa en su modo de torsión durante la pérdida de alimentación de la línea, o cuando la rampa estándar del modo controlado está activa y el variador desacelera, para regular el flujo de corriente en el variador.

#### • Corriente Activa

4.02	Active current	±DRIVE_CURRENT_MAX A	

La corriente activa está alineada con el eje y del marco de referencia. El eje x del cuadro de referencia está alineado con el vector de flujo del rotor. El par del motor es proporcional a la corriente generadora de par cuando el debilitamiento del campo no está activo. Una vez que el debilitamiento del campo está activo, la corriente de producción de par se aumenta para compensar la reducción del flujo del motor.

The active current is the torque producing current.

Direction of active current	Direction of rotation	Torque direction
+	+	Forward (accelerating)
1.5	.+	Reverse (decelerating)
+	5.	Forward (decelerating)
15.	5.	Reverse (accelerating)

#### • Escala de corriente máxima.

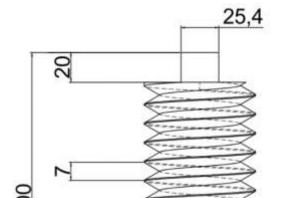
4.24	User current máximum scaling	0 to TORQUE_CURRENT _MAX %	300.0
------	------------------------------	----------------------------	-------

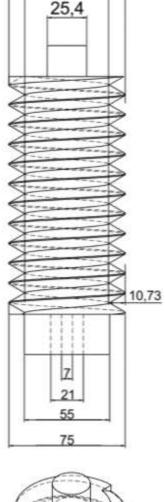
### • Porcentaje de carga

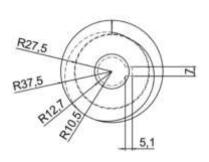
4.20	Percentage load	±USER_CURRENT_MAX	
7.20	i creentage road	EOSEK_CORRENT_WWW	

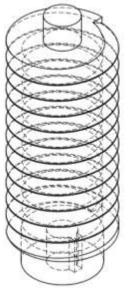
Este parámetro muestra la corriente de producción de par real (Pr 4.02) como un porcentaje de la corriente activa nominal. Los valores positivos indican el motor y los valores negativos indican la regeneración.

# APÉNDICE D: DIMENSIONES DEL TAMBOR DE ENROLLAMIENTO DE CABLE.

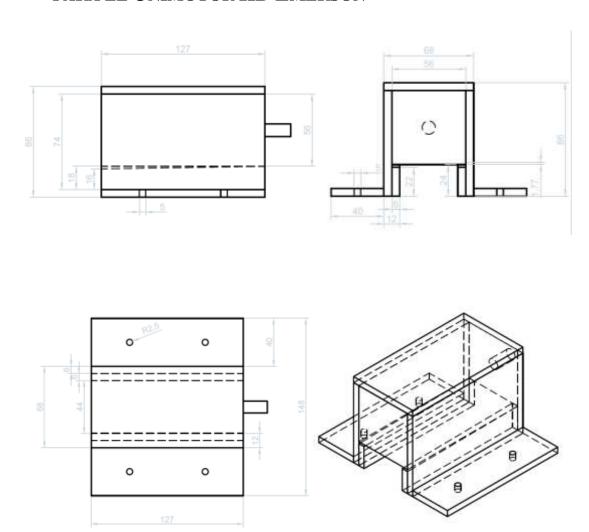




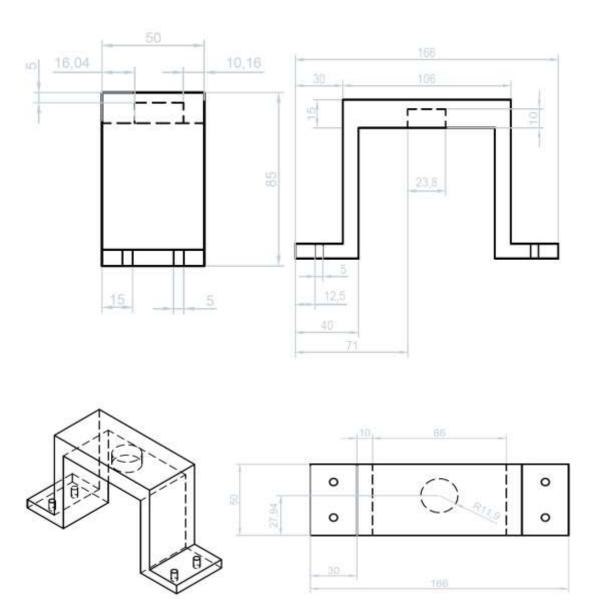




# APÉNDICE E: DIMENSIONES DE LA CAJA DE AGARRE PARA EL UNIMOTOR HD EMERSON



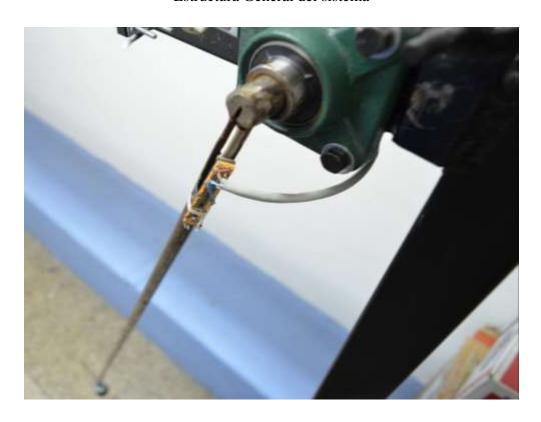
# APÉNDICE F: DIMENSIONES DE LA CAJA DE AGARRE PARA EL ENCODER QUE POSICIONA LA BARRA



# APÉNDICE G: SISTEMA GENERAL IMPLEMENTADO



Estructura General del sistema



Articulación de la barra



Articulación mecánica conjuntamente con un encoder de detección angular