

DISEÑO Y DESARROLLO DE UN PROTOTIPO SIMULADO PARA EL
CONTROL DE ESCALERAS ELÉCTRICAS QUE OPTIMICE EL CONSUMO
DE ENERGÍA

ANDRES FERNANDO PÉREZ SARMIENTO
JASON ALEXANDER RUBIANO ALBA

UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA EN MECATRÓNICA
BOGOTA D.C
2016

DISEÑO Y DESARROLLO DE UN PROTOTIPO SIMULADO PARA EL
CONTROL DE ESCALERAS ELÉCTRICAS QUE OPTIMICE EL CONSUMO
DE ENERGÍA

ANDRES FERNANDO PÉREZ SARMIENTO
JASON ALEXANDER RUBIANO ALBA

DESARROLLO TECNOLÓGICO

Ing. OLGA LUCIA RAMOS SANDOVAL Ph.D
Ing. DARÍO AMAYA HURTADO Ph.D

UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA EN MECATRÓNICA
BOGOTA D.C
2016

Nota de Aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Bogotá, 3 de Noviembre de 2016

Dedicatoria

Dedicamos este trabajo a nuestros padres ya que gracias a su confianza y apoyo logramos concluir de manera satisfactoria nuestro proyecto.

También dedicamos este trabajo a Dios, que nos brindó la suficiente paciencia, sabiduría y la fortaleza necesaria en los momentos más complicados.

De igual manera dedicamos a nuestros directores, quienes nos brindaron las herramientas suficientes para cumplir con los objetivos del proyecto.

Agradecimientos

Primeramente damos gracias a Dios por brindarnos la oportunidad de tener esta experiencia en nuestra universidad y a nuestros padres por habernos apoyado en el desarrollo de nuestros proyectos académicos, a todos nuestros profesores por brindarnos todo el conocimiento para que tuviéramos una formación integral, de tal manera que pudiéramos cumplir con todos nuestros objetivos dentro de la institución, y tener como resultado este trabajo de grado que representa todas las capacidades obtenidas en el transcurso de la carrera.

De igual manera agradecemos a todos los docentes involucrados directamente en el desarrollo de este proyecto, ya que gracias a sus aportes se logró cumplir con los objetivos planteados.

Finalmente agradecemos a todos los que leen este trabajo, por permitirnos presentarles todo el proceso de nuestro proyecto.

Contenido

Tabla de figuras.....	VIII
RESUMEN.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	2
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
3. JUSTIFICACIÓN	4
4. OBJETIVOS	5
4.1. OBJETIVO GENERAL.....	5
4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	5
5. MARCO REFERENCIAL	5
6. MARCO TEORICO	9
6.1. Escalera	9
6.2. Tipos de escaleras mecánicas.....	9
6.3. Partes de una escalera mecánica estándar	11
6.4. Sistema de control.....	13
6.4.1. Tipos de sistema de control.....	13
6.4.2. Elementos básicos de un sistema de control.....	15
6.5. Motor trifásico de inducción	15
6.5.1. Partes de un motor de inducción	16
6.5.2. Conexión de un motor de inducción.....	16
7. DISEÑO METODOLÓGICO	20
7.1. Selección preliminar del diseño de la escalera mecánica	21
7.1.1. Parámetros de una escalera mecánica tipo J	21
8. Diseño de escalones	24
9. ANÁLISIS ESTÁTICO DE LAS PIEZAS DE LA ESCALERA MECÁNICA POR MEDIO DE ELEMENTOS FINITOS	26
9.1. Fuerzas soportadas por una escalera mecánica.....	29
9.2. Motorreductor	30
9.3. Máquina de tracción	32
9.3.1. Calculo de cadena de transmisión.....	35
10. Desarrollo del Modelo matemático del motor de inducción.....	39
10.1. Realización Modelo equivalente monofásico del motor de inducción	39
10.2. Desarrollo del Modelo del motor de inducción por medio de <i>ident</i>	43
11. Selección del sistema de detección del usuario	49

12.	Diseño del control de velocidad.....	50
12.1.	Etapa de acondicionamiento de la señal trifásica.....	51
12.2.	Diseño del control análogo y discreto en MATLAB®.....	57
13.	Resultados y Discusión.....	61
13.1.	Análisis de los escalones.....	61
13.2.	Análisis estático de las pistas.....	64
14.	Ensamble escalera mecánica.....	66
15.	Comprobación de ahorro de energía.....	70
16.	Análisis del control con respecto al impacto ambiental.....	87
17.	CONCLUSIONES.....	87
18.	BIBLIOGRAFÍA.....	89
19.	ANEXOS.....	94

Tabla de figuras

Figura	Pag.
1. Estructura escalera mecánica tipo (J) estándar	(10)
2. Placa de la plataforma	(12)
3. Esquema sistema de control en lazo abierto	(13)
4. Esquema sistema de control en lazo cerrado	(14)
5. Esquema sistema de control realimentado	(14)
6. Elementos básicos de un sistema de control	(15)
7. Diagrama de potencia y dispositivo del arranque directo de un motor	(16)
8. Diagrama de potencia y dispositivo del arranque tipo estrella-triángulo	(16)
9. Diagrama de potencia de un arranque suave	(19)
10. Guarda motor Simens®	(20)
11. Personas dependiendo del ancho del escalón	(23)
12. Partes de un escalón	(24)
13. Medidas mínimas del escalón	(25)
14. Diseño del escalón	(25)
15. Diagrama de cuerpo libre de la escalera mecánica	(30)
16. Partes de la máquina de tracción	(32)
17. Diagrama de cuerpo libre de la máquina de tracción	(33)
18. Esquema motor de inducción	(40)
19. Esquema de un motor de inducción por fase	(40)
20. Circuito general equivalente por fase	(40)
21. Circuito equivalente por fase (referido al estator)	(43)
22. Circuito equivalente por fase (con carga representada)	(43)
23. Parámetros del motor de inducción	(44)
24. Esquema de simulación de un motor de inducción en Simulink	(45)
25. Respuesta del sistema	(45)
26. Importación de datos de Excel a <i>ident</i>	(46)
27. Configuración de los parámetros de <i>ident</i>	(47)
28. Identificación del modelo por medio de <i>ident</i>	(48)
29. Porcentaje de estimación del modelo de la planta	(48)
30. Respuesta en frecuencia y amplitud del modelo de la planta	(49)
31. Detección del usuario por medio de sensores fotoeléctricos de laser	(49)
32. Detección del usuario por medio de sensores de presión	(50)
33. Diagrama de bloques del proceso de control	(50)
34. Rectificador trifásico de onda completa no controlado en proteus®	(51)
35. Rectificador trifásico de onda completa no controlado en simulink	(54)
36. Respuesta de la etapa de rectificación	(54)
37. Inversor trifásico controlado en proteus®	(55)
38. Configuración de las señales del generador PWM	(55)
39. Etapa de rectificación e inversor trifásico en simulink	(56)
40. Salida de la etapa del inversor trifásico	(56)
41. Diagrama de bloques del control análogo	(57)
42. Constantes del control PI análogo medio de autotuning	(58)
43. Respuesta del control análogo	(59)
44. Diagrama de bloques del control discreto	(59)

45. Constantes del control PI discreto por medio de autotuning	(60)
46. Respuesta del control discreto	(61)
47. Factor de seguridad Shindler	(61)
48. Factor de seguridad ASME	(62)
49. Deformación unitaria ASME	(63)
50. Deformación unitaria Shindler®	(63)
51. Factor de seguridad de la pista totalmente cargada	(65)
52. Deformación unitaria de la pista totalmente cargada	(66)
53. Dimensiones de la cadena de escalones	(67)
54. Ensamblaje de una sección de cadena de escalones	(67)
55. Ensamblaje final de una escalera mecánica	(68)
56. Simulación del sistema con el control PI	(70)
57. Respuesta de la planta con el control PI	(71)
58. Sistema con las tres configuraciones de entrada	(73)

RESUMEN

En el mundo moderno, la movilidad de las personas en grandes edificaciones resulta bastante compleja, por esta razón, las escaleras mecánicas toman relevancia, al convertirse en una solución viable para mejorar el flujo de personas en estos lugares. Teniendo en cuenta la importancia de las escaleras mecánicas, este documento presenta el análisis estático de estas estructuras, basado en las normativas internacionales y las condiciones que utilizan algunos fabricantes en la construcción de las mismas. En este trabajo se presentan las características esenciales que se pueden tener en el diseño de la escalera mecánica, teniendo en cuenta parámetros como el material de las piezas y el factor de seguridad para este tipo de estructuras, según la normativa correspondiente.

Además del análisis estructural de la escalera mecánica, este documento presenta el diseño de un sistema de ahorro de energía, teniendo en cuenta para esto la problemática energética actual, como por ejemplo, el aumento de su demanda y por ende el aumento de la huella de carbono. Para el desarrollo de este control se diseñó un variador de velocidad PWM para un motor trifásico, además de un control PID que permite acondicionar la corriente, de tal forma que el motor no se vea afectado por los picos; en conjunto, estos dos controles permiten mejorar la eficiencia energética del motor, ya que, gracias a estos, los picos de corriente se reducirán y el funcionamiento de la escalera dependerá del flujo de personas que utilicen el servicio.

Para el análisis de la parte estructural de la escalera, se desarrolló el diseño de la estructura en un software CAD (SOLIDWORKS) ® y a través de un estudio por elementos finitos, se pudo corroborar las características de la escalera en cuanto a su comportamiento mecánico y su fiabilidad para el uso de las personas. Para el desarrollo del sistema de ahorro energético, se va a verificar su funcionamiento implementando MATLAB®, ya que gracias a las herramientas con que cuenta este software matemático, fue posible verificar el sistema y corroborar la respuesta del sistema a distintos tipos de entrada.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, se ha venido desarrollando distintos tipos de estructuras con diversos objetivos, uno de los cuales ha mejorado el estilo de vida de las personas, han sido las que permiten el transporte en interiores [1]. De manera más específica, ascensores y escaleras mecánicas. Si bien estas estructuras han presentado ciertos cambios, la escalera mecánica sigue teniendo desde su origen básicamente el mismo diseño [2]. Sin embargo, al movilizar seres vivos, necesita cumplir con ciertas características para dar mayor seguridad a los usuarios, y además mejorar la eficiencia energética, implementando nuevos y mejores materiales en su construcción.

Con la utilización de mejores materiales, también se debe considerar las normativas que ayudan a tener un diseño confiable que garantice por ejemplo las condiciones mínimas de seguridad para el usuario, el confort y por su puesto un bajo consumo de energía, de tal manera que el sistema sea viable para el uso de las personas y que además sea amable con el medio ambiente. Si bien, se realizan muchos estudios acerca de las características de la estructura, aún no es infalible el diseño [3]. Por lo cual vale la pena analizar las características de una escalera mecánica estándar, teniendo en cuenta su normativa y lo que esta implica en su fabricación.

Básicamente, cualquier sistema se puede seguir mejorando, sin embargo, los cambios en una escalera mecánica deben realizarse teniendo en mente la importancia de que será utilizada por las personas, si se realiza un cambio a la escalera, no solo importará el diseño, sino que además no deberá afectar las condiciones de seguridad y en lo posible, mejorar dicha característica.

Actualmente, la utilización de escaleras mecánicas resulta ser bastante común, encontrarla tanto en ambientes cerrados como en ambientes abiertos, como edificios, o en las comunas de Medellín [4], todo esto con la idea de mejorar la calidad de vida de las personas.

Otro factor importante a parte de la parte mecánica de las escaleras, los sistemas eléctricos y de control de la estructura también juegan un papel importante en el correcto funcionamiento del sistema, por lo cual es la característica que más cambios ha tenido [5] debido a la evolución más acelerada en el desarrollo de componentes electrónicos, en especial en los últimos años, principalmente en busca de mejorar la eficiencia energética de las máquinas. Es por esto, que la necesidad de mejorar dicha característica, en el presente documento muestra el desarrollo de un sistema de ahorro de energía, teniendo una sinergia entre la

parte mecánica y la parte eléctrica, que logra mejorar de cierta forma las condiciones de la escalera.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad, uno de los problemas que más afecta a las personas es la movilidad, no sólo dentro de un entorno urbano exterior, sino también en entornos cerrados con gran aglomeración de personas. Teniendo en cuenta esta problemática, las grandes edificaciones de una ciudad moderna que tenga varios niveles, debe garantizar la eficiencia del transporte dentro del recinto, implementando para esto sistemas como escaleras mecánicas [6]. Sin embargo, la instalación de dichas estructuras, conlleva a nuevos problemas que afectan tanto a los usuarios como a sus operadores.

Una de los mayores inconvenientes que se busca abordar de manera progresiva, debido al impacto medio ambiental que se vive actualmente, es el consumo energético. El funcionamiento de las escaleras mecánicas es de manera continua, por lo cual, la estructura tiene un consumo inadecuado de energía, en determinados momentos de su servicio, en especial cuando hay una reducción en el flujo de personas [7], y que, si bien este fenómeno no se presenta de forma continua, a largo plazo los efectos tanto económicos como medioambientales, que afectan no solo el entorno donde se implementó la escalera, sino a una sociedad en general.

En Colombia, en el presente año, según la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), con base a la proyección de marzo de 2015 [8], la demanda energética tiende a aumentar en forma exponencial, y según el mismo análisis, esta tendencia seguirá por mucho tiempo en el país.

Pero a partir del escenario que se presentó en los primeros meses del año 2016, el problema de demanda energética en Colombia, es aún más desalentador, debido especialmente a las condiciones medio ambientales que se están viviendo en el país, que lo han tenido al borde de un racionamiento energético [9]. Por esta razón, es necesario buscar maneras de gestionar mejor la energía, que permitan mitigar las consecuencias que a futuro podría traer el uso inadecuado de la energía.

Otro parámetro importante, es que el uso de mecanismos autónomos representa ciertos riesgos en la seguridad del usuario, ya sea por la imprudencia del mismo, o porque el funcionamiento del sistema no es el adecuado. En las escaleras eléctricas, a pesar de su uso constante por parte personas, el tema de seguridad en dichos dispositivos, suele tomarse como tema de segunda mano; sin

embargo, los sucesos de accidentalidad en escaleras eléctricas son más comunes de lo que se piensa, por lo cual este tema se debe tomar con la mayor seriedad posible. Aunque en ocasiones, dichos accidentes se presenten por descuido e imprudencia de los usuarios, para reducir el error humano se podría usar herramientas tecnológicas que ayuden a disminuir los índices de accidentalidad en dichas estructuras [10].

Respecto al entorno un poco preocupante que se plantea en referencia a las escaleras mecánicas, existen herramientas para mejorar ciertas condiciones de la estructura, y sin lugar a dudas una de estas es la tecnología. Basado en lo anterior, surge la pregunta: ¿Cómo la Ingeniería, a través de desarrollos mecatrónicos, puede contribuir en mejora del consumo energético, en sistemas de escaleras eléctricas, además, brindando seguridad a los usuarios?

3. JUSTIFICACIÓN

A partir de los problemas encontrados en el uso de escaleras eléctricas en cuanto a lo que se refiere a seguridad de los usuarios y consumo energético del sistema, se pretende implementar una metodología de control que aborde estos dos parámetros.

Como primer parámetro, se va a tomar el consumo energético durante el funcionamiento de las escaleras eléctricas, para lo cual se pretende realizar un control que logre verificar el flujo de personas, de tal manera que la operación de transporte en las escaleras no sea de manera continua, sino que por el contrario exista un parámetro que permita la reducción de tiempo de operación del sistema, en referencia a los ciclos de funcionamiento innecesario de las mismas, dada la disminución en el flujo de personas usándolas, teniendo un cierto impacto medioambiental dado por la reducción del consumo de energía, y como efecto adicional una reducción en los costos monetarios debido al consumo energético.

Como segundo parámetro, se pretende utilizar elementos tecnológicos que brinden una mayor seguridad a los usuarios de escaleras eléctricas y que además fomente de cierta manera un mejor uso de las mismas. La forma que se presenta para abordar este punto, es la implementación de sensores en las franjas amarillas que por norma estos sistemas deben tener en cada uno de sus escalones, de tal manera que por medio de realimentación al usuario a través de algún tipo de señal, le indique que está utilizando la escalera de manera inadecuada, buscando con esto que el usuario mejore su ubicación en el escalón, teniendo un efecto en cuanto a reducción de accidentalidad, lo que tendrá como beneficio adicional la reducción de pagos por indemnizaciones debida a los accidentes.

4. OBJETIVOS

4.1. OBJETIVO GENERAL

Diseñar y desarrollar un prototipo simulado, que permita realizar el control de la activación de escaleras eléctricas, en función del flujo de personas. Esto con el propósito de reducir los consumos de energía en la utilización de este tipo de estructuras, garantizando además la seguridad de los usuarios.

4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Analizar el funcionamiento de las escaleras eléctricas, en cuanto a sus características mecánicas, eléctricas y de control, encontrando de esta manera su modelo matemático.

A partir del desarrollo del modelo matemático de las escaleras eléctricas, diseñar un sistema de control que permita reducir el consumo energético a partir de la operación de la escalera.

Desarrollar un sistema que permita mejorar la seguridad de los usuarios mediante la implementación de sensores y la utilización de un sistema de realimentación al usuario

Realizar una simulación que permita verificar el funcionamiento de los sistemas mencionados anteriormente, mostrando como característica principal el consumo de energía, además de la correcta operación del sistema de seguridad.

5. MARCO REFERENCIAL

La utilización de escaleras y rampas eléctricas ha venido en aumento en los últimos años. Tanta ha sido su acogida, que su implementación no se ha limitado solo a establecimientos como centros comerciales o centros de servicio, donde son parte fundamental de la infraestructura, sino que incluso su uso ha servido para que, en ciertos lugares, donde por una u otra razón es difícil movilizarse, se hayan instalado escaleras mecánicas que funcionan como medio de transporte, facilitando de esta manera la movilidad de las personas que habitan el lugar [11]. Teniendo en cuenta esto, se han desarrollado ciertos trabajos con el propósito de mejorar este tipo de estructuras, lo que ha permitido una mejora constante de las mismas. A continuación, se muestran algunos trabajos realizados que tuvieron como propósito mejorar ciertas condiciones y/o características de la estructura.

La búsqueda de nuevas herramientas que permitan mejorar la industria y con la idea de realizar aplicaciones para un sistema de transporte vertical en la industria ferroviaria, se han implementado dos métodos alternativos para reducir el consumo de energía de las escaleras eléctricas en el sector [12]. El primero de ellos denominado método "VSD-Accionamiento de velocidad variable", que, a través de la instalación de un variador de frecuencia, permite enlazar al sistema con el esquema de control de velocidad. El segundo es el diseño de un controlador especial "VVC-Accionamiento de voltaje variable a velocidad constante", que reduce la energía mediante el control de la tensión del motor y mejora el factor de potencia del motor cuando haya un menor número de personas utilizando la escalera eléctrica, sin la necesidad de variar la velocidad. Comparando estos dos métodos se logró identificar, que había un ahorro de energía de aproximadamente un 22%, cuando las escaleras eléctricas trabajaban con una velocidad variable (0.65, 0.6, 0.55 y 0.5) m/s, en comparación con la operación con velocidad constante (0,65 m/s solamente).

Otro sistema implementado para mejorar la eficiencia de las escaleras eléctricas, es adoptando un esquema de control de ahorro de energía, que tiene en cuenta la velocidad, una frecuencia variable y un regulador de voltaje inteligente, a través de las técnicas de detección y el desarrollo de un algoritmo fuzzy basado en adaptación y diagnóstico de fallas de las escaleras eléctricas, que permite detectar la dinámica de las personas, a través de un controlador de conversión de frecuencia para la escalera eléctrica. Además, permite modular la velocidad, controlar la tensión y hacer un monitoreo de seguridad del circuito de protección, para optimizar el rendimiento de la escalera mecánica [13]. Para comprobar el funcionamiento del control, se realizó un análisis comparativo de la eficiencia energética de dos escaleras eléctricas con diferente cantidad de años en operación, de una estación del metro en Helsinki, Finlandia. La prueba mostró que se puede ahorrar energía a más de 40% en este sistema.

Jordi Vidal Bort [14], El objeto del proyecto es la elaboración de una aplicación informática que permita la simulación del comportamiento en régimen dinámico de un motor de inducción trifásico. Se adaptó un modelo matemático de la máquina de inducción trifásica para el estudio del comportamiento en régimen dinámico en funcionamiento como motor.

Toledo Chojolán, Steeve Erasmo [15], Realizó una comparación entre la respuesta dinámica de lazos de control con reguladores tipo PID. En tiempo continuo y en tiempo discreto, tomando como parámetros de desempeño su respuesta temporal, y su respuesta en frecuencia, utilizando gráficas de respuesta al escalón unitario para el caso temporal y diagramas de Bode, Nyquist y del lugar geométrico de las raíces para el caso del análisis en frecuencia.

Utkin Vadim I. [16], trata de los conceptos básicos, las matemáticas y aspectos de diseño de sistemas de estructura variable, así como modos deslizantes como un modo de operación. Los principales argumentos a favor del control de modo deslizante son la reducción de orden, procedimiento de diseño de desacoplamiento, rechazo de perturbaciones, falta de sensibilidad a las variaciones de los parámetros y la aplicación sencilla por medio de convertidores de potencia. El procesamiento de los algoritmos de control y los datos utilizados en los sistemas de estructura variable se analizan. El potencial de deslizamiento metodología de control de modo se demuestra la versatilidad de los accionamientos eléctricos y los objetivos funcionales de control.

Gutiérrez Granados Cuitláhuac [17], aborda el desarrollo de un módulo didáctico basado en tecnología FPGA (Field Programmable Gate Array), que permite realizar el control de la velocidad de un motor de inducción trifásico. El enfoque de diseño y operación estaba orientado a apoyar los procesos de enseñanza y aprendizaje, en carreras afines a la Electrónica y a la Mecatrónica. Para esto utilizó, lenguaje descriptivo de hardware (HDL) para configurar circuitos programables, y la electrónica de potencia, logrando un control aceptable y seguro de la velocidad del motor de inducción en los voltajes y potencias propuestos.

Takahashi, Noguchi [18] presentaron un nuevo método mejorado de control directo de torque ("DTC" direct torque control), de la unidad de motor de inducción ("IMD" induction motor drive), para regular la velocidad ("SR" speed regulator), por medio de un controlador adaptativo. Con esto consiguieron controlar la velocidad de la inducción del motor. Como principal resultado, obtuvieron la señal de voltaje de referencia del inversor, basado en un controlador de señal de realimentación de entrada-salida. Demostraron que el DTC tiene una respuesta más rápida y una eficiencia más alta que el control vectorial.

Habetler, Divan [19] Presentan una nueva estrategia para dirigir un DTC de accionamiento del motor de inducción, basado en el nuevo espacio vectorial de modulación, reduciendo la torsión del estado estacionario, flujo, corriente y pulsaciones de velocidad. En el enfoque propuesto, el error entre el torque, el flujo estimado y la señal de referencia, serán compensados por el vector de tensión generado. El rendimiento del método de control propuesto se simula utilizando MATLAB®. Se concluye que el método propuesto produce menos par de torsión y rizado de flujo en estado estacionario operación que el DTC clásica.

Casadei, Grandi y Serra [20], describen un sensor de rotor orientado al flujo de torque-control de la velocidad de las máquinas de inducción, que utiliza componentes de flujo de estator como variables de control. La combinación de las ventajas de la orientación del flujo del rotor y el control de vector espacial de flujo del estator, conduce a las unidades de alto rendimiento utilizando un esquema de control simple. Este esquema se ve afectado por el total de fugas (variaciones de inductancia que determinan el funcionamiento desafinado). Ofrecen la posibilidad de estimar el total de fugas de la inductancia, además de la identificación de estator autoinductivo. La eficacia del sistema propuesto fue verificada por simulación por ordenador y pruebas experimentales.

Donescu, Griva y Profumo [21], Proponen una nueva estrategia de control vectorial de corriente, para las unidades del campo orientado a un torque controlado. La elección del inversor de conmutación de vectores se basó en la posición angular del flujo del rotor y en la referencia y los vectores de corriente del motor en el plano vectorial de conmutación. Los resultados de la simulación demuestran que el método propuesto permite obtener una mejor utilización del bus de CC y menores corrientes THD fase del motor, en comparación con otras técnicas de control de vectores actuales.

Cabrera L. A., Elbuluk M. E. y Husain I. [22], Implementaron una red neuronal artificial (ANN), para llevar a cabo la sintonización de la resistencia del estator de un motor de inducción. Los algoritmos de error de predicción de propagación hacia atrás y formación recursiva paralelas fueron utilizados en el entrenamiento de la red neuronal para la simulación, respectivamente. La red neuronal se utiliza para ajustar la resistencia del estator fue entrenado en línea, por lo que la estrategia DTC más robusto y preciso. Los resultados de simulación se presentan para tres configuraciones de redes neuronales diferentes que muestran la eficiencia del proceso de ajuste. Obtuvieron resultados experimentales para la una de la configuración de tres redes neurales. Tanto la simulación y los resultados experimentales mostraron que la ANN ha sintonizado la resistencia del estator en el controlador para realizar un seguimiento de la resistencia real de la máquina.

Criollo Córdova, Armando Danilo, Ruíz Maldonado, Carlos Alberto [23], Diseñaron un variador de velocidad para un motor de corriente alterna con dispositivos electrónicos totalmente asequibles, el variador consta de cinco pulsadores cada uno con una velocidad preestablecida que facilita su operación, lo que permite que su adaptación en el proceso de producción sea más conveniente.

6. MARCO TEORICO

6.1. Escalera

Permite el transporte entre dos plantas que se encuentran en desnivel (diferentes alturas), por medio de peldaños. Estas estructuras sirven para la comunicación en edificaciones verticales y deben permitir la movilización de forma fluida y segura de los usuarios. [24]

Es una estructura cuya característica es la movilización de usuarios en edificaciones verticales y Consiste en una escalera cuyos eslabones se mueven de manera independiente hacia arriba o hacia debajo de manera autónoma. Esta estructura, se implementa generalmente en edificios con gran flujo de usuarios [25].

Las escaleras eléctricas hacen parte de las estructuras que permiten la comunicación vertical en edificaciones, entre las que se encuentran [24]:

Ascensores: Transporte personas

Montacargas: Transporte de objetos

Andenes y rampas móviles: Transporte personas y/u objetos

6.2. Tipos de escaleras mecánicas

Los tipos de escaleras eléctricas se pueden determinar por su tipo de estructura. Las escaleras eléctricas más comunes, se basan en una estructura estándar tipo (J) [26], cuyas partes se pueden observar en la siguiente imagen (Figura 1):

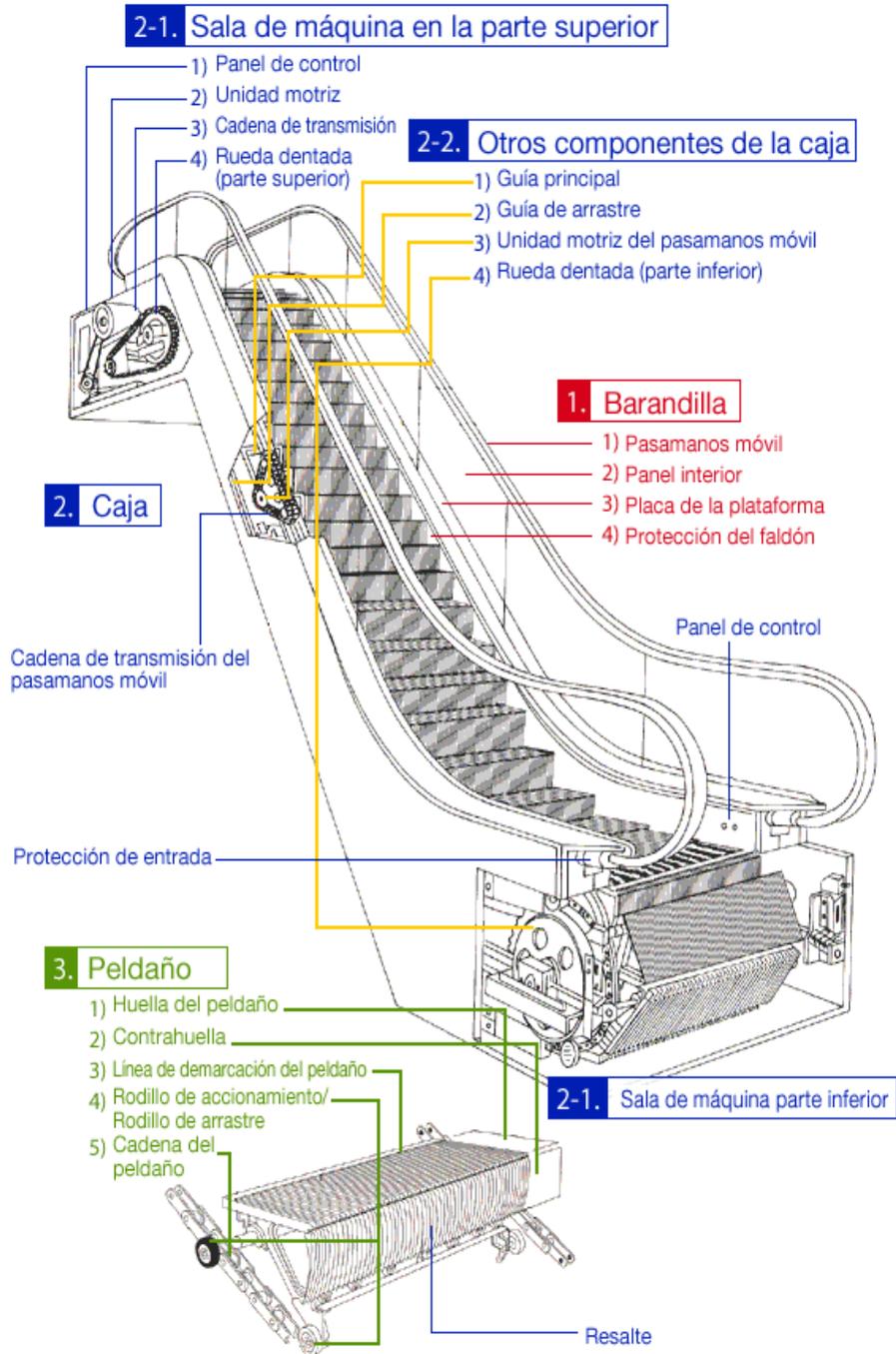


Figura 1. Estructura escalera mecánica tipo (J) estándar.
Fuente:[26]

Existen otros tipos de escalera que son menos implementadas, y que su utilización generalmente depende de una aplicación un poco más específica. Por ejemplo [26]:

Escalera mecánica en espiral: Este diseño permite adaptarse al diseño curvo de un edificio, además, dependiendo de la aplicación permite una mayor visualización de interior del edificio.

Escalera mecánica de forma ondulada: este diseño tiene como característica la presencia de secciones planas entre las pendientes de la escalera.

Escalera mecánica Skeleton: este diseño tiene una parte estructural en vidrio, de tal manera que se pueda observar el funcionamiento mecánico al interior de las escaleras.

Escalera mecánica independiente: este tipo de escaleras tienen como característica un diseño tipo puente por lo cual la estructura puede atravesar el espacio de la edificación.

Escalera mecánica panorámica: este tipo de diseño generalmente se utiliza para generar algún tipo de experiencia visual al usuario. La escalera se desplaza al interior de un tubo.

6.3. Partes de una escalera mecánica estándar

Como se mencionó anteriormente, una escalera mecánica estándar se basa en el diseño de estructura estándar tipo (J), por lo tanto, se puede retomar la (Figura 1), que muestra las partes de la escalera mecánica basada en este tipo de estructura, para describir la función de cada una de las partes de dicha estructura [26]:

1. Barandillas

Este elemento es la parte lateral de la escalera mecánica, se extiende sobre los escalones y en este se encuentran otros elementos como son, la protección del faldón, el panel interior, la placa de la plataforma y los pasamanos móviles.

- 1) **Pasamanos móvil:** este elemento se encuentra en la parte superior de la barandilla y se desplaza a lo largo de la misma de manera sincronizada con los escalones.
- 2) **Panel interior:** hace referencia al panel de la barandilla que se encuentra debajo del pasamanos móvil, generalmente está hecha en vidrio.
- 3) **Placa de la plataforma:** Este elemento funciona como pieza decorativa y tiene la función de cubrir la barandilla de una escalera mecánica (Figura 2).

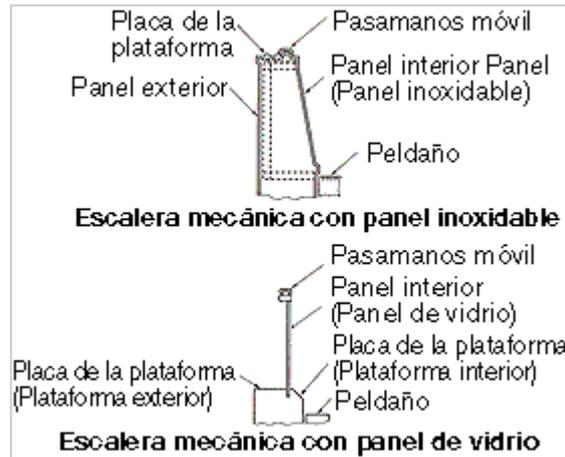


Figura 2. Placa de la plataforma.

Fuente: [26]

- 4) **Protección del faldón:** Esta pieza se encuentra dentro de la barandilla, debajo de la plataforma interior y junto a los escalones a poca distancia de los mismos.

2. Caja

Panel inferior que se encuentra al interior de la barandilla, situado justo debajo de la plataforma interior y próxima a los escalones a poca distancia de los mismos.

2.1 Sala de máquinas parte superior/inferior

- 1) **Panel de control:** Permite controlar la operación de paro y arranque de la escalera mecánica, además de suministrar la alimentación de energía eléctrica a la unidad motriz.
- 2) **Unidad motriz:** esta unidad tiene como función impulsar la escalera mecánica, y en el cual está contenido el motor eléctrico, un desacelerador, un freno electromagnético, la correa trapezoidal, rueda dentada y algunos otros elementos.
- 3) **Cadena de transmisión:** Esta cadena permite transmitir la energía de la unidad motriz a la rueda motriz (rueda dentada).
- 4) **Rueda dentada:** Estas ruedas están instaladas tanto en la parte superior como inferior de la escalera y tienen como función impulsar los escalones. La rueda dentada ubicada en la parte superior permite impulsar el movimiento de los escalones, y la rueda dentada de la parte inferior proporciona la posibilidad de que los escalones cambien su dirección.

2.2 Otros componentes de la caja

- 1) **Guía principal:** Es un riel que cumple la función de guiar los rodillos de accionamiento.
- 2) **Guía de arrastre:** Riel que tiene como función guiar a los rodillos de arrastre
- 3) **Unidad motriz del pasamanos móvil:** elemento que transmite de forma indirecta movimiento al pasamanos móvil, con la misma velocidad de los escalones, mediante la cadena de transmisión del pasamanos móvil.

3. Peldaño (escalón)

Base móvil sobre la que es posible desplazar los pasajeros en las escaleras mecánicas.

- 1) **Huella del peldaño:** Pieza del escalón donde los pasajeros se paran
- 2) **Contrahuella:** Hace referencia a la parte vertical del escalón.
- 3) **Línea de demarcación del peldaño:** Es la referencia (línea amarilla) que se encuentra a ambos extremos de los escalones y tiene como objetivo demarcar la posición correcta del pasajero dentro del mismo, de tal forma que se evite el contacto de los pasajeros con la protección del faldón y sufran algún tipo accidente.
- 4) **Rodillo de accionamiento/Rodillo de arrastre:** Para unir los escalones a sus correspondientes cadenas por medio de un eje y una rueda. La rueda delantera se llama rodillo de accionamiento y la rueda trasera se denomina rodillo de accionamiento.
- 5) **Cadena del peldaño:** se refiere a una cadena, ubicada en los dos extremos de la escalera mecánica. Permite conectar los escalones y su impulso es generado por la rueda dentada de la cadena de los peldaños.

6.4. Sistema de control

Un sistema de control se puede definir como un grupo de elementos (dispositivos), que interactúan entre sí para lograr un objetivo determinado de control [27]. Un sistema de control debe cumplir con los siguientes objetivos:

Asegurar la estabilidad y tener una respuesta confiable frente a perturbaciones.

Debe ser lo más fiable posible para evitar comportamientos inesperados en las variables de entrada.

Deben ser de fácil implementación y manejable, de tal manera que un ordenador lo pueda operar en tiempo real.

6.4.1. Tipos de sistema de control

Sistema de control en lazo abierto: Se refiere a esos sistemas de control en los que la variable de salida (variable controlada) no genera ningún efecto en la acción de control (variable de control) [28] (figura 3).

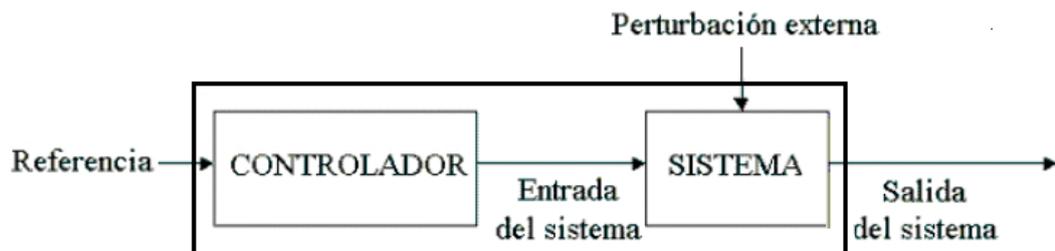


Figura 3. Esquema sistema de control en lazo abierto.

Fuente: [28]

6.4.2. Elementos básicos de un sistema de control

Sensor: Permite identificar las variables medidas para a partir de esto conocer los valores de la misma.

Controlador: Este elemento permite, a partir de los valores de entrada y la respuesta obtenida, determinar el proceso que se debe realizar para modificar las variables de control de acuerdo a una salida deseada.

Actuador: Hace referencia al dispositivo que realiza la acción que determine el controlador; este elemento además es el que modifica las variables de control [29]. (Figura 6)

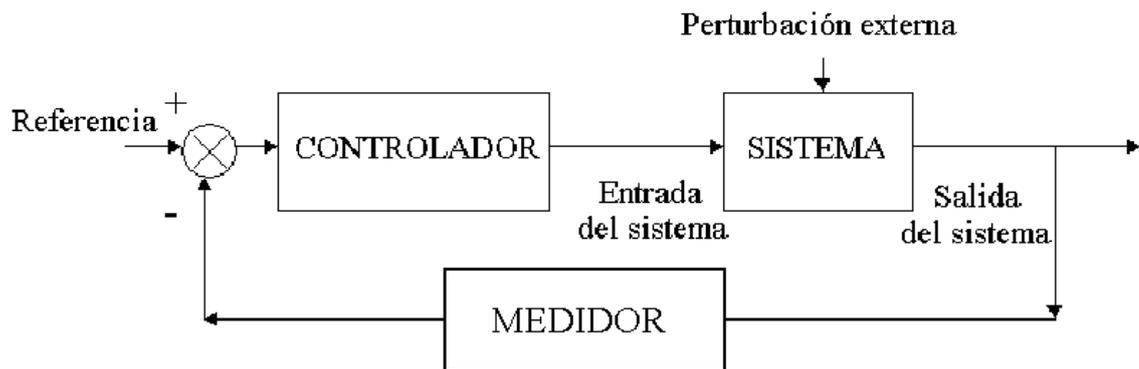


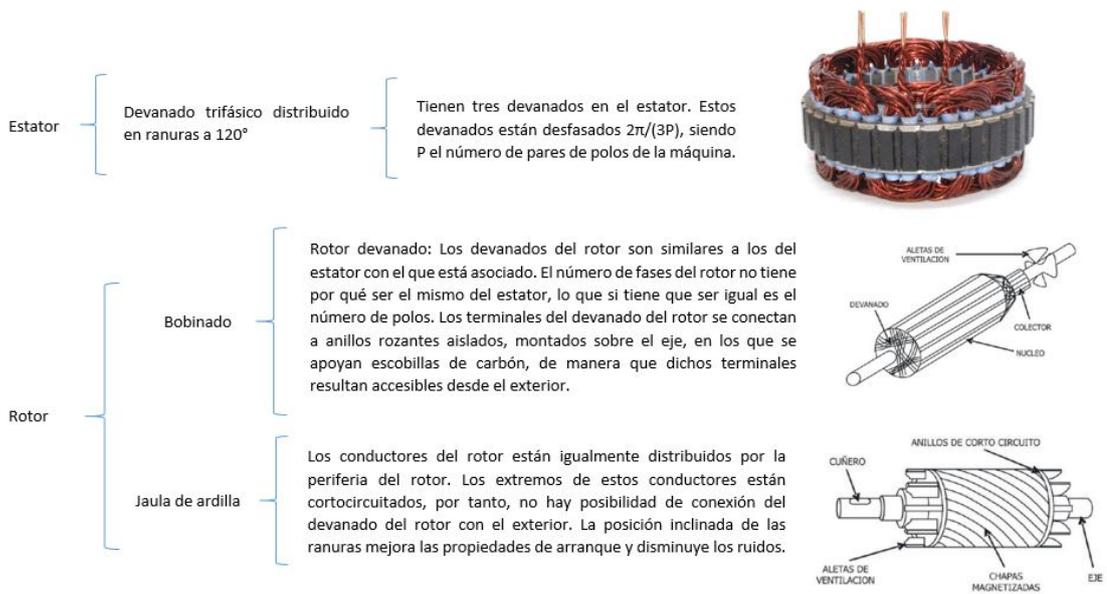
Figura 6. Elementos básicos de un sistema de control.

Fuente: [28]

6.5. Motor trifásico de inducción

El motor trifásico [30] asíncrono es el motor más usado en el mundo de las instalaciones industriales y en grandes edificios. Simple en términos de diseño y manejo, flexible en diversos campos de aplicación y con un funcionamiento económico. Es la solución más favorable cuando hablamos de relación calidad-precio.

6.5.1. Partes de un motor de inducción



6.5.2. Conexión de un motor de inducción

Cuando se alimenta un motor trifásico, los datos de la placa del motor deben corresponderse con la tensión y la frecuencia de alimentación. La conexión está implementada a través de los tornillos (versión estándar) en el cajetín de conexiones del motor y se debe hacer una distinción entre dos tipos de conexión, la conexión en estrella y la conexión en triángulo. Ejemplo con una alimentación de 3 AC 400 V, 50 Hz (Tabla 1).

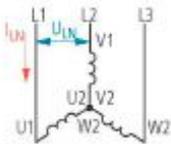
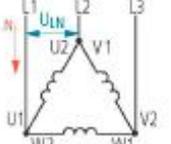
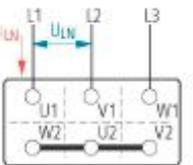
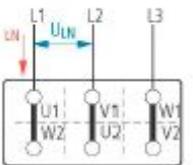
Conexión en estrella	Conexión en triángulo
	
	
$U_{LN} = \sqrt{3} \cdot U_W$	$U_{LN} = U_W$
$I_{LN} = I_W$	$I_{LN} = \sqrt{3} \cdot I_W$
	
<ul style="list-style-type: none"> • Con una especificación de tensión de 230/400 V, este motor debe estar conectado a la red trifásica ($U_{LN} = 400\text{ V}$) con una configuración en estrella. • Cada devanado del motor está diseñado para soportar un máximo de 230V. • Los tres terminales (W2, V2, U2) se conectan entre sí (conexión estrella) para que la tensión entre los terminales de entrada (U1, V1, W1) y el punto intermedio (estrella) sea 230V. 	<ul style="list-style-type: none"> • Con una especificación de tensión de 400/690 V, este motor debe estar conectado a la red trifásica ($U_{LN} = 400\text{ V}$) con una configuración en triángulo. • Cada devanado del motor está diseñado para soportar un máximo de 400V y podemos conectarlos directamente. • Para un arranque directo, los terminales de los tres devanados deben estar conectados entre sí (conexión triángulo) para que la tensión entre los terminales de entrada (U1, V1, W1) sea 400V.

Tabla 1. Conexión de un motor [30]

Métodos de arranque de un motor de inducción:

- **Arranque del motor directo:**

El arranque de motor directo es el método más sencillo para arrancar un motor trifásico asíncrono. Los devanados del estator están conectados directamente a la red eléctrica por un proceso de conmutación simple (Figura 7).

Como resultado de esta aplicación obtendremos altas corrientes de arranque (corriente de sobrecarga) que a su vez causan molestas caídas en la tensión de red. Por este motivo, las compañías eléctricas suelen limitar la potencia nominal de los motores conectados a la red.

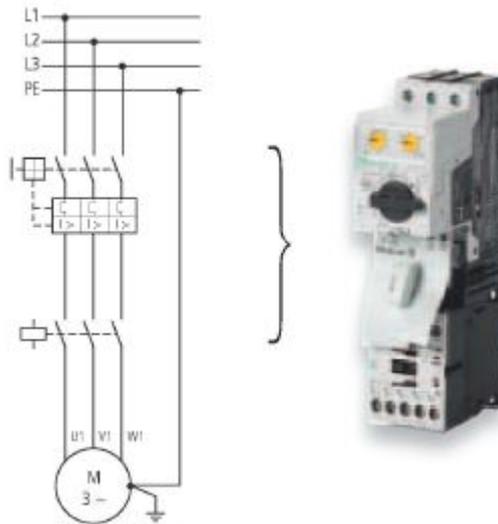


Figura 7. Diagrama de potencia y dispositivo del arranque directo de un motor [30]

- **Arranque estrella-triángulo:**

Con un arranque de motor estrella-triángulo (Figura 8), la puesta en marcha del motor trifásico asíncrono se realiza mediante una transición entre los devanados. Los puentes en el cajetín de bornes del motor se omiten, y las 6 conexiones de los devanados se conectarán a la red eléctrica mediante una conmutación llamada estrella-triángulo (conmutación manual o automática de los contactores).

Al momento del arranque el motor está conectado en estrella, el par de arranque y la corriente de entrada (en la conexión en estrella) se reduce a un tercio de los valores de la conexión en triángulo; luego del arranque se establece la conexión triángulo. Debido a la reducción del par en el arranque, la configuración en estrella-triángulo sólo es adecuada para aparatos con un par de carga baja o un par de carga.

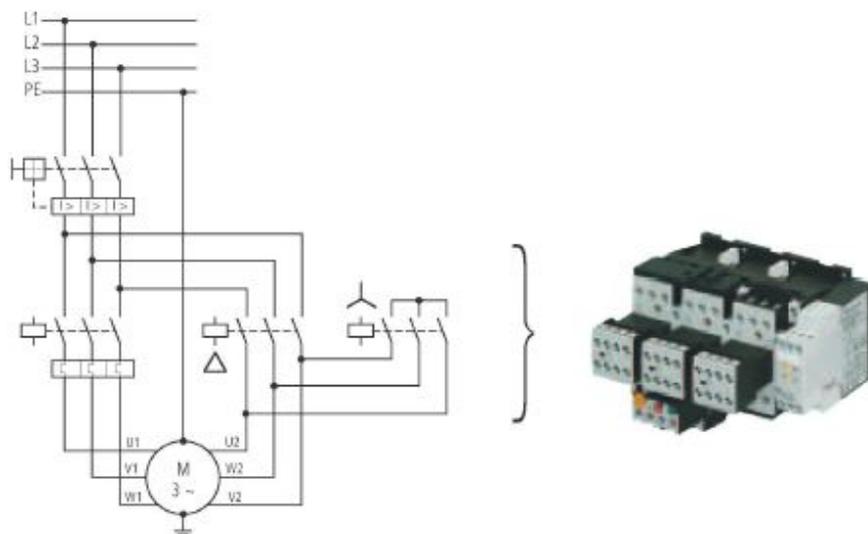


Figura 8. Diagrama de potencia y dispositivo del arranque tipo estrella-triángulo [30]

- **Arrancadores suaves:**

En muchos casos, el arranque directo o el arranque estrella-triángulo del motor trifásico asíncrono no es la mejor solución ya que altas corrientes de pico pueden influir en el suministro eléctrico y un aumento repentino del par puede inducir a los componentes mecánicos de la maquina o al sistema a altos niveles de estrés. El arrancador suave (Figura 9) permite un aumento continuo y lineal del par y ofrece la posibilidad de una reducción selectiva de la corriente de arranque. La tensión del motor se incrementa a partir de una tensión inicial y un tiempo de rampa de aceleración, seleccionados mediante selectores hasta llegar a la tensión nominal del motor. El arrancador también puede controlar la rampa de parada mediante la reducción de la tensión.

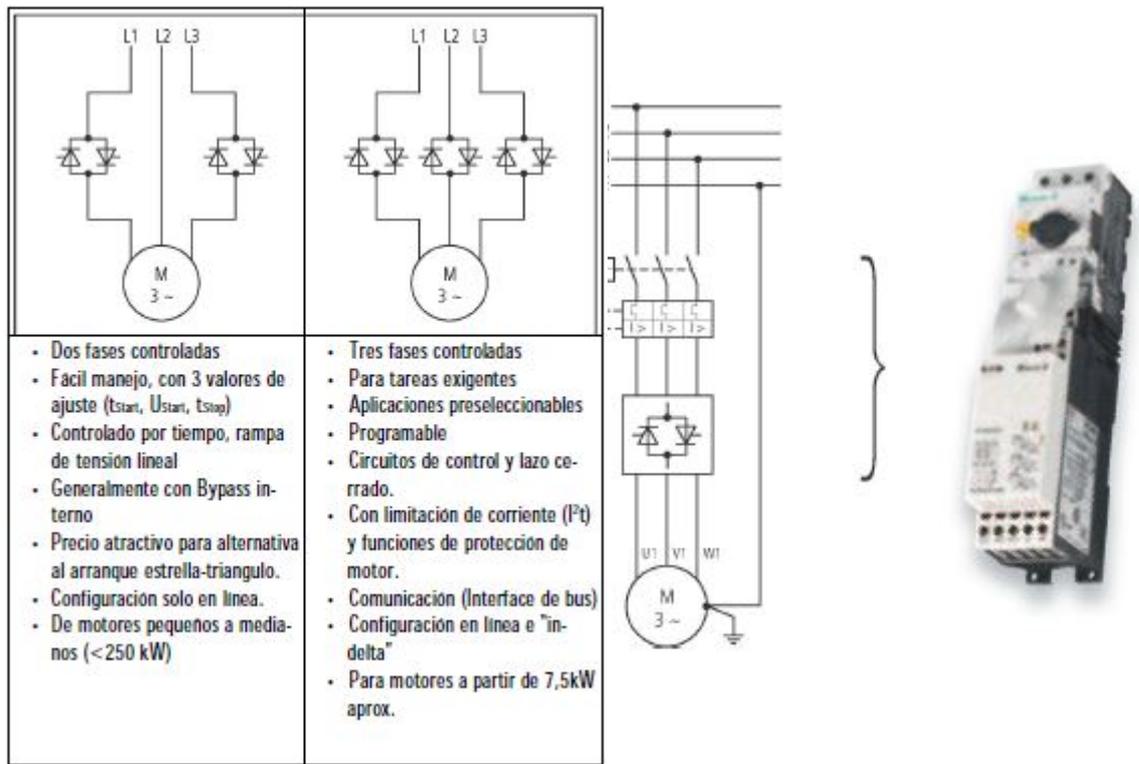


Figura 9. Diagrama de potencia de un arranque suave [30]

Guardamotor:

El guardamotor (Figura 10) es un interruptor accionado en forma local y que permite comandar y proteger motores. Con un sólo aparato se cubren las siguientes funciones:

- Protección contra corto circuitos.
- Protección contra sobrecargas.
- Protección contra falta de fase.
- Arranque y parada.
- Señalamiento.

El guardamotor posee un interruptor (on-off), un relé de sobrecarga y un disparo magnético perfectamente combinados entre sí. Se lo debe montar junto con un contactor sólo cuando se requiere accionamiento a distancia.



Figura 10. Guarda motor Simens

7. DISEÑO METODOLÓGICO

En el mundo moderno, se ha venido implementando distintos tipos de estructuras con diversos objetivos, algunos de ellas permiten mejorar el estilo de vida de las personas [1], entre ellas, las que permiten movilizarse dentro de una edificación con varios niveles, como son, ascensores y escaleras eléctricas. A través de los años, este tipo de máquinas ha evolucionado [2], sin embargo, desde su origen, la escalera mecánica sigue teniendo básicamente las mismas características. Pero al ser una estructura que moviliza seres vivos, necesita cumplir con ciertas condiciones para dar mayor seguridad a los usuarios, y además mejorar la eficiencia energética, implementando nuevos y mejores materiales para la construcción de la escalera.

Si bien es posible la utilización de mejores materiales en este tipo de estructura, es importante considerar las normativas que ayudan a tener un diseño confiable, que permitan garantizar las condiciones mínimas de seguridad para el usuario, el confort y además tener un bajo consumo de energía, con el propósito de que el sistema sea viable para el uso de las personas pero que además sea amable con el medio ambiente. Es importante mencionar, que a pesar del desarrollo y de los estudios acerca de las características de la escalera mecánica, aún no es infalible su diseño [3]. Por esta razón, resulta conveniente analizar las características de una escalera mecánica estándar, teniendo en cuenta su normativa y lo que esta implica en su fabricación.

Generalmente los sistemas se deben seguir mejorando, pero al hablarse de una escalera mecánica, las modificaciones deben realizarse teniendo presente la importancia de esta estructura, pues esta, es utilizada por las personas, por lo cual, al realizar un cambio a la escalera, no solo importará el diseño, sino que además deberá brindar las condiciones de seguridad necesarias y de ser posible, mejorar dicha característica.

7.1. Selección preliminar del diseño de la escalera mecánica

Con base a los diferentes diseños de escaleras mecánicas que son posibles de encontrar en el mercado, y haciendo un análisis de acuerdo a lo que se ofrece en el país, fue posible determinar el tipo de escaleras mecánicas que mayor demanda tienen en Bogotá. Para esto, se visitaron algunos de los centros comerciales más importantes de la capital, los cuales cuentan con este tipo de mecanismo para el transporte en interiores, y en donde fue posible observar que el principal proveedor es la marca MITSUBISHI® (Tabla 2).

MITSUBISHI®, cuenta con un catálogo muy amplio de diseños de escaleras mecánicas, sin embargo en Colombia y en buena parte de América, el tipo de escalera que mayormente se utiliza es el tipo J [31]. Este diseño no es exclusivo de MITSUBISHI®, ya que resulta ser el diseño más estándar que ofrece cualquier proveedor, por lo cual este tipo de escalera fue el seleccionado para realizar el análisis que se presenta en este documento.

7.1.1. Parámetros de una escalera mecánica tipo J

A continuación, se muestra algunos parámetros a tener en cuenta para construir una escalera mecánica.

1. Inclinación:

Las dos inclinaciones permitidas en el mercado para escaleras mecánicas son:

- 35° para escaleras mecánicas de desniveles menores a 6 m y velocidad menor o igual a 0,5 m/s (ASME A17.1-2013).
- 30°

2. Ancho de escalones:

En escaleras mecánicas el ancho de los escalones es: 1 m / 800 mm / 600 mm.

3. Velocidad de transporte:

El rango de velocidades a las que puede funcionar una escalera mecánica es:

- 0,5 m/s la más habitual
- 0,65 m/s para instalaciones de alto tráfico
- 0,75 m/s muy alto tráfico

ESCALERAS MECÁNICAS	$v \leq 0,5$ m/s	$0,5$ m/s < v
INCLINACIÓN MÁXIMA	35°	30°

Tabla 2. Inclinação máxima de escaleras mecánicas
Fuente: Norma ASME A17.1-2013

4. Diseño de los embarques/desembarques en escaleras mecánicas:

En escaleras mecánicas, la transición horizontal de los escalones en ambos embarques debe ser de al menos 800 mm para velocidad nominal de 0,5 m/s. A velocidad superior a 0,5 m/s e inferior de 0,65 m/s y en aquellas escaleras con desnivel superior a 6 m, la transición horizontal debe aumentar a 1200 mm como mínimo. Para velocidad superior a 0,65 m/s, tendrá que prever al menos 1600 mm. (Tabla 3)

	$v \leq 0,5$ m/s	$0,5$ m/s < $v \leq 0,65$ m/s	$0,65$ m/s < $v \leq 0,75$ m/s
TRANSMISIÓN HORIZONTAL (DESNIVEL $H \leq 6$ M)	800 mm	1200 mm	1600 mm
TRANSMISIÓN HORIZONTAL (DESNIVEL $H > 6$ M)	1200 mm	1200 mm	1600 mm

Tabla 3. Transición horizontal en embarques de escaleras mecánicas.
Fuente: Norma ASME A17.1-2013

5. Capacidad de transporte de las escaleras mecánicas

La norma EN-115 indica la capacidad teórica de transporte de escaleras mecánicas y que es función del ancho del escalón y de la velocidad de la escalera (tabla 4).

ANCHURA NOMINAL DEL ESCALÓN	600 mm	800 mm	1000 mm
Velocidad nominal 0,5 m/s	3600 Personas/h	4800 Personas/h	6000 Personas/h
Velocidad nominal 0,65 m/s	4400 Personas/h	5900 Personas/h	7300 Personas/h
Velocidad nominal 0,75 m/s	4900 Personas/h	6600 Personas/h	8200 Personas/h

Tabla 4. Capacidad teórica de transporte.

Fuente: ASME A17.1-2013

Número de personas dependiendo del ancho del escalón:

Se observan en la (Figura 11) la capacidad del número de persona por escalón dependiendo del ancho del escalón.

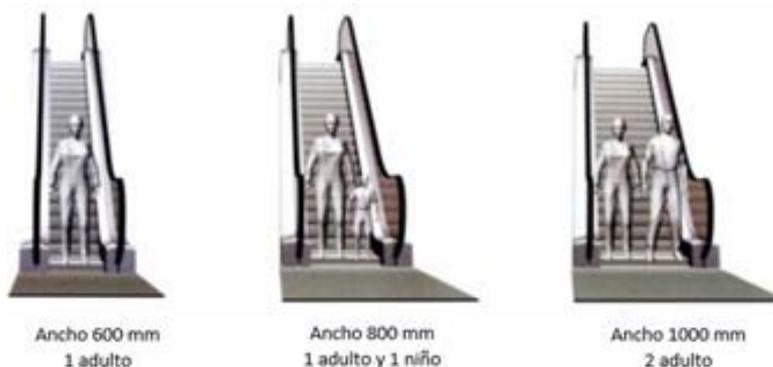


Figura 11 Personas dependiendo del ancho del escalón.

Fuente: Norma ASME A17.1-2013

8. Diseño de escalones

Los pasos de la escalera mecánica, posiblemente es una de las piezas que más cambios ha tenido en cuanto a su diseño, ya que debido a la importancia que esta pieza tiene en la funcionalidad del sistema, resulta fundamental realizar mejoras constantes a esta. Dada la importancia del paso en la escalera mecánica, la normativa es solo la base del diseño que realiza el fabricante; por ejemplo, Schindler, una de las empresas líderes del mercado, fabrica los pasos para sus escaleras con mejores estándares que los encontrados dentro de la norma.

Si bien el paso (peldaño o escalón) de la escalera mecánica, tiene básicamente las mismas partes de una escalera convencional, el peldaño de la escalera mecánica, dado su diseño, no está de más identificar de mejor manera cada una de las partes de la pieza. Por esta razón en la (Figura 12) se encuentran señaladas las partes principales del escalón, ya que, de aquí en adelante, para facilitar la exposición del diseño realizado, se van a nombrar de manera explícita dichas partes, además facilitando el entendimiento en el desarrollo del documento.

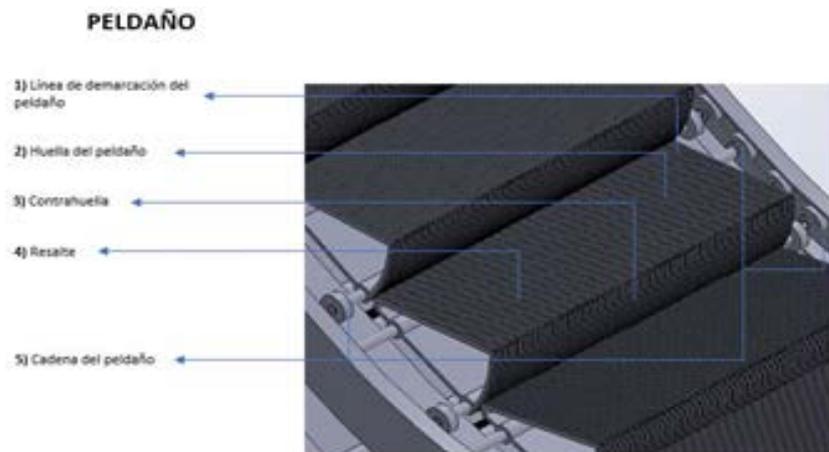


Figura 12. Partes de un escalón

Para la construcción del escalón como pieza vital del ensamble, se implementó el software CAD SOLIDWORKS®, y gracias a esta herramienta, se pudo observar que las condiciones del diseño fueran correctas, puesto que la construcción de esta pieza debe cumplir con las especificaciones mínimas de la norma ASME A17.1-2013, siendo esta la guía principal en la elaboración de la estructura presentada en este documento, y principalmente del diseño del escalón.

A partir de esto, y conociendo las características mínimas de construcción que se encuentran en la norma ASME A17.1-2013, se pudo observar que uno de los principales parámetros a la hora de diseñar el escalón, es el resalte (estriado del

material) del escalón, principalmente en lo referente a las medidas mínimas con que debe contar dicho resalte (Figura 13). Sin embargo, es importante mencionar que dependiendo del fabricante estas medidas tienden a variar, ya que estas son solamente un parámetro inicial para su construcción.

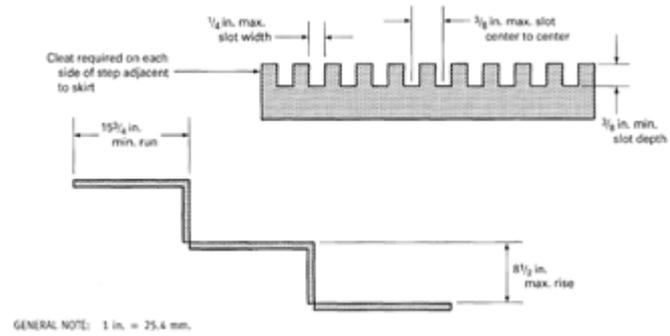


Figura 13. Medidas mínimas del escalón
Fuente: ASME A17.1-2013

Otras condiciones que se pueden observar en la figura anterior, hacen referencia a las características de la geometría del peldaño, en cuanto a las medidas de la huella y la contrahuella (esta respecto al siguiente peldaño). Otra de las medidas que hace parte de la geometría del escalón, y que se encuentra especificada en la norma ASME A17.1-2013, es la anchura máxima de la huella (Figura 11), que depende principalmente del número máximo de personas que puede transportarse en un solo peldaño.



Figura 14. Diseño del escalón

Teniendo en cuenta todas las especificaciones mencionadas, se diseñó el escalón que se muestra en la (Figura 14), sin embargo, estas características geométricas no deben afectar el cumplimiento de ciertas condiciones mecánicas que permitan el cumplimiento de la norma. Para comprobar la fiabilidad del

diseño se implementó el análisis que realiza Schindler® en sus escalones, que si bien el estudio es diferente a las que presenta la norma ya que los de Schindler® resultan ser un poco más rigurosos, el resultado en cuanto al comportamiento de la pieza debe satisfacer las condiciones de la norma ASME. Dicho análisis se podrá apreciar más adelante.

9. ANÁLISIS ESTÁTICO DE LAS PIEZAS DE LA ESCALERA MECÁNICA POR MEDIO DE ELEMENTOS FINITOS

De acuerdo a lo mencionado en este documento, el análisis estructural que se le hace al escalón, no necesariamente se debe regir con lo que aparece en la normativa, ya que algunos fabricantes tienen estándares de análisis más elevados. Si bien todas las piezas presentes en una escalera mecánica son bastantes importantes, el escalón, tiene un papel fundamental en el funcionamiento de la estructura, ya que es la parte de la escalera donde se va a ubicar el usuario para ser transportado de un nivel a otro, por lo cual, quizá cobra mayor importancia que alguna otra pieza de la escalera; es por esto que es importante hacerle un análisis detallado a esta pieza, de tal manera que se pueda verificar su comportamiento estructural. Para esto se siguió el siguiente proceso:

- Selección de parámetros
- Caracterización de la escalera mecánica
- Realización del diseño en SOLIDWORKS®
- Análisis estático de las piezas

Para el análisis estático del escalón, si bien el diseño se tomó casi que exclusivamente en la norma ASME A17.1-2013, las pruebas que se tomaron como parámetro son las realizadas por Schindler, ya que este fabricante produce los peldaños para sus escaleras, lo que les permite un mayor control de calidad al momento de diseñar la pieza [32]. En la siguiente tabla se muestran las diferencias que existen entre las pruebas que presenta la norma ASME y las pruebas que realiza Schindler para el control de calidad (tabla 5).

	ASME	SCHINDLER
EN EL CENTRO	12 kN	25 kN
A LOS COSTADOS	8 kN	18 kN

Tabla 5. Cargas aplicadas según la norma ASME y el fabricante Schindler al escalón
Fuente: ASME A17.1-2013 y Schindler

A partir de estos datos, por medio de un análisis en elementos finitos con SOLIDWORKS, es posible verificar el comportamiento de la pieza, tanto en lo estructural como en factor de seguridad que según dicta la norma debe ser mínimo de 3, por lo cual, conociendo este parámetro y el material de construcción, es posible verificar si efectivamente cumple con estas condiciones.

En la búsqueda de mejorar las características de distintos objetos, se ha innovado en el desarrollo de nuevos materiales para diversos propósitos, y de esta evolución, las escaleras mecánicas no han sido ajenas, ya que se ha llegado a implementar incluso materiales sintéticos, como los aerogeles, que permiten una mayor rigidez a la estructura al que es aplicado. Pero a pesar de la incursión de los nuevos materiales, los costos monetarios de estos, en algunas ocasiones, son ciertamente elevados [33]; es por esta razón que, en la construcción de los peldaños para la escalera mecánica, los fabricantes siguen teniendo al aluminio como material principal, pero, por ejemplo, las utilidades de aleaciones de aluminio se han implementado de forma más general en los diseños modernos.

Para el análisis estático del escalón, en base a los materiales utilizados en la actualidad, se optó por la implementación de una aleación de aluminio. De la misma manera que los aceros de alta resistencia, las aleaciones de aluminio, tienen una curva de esfuerzo-deformación con ciertas singularidades. Como en esta curva no se aprecia claramente un punto de fluencia, éste se debe determinar de manera diferente. La resistencia de fluencia se define como el esfuerzo que producirá una pequeña deformación permanente, generalmente igual a 0.2%; es decir, una deformación unitaria igual a 0.002. En este caso se le denomina límite convencional de fluencia.

Estas características hacen que las aleaciones de aluminio para aplicaciones como la de los peldaños de escaleras mecánicas, sean ideales por sus características mecánicas, en este caso será aleación aluminio-silicio (Al Si 6063-O).

Uno de los problemas al momento de diseñar, es que existen ciertas incertidumbres en cuanto al funcionamiento de la pieza; por esta razón es importante conocer el factor de seguridad de cada uno de los componentes de la estructura. En busca de este objetivo, se debe conocer las características del material e identificando los valores de resistencia de los materiales (los cuales pueden tener cierto grado de imprecisión), se utilizan métodos de cálculo, donde generalmente se asumen condiciones que no se cumplen en la práctica, dando como resultado valores de las cargas que son normalmente imprecisos, ya que incluso pueden existir cargas inesperadas.

Debido a esto y además de otros factores, que hacen que el diseñador deba prever las 'inexactitudes' o 'incertidumbres' escogiendo los esfuerzos de diseño 'significativamente' menores que las resistencias. Sin embargo, entre menor sea el esfuerzo máximo que soporta una pieza, mayores serán las dimensiones o más resistentes deberán ser los materiales. Este factor de seguridad o factor de incertidumbre se define como:

$$N = \frac{\text{Esfuerzo que produce la falla}}{\text{Esfuerzo máximo aplicado}} = \frac{\text{Resistencia}}{S(s)} \quad (1)$$

La ecuación 1 hace referencia a la fórmula genérica del factor de seguridad [34]; los criterios fundamentales para determinar o escoger un factor de seguridad son:

- Incertidumbres
- Tipo de material (dúctil o frágil)
- Criterio de falla (fluencia o rotura)
- Importancia del elemento y probabilidad de pérdida de vidas humanas

Como en los escalones de la escalera mecánica las cargas aplicadas son variables ya que depende del peso de las personas que están sobre ellos, los factores de seguridad son mayores y dependen del carácter de la carga aplicada (repetida en una dirección, repetida en dos direcciones, impactos suaves, medios o fuertes).

Para el análisis estático de los escalones se empleó el criterio de máxima tensión de Von Mises (ecuación 2) que se basa en la teoría de Von Mises-Hencky, también conocida como teoría de la energía de cortadura o teoría de la energía de distorsión máxima.

En cuanto a las tensiones principales, la tensión de Von Mises se expresa de la siguiente manera [35]:

$$\sigma_{\text{Von Mises}} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]} \quad (2)$$

Para que un material dúctil empiece a ceder, la tensión de Von Mises debe ser igual al límite de tensión.

Generalmente, el límite elástico funciona como límite de tensión. Sin embargo, SOLIDWORKS® tiene la característica de que se puede utilizar el límite de tensión de tracción/ruptura o establecer su propio límite de tensión (ecuación 3).

$$\sigma_{\text{VonMises}} \geq \sigma_{\text{limit}} \quad (3)$$

El límite elástico es una propiedad dependiente de la temperatura. Este valor especificado del límite elástico, debe considerar la temperatura del componente. El factor de seguridad en una ubicación se calcula a partir de (ecuación 4):

$$\text{Factor de seguridad (FDS)} = \frac{\sigma_{limit}}{\sigma_{VonMises}} \quad (4)$$

Para el análisis estático de la pista de las escaleras mecánicas se optó por la implementación de un material de acero estructural AISI 1020. La selección de este material es en base a lo que comúnmente es utilizado por los fabricantes [33] de escaleras mecánicas y cuyas características están establecidas en la norma ASME 17.1-2013.

9.1. Fuerzas soportadas por una escalera mecánica

Para el análisis estático de la escalera se tomó como parámetro, una escalera mecánica al tope de su capacidad, es decir que la estructura en este caso estará con una carga de dos adultos en cada uno de los escalones. Para determinar el número total de escalones se tomó en cuenta la siguiente definición [36]:

$$\text{Número efectivo de escalones} = \frac{h}{h_s} = \frac{4m}{0,2m} = 20 \text{ escalones} \quad (5)$$

Donde:

h = altura total de la escalera

h_s = altura de los escalones

Conociendo el número total de escalones, se calcula la carga total que se aplicará a la escalera teniendo en cuenta que por cada escalón habrá 2 adultos con un peso promedio cada uno de 75kg [36]:

$$\text{Carga por cada escalón} = m * g = 75 \text{ kg} * 9,8 \text{ m/s}^2 * 2 = 1470N \quad (6)$$

Donde:

m = masa promedio de la persona.

g = aceleración gravitación (gravedad).

Teniendo el valor calculado en la ecuación 6 es posible determinar la carga total aplicada a la pista de la escalera:

$$\text{Carga Total aplicada} = m * g * \left(\frac{h}{h_s}\right) = 1470Nm * 20 \text{ escalones} = 29400 N \quad (7)$$

A continuación, resulta necesario realizar el diagrama de cuerpo libre de la escalera (Figura 15), de tal manera que al hallar las dos componentes de F_{total} , se puede determinar la componente $F_{total} * \text{sen}(30^\circ)$ que es la que afectará directamente al motor, ya que hace referencia a la dirección del desplazamiento de la escalera mecánica.

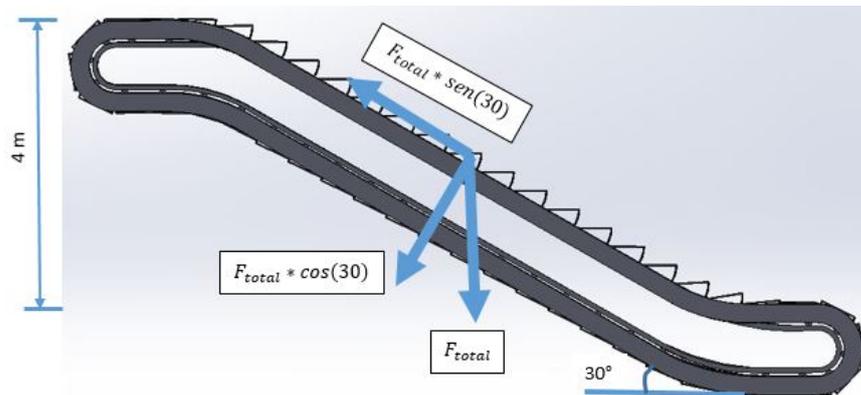


Figura 15. Diagrama de cuerpo libre de la escalera mecánica

$$F_{total} \text{sen}(30^\circ) = 29400N * \text{sen}(30^\circ) = 14700N \quad (8)$$

Estos cálculos servirán como herramienta para entender las condiciones en las cuales la escalera deberá trabajarse, además de que permitirán determinar el tipo de motor a ser implementado.

9.2. Motorreductor

En la mayoría de aplicaciones (escaleras mecánicas) es muy común usar reductores de velocidad, ya que con este sistema de reducción no solamente se disminuye la velocidad del motor a una más útil, sino que además se aumenta el “par” o “torque” en la salida del reductor. De acuerdo a esto, en el desarrollo del presente documento se presentarán los cálculos necesarios para determinar el tipo de motorreductor ideal para la escalera mecánica seleccionada.

A partir de la ecuación 8, se logró determinar la potencia que debe suministrar el motor para que el sistema funcione. Conociendo que la unidad de fuerza $N(\text{newton}) = \frac{kg \cdot m}{s^2}$ y la unidad de potencia $W(\text{vatio}) = \frac{J}{s} = \frac{N \cdot m}{s} = \frac{kg \cdot m^2}{s^3}$, se dice que:

$$P = F_{total} * \text{sen}(30^\circ) * V = 14700 \frac{kg \cdot m}{s^2} * 0,5 \frac{m}{s} = 7350 \frac{kg \cdot m^2}{s^3} = 7,350kW \quad (9)$$

Donde:

P = la potencia que el motor debe proveer al sistema.

V = la velocidad de desplazamiento de los escalones.

Sabiendo que la potencia necesaria para poner en funcionamiento la escalera mecánica es 7,350 kW, fue necesario hallar en el mercado un motor que contara con las condiciones apropiadas. Con base a esto, de las distintas opciones que existen en el mercado, en la (Tabla 6), se muestran los que más satisfacen la condición de potencia anteriormente mencionada. Estos motores son unos de los que se mayormente se utilizan, ya que sus características son estándar para muchos diseños de escaleras [37]:

Tipo	Potencia		Carga completa						Torque inicial	Máximo torque	Grado de protección	Relación del reductor	Peso
	kW	hp	Voltaje (V)	Frecuencia (Hz)	Corriente (A)	rpm	Eficiencia	Factor de potencia					
YFT160M-6K	7,5	10	380	60	16,2	960	86,8 %	0,81	2,5	3,3	IP21	49:2	155 kg
YFT160M-6K	11	15	380	60	23,0	960	86,8 %	0,84	2,3	3,1	IP21	49:2	180 kg

Tabla 6. Especificaciones del motorreductor

Se escoge el tipo de motor YFT160M-6K de 7,5 kW (Tabla 6), ya que este motor proporciona la potencia anteriormente hallada. Se corrobora los datos de corriente de línea y la corriente de arranque.

Conociendo las características del motor ilustrada en la (Tabla 6) se procedió a hallar la potencia de entrada del motor.

$$n_{eff} = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (10)$$

$$P_{in} = \frac{P_{out}}{n_{eff}} = \frac{7,5kW}{0,868} = 8,64kW \quad (11)$$

Donde:

n_{eff} es la eficiencia del motor.

P_{out} es la potencia de salida del motor.

P_{in} es la potencia de entrada del motor.

Conociendo la potencia de entrada, se haya la corriente de línea que hace referencia a cuanto consume el motor cuando este alcanza su estado estable:

$$P_{3\phi} = \sqrt{3} * I_L * V_L * F.P. \quad (12)$$

$$I_L = \frac{P_{3\phi}}{\sqrt{3} * V_L * F.P.} = \frac{8,64kW}{\sqrt{3} * 380V * 0,81} = 16,21 A \quad (13)$$

Donde:

$P_{3\phi}$ potencia de entrada.

I_L corriente de línea.

V_L voltaje de línea.

$F.P.$ factor de potencia del motor.

Después es importante conocer la corriente necesaria para romper la inercia inicial del motor en el momento de arranque antes de alcanzar su estado de estabilidad, esto se denomina corriente de arranque

$$I_{ar} = I_L * 2 = 16,21A * 2 = 32,42 A \quad (14)$$

Donde:

I_{ar} Corriente de arranque.

Se multiplica por una constante según la norma IEC 60034-30-1 especifica que la corriente mínima de arranque es dos veces la corriente de línea del motor.

Gracias a estos cálculos, se puede retomar los datos de la (Tabla 6), y comparando los resultados, se pudo verificar que efectivamente las especificadores del motor son las ideales para la escalera mecánica expuesta en el presente documento.

9.3. Máquina de tracción

Para relacionar la estructura de la escalera mecánica con el sistema eléctrico, que permitirá el funcionamiento de la estructura, es necesario tener una máquina de tracción. Las partes principales de este mecanismo se muestra en la siguiente imagen (figura 16):

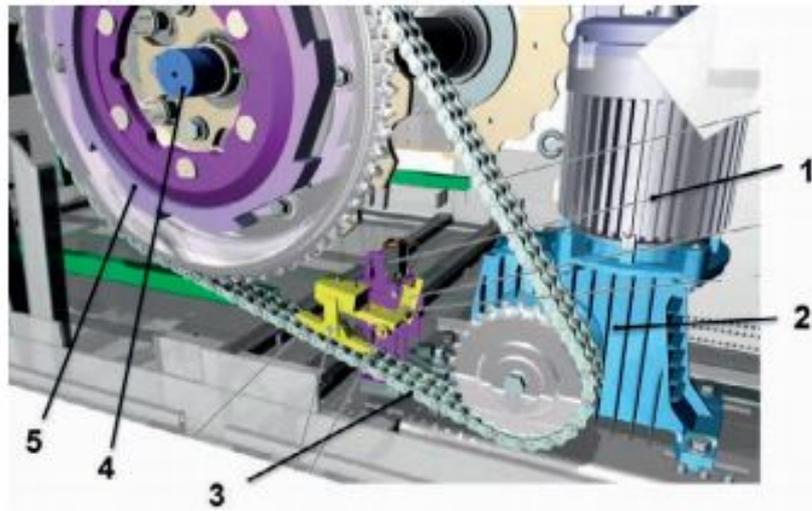


Figura 16. Partes de la máquina de tracción

N°	Pieza
1	Motor
2	Reductor
3	Cadenas de transmisión
4	Árbol principal de transmisión
5	Freno de emergencia

Tabla 7. Partes de la maquina de traccion

Teniendo presente lo anterior, es necesario realizar los cálculos de los principales componentes de la máquina de transmisión, de tal forma que se pueda tener mayor claridad acerca de las condiciones que debe tener todo el sistema para poner en operación la escalera mecánica. En la (Figura 17) se tiene un diagrama de cuerpo libre de la máquina de transmisión, donde se ve la relación que debe tener los piñones y la cadena de acuerdo a las características de velocidades lineales y angulares.

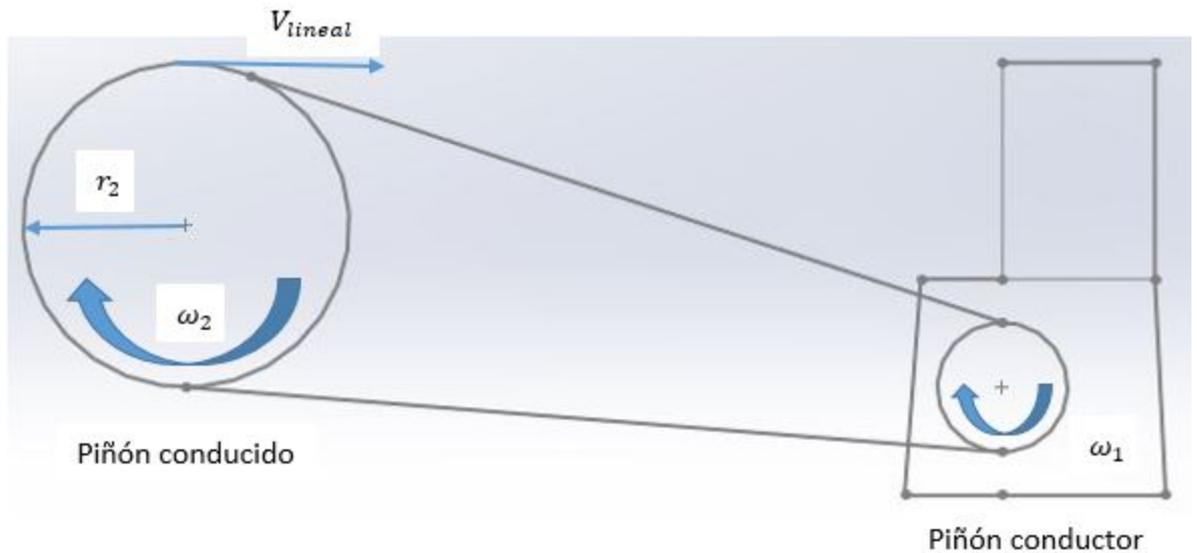


Figura 17. Diagrama de cuerpo libre de la máquina de tracción

Donde:

V_{lineal} = Velocidad lineal

ω_1 = Velocidad angular piñón conductor

ω_2 = Velocidad angular piñón conducido

r_2 = radio piñón conducido

Para realizar los cálculos pertinentes inicialmente se tiene que:

$$V_{lineal} = 0,5 \text{ m/s}$$

$$r_2 = 0,3 \text{ m}$$

$$\omega_m = 960 \text{ rpm}$$

$$\text{Relación del reductor} = 49:2$$

Donde

ω_m = velocidad angular del motor

r_2 , Tomado de un piñón conducido comercial [38]

Definido previamente lo anterior se procede a realizar los siguientes cálculos:

Velocidad angular del piñón conductor ω_1 :

$$\omega_1 = \frac{960 * 2}{49} = \frac{1920}{49} \text{ rpm} \cong 39,184 \text{ rpm} \quad (15)$$

Luego la velocidad angular del piñón conducido ω_2 , será:

$$\omega_2 = \frac{V_{lineal}}{r_2} = \frac{0,5 \text{ m/s}}{0,3 \text{ m}} = \frac{5}{3} \text{ rad/s} \quad (16)$$

$$\omega_2 = \frac{5}{3} \text{ rad/s} * \frac{60 \text{ s}}{2\pi} = \frac{50}{\pi} \text{ rpm} \cong 15,915 \text{ rpm} \quad (17)$$

Como:

$$\omega_1 * r_1 = \omega_2 * r_2 \quad (18)$$

Decimos que el radio del piñón conductor r_1 será:

$$r_1 = \frac{\omega_2 * r_2}{\omega_1} = \frac{\left(\frac{50}{\pi}\right) \text{ rpm} * 0,3 \text{ m}}{\left(\frac{1920}{49}\right) \text{ rpm}} = 0,1218 \text{ m} \quad (19)$$

Para el cálculo del número de dientes de piñón conductor se conoce de antemano el número de dientes del piñón conducido $Z_2 = 57 \text{ dientes}$, entonces:

$$Z_1 * \omega_1 = Z_2 * \omega_2 \quad (20)$$

El número de dientes del piñón conductor Z_1 será:

$$Z_1 = \frac{Z_2 * \omega_2}{\omega_1} = \frac{57 * \left(\frac{50}{\pi}\right) \text{ rpm}}{\left(\frac{1920}{49}\right) \text{ rpm}} = 23,15 \cong 23 \text{ dientes} \quad (21)$$

A partir de los parámetros calculados se calcula el torque necesario:

$$T = F_{total} \text{sen}(30^\circ) * r_2 = 14700 \text{ N} * 0,3 \text{ m} = 4,41 \text{ kNm} \quad (22)$$

Donde:

$r_2 =$ Radio del piñón conducido

Sabiendo que el motor cuenta con una potencia de 7500W, es posible determinar el torque del motor de inducción T_{Motor} :

$$T_{Motor} = \frac{P * 60}{2\pi * rpm} = \frac{7500 W * 60}{2\pi * 960 rpm} = 74,604 Nm \quad (23)$$

Con la velocidad angular del piñón conductor ω_1 , se tiene que el torque de este es:

$$T_{piñón\ conductor=Reductor} = \frac{P * 60}{2\pi * \omega_1} = \frac{7500 W * 60}{2\pi * 39,184 rpm} = 1,828 kNm \quad (24)$$

Y con la velocidad angular del piñón conducido ω_2 , se tiene que el torque de este es:

$$T_{piñón\ conducido} = \frac{P * 60}{2\pi * rpm} = \frac{7500 W * 60}{2\pi * 15,915 rpm} = 4,5 kNm \quad (25)$$

9.3.1. Calculo de cadena de transmisión

A partir de los siguientes parámetros, cuyos valores fueron hallados previamente decimos que [39]:

Fuente de potencia: Motor eléctrico

$P = 7,5 kW$

Mecanismo a accionar: Escalera mecánica (irregular)

Numero de rpm:

$Motor = 960 rpm$

$Piñón\ conductor = Reductor = \frac{1920}{49} rpm \cong 39,184 rpm$

$Piñón\ conducido = \frac{50}{\pi} rpm \cong 15,915 rpm$

Distancia entre centros: 1500mm

Numero de dientes del piñón conductor $Z_1 = 23$

Numero de dientes del piñón conducido $Z_2 = 57$

Potencia corregida:

$$P_c = k_1 * k_2 * k_3 * k_4 * k_5 * P \quad (26)$$

Donde:

$$k_1 = \frac{19}{Z_1} = \frac{19}{23} = 0,83 \quad (27)$$

k_2 Tiene en cuenta el número de cadenas (anexo 1)

$$k_2 = 0,55$$

k_3 Se refiere al número de eslabones que tendrá la cadena (anexo 2)

Suponiendo 120 eslabones

$$k_3 = 1$$

k_4 Factor de servicio (anexo 3)

Motor eléctrico y de una escalera mecánica

$$k_4 = 1,4$$

k_5 Coeficiente en función de la vida útil (anexo 4)

$$k_5 = 1$$

Ya calculado los diferentes coeficientes se procedió a calcular la potencia corregida:

$$P_c = (0,83) * (0,55) * (1) * (1,4) * (1) * (7,5 \text{ kW}) \quad (28)$$
$$P_c = 4,79 \text{ kW}$$

Tipo de cadena según el catalogo a partir del número de rpm y la potencia corregida (anexo 5):

$$120 (24A)$$

Con un paso de 38,10 mm

Calculo del diámetro de los piñones corregido:

$$D_p = \frac{\text{paso}}{\text{sen}\left(\frac{\pi}{Z}\right)} \quad (29)$$

$$D_{p.\text{conductor}} = \frac{38,10 \text{ mm}}{\text{sen}\left(\frac{\pi}{23}\right)} = 279,804 \text{ mm} \quad (30)$$

$$D_{p.\text{conducido}} = \frac{38,10 \text{ mm}}{\text{sen}\left(\frac{\pi}{57}\right)} = 691,624 \text{ mm} \quad (31)$$

Calculo de la longitud de la cadena:

$$\frac{L}{\text{paso}} = \frac{Z_1 + Z_2}{2} + (Z_1 + Z_2) * \frac{\beta}{\pi} + 0,02 * \cos(\beta) * \frac{2}{\text{paso}} \quad (32)$$

Donde:

L es la longitud de la cadena

β es el ángulo de contacto

$$\beta = \text{sen}^{-1}\left(\frac{R_2 - R_1}{0,02}\right) \quad (33)$$

A partir de un proceso y cálculos por medio de un algoritmo realizado en Excel (anexo 6):

0,02 calculado al partir de la distancia entre centros igual a 1509,9 mm

$$\frac{L}{\text{paso}} = 120 \text{ Es el numero de eslabones de la cadena} \quad (34)$$

Entonces:

$$L = N^\circ \text{ de eslabones} * \text{paso} = 120 * 38,10 \text{ mm} \quad (35)$$
$$L = 4572 \text{ mm}$$

Como el número de eslabones es el mismo no es necesario volver a calcular la potencia corregida.

$$P_c = 4,79 \text{ kW}$$

Confirmando por el catalogo que es una cadena (anexo 7):

120(24A) Doble

Con un paso de 38,10 mm

Calculo de la velocidad lineal de la cadena [40]:

$$V_{lineal-caena} = \frac{paso * Z * rpm}{60} = \frac{38,10 \text{ mm} * 23 * 39,184 \text{ rpm}}{60} \quad (36)$$
$$V_{lineal-cadena} = 0,57 \text{ m/s}$$

Esfuerzo total soportado:

$$F_u = \frac{P}{V_{lineal-cadena}} = \frac{7,5 \text{ kW}}{0,57 \text{ m/s}} = 13157,89 \text{ N} \quad (37)$$

Fuerza corregida:

$$F_c = M * (V_{lineal-cadena})^2 \quad (38)$$

Donde:

M es la masa unitaria (kg/m) de la cadena y hallada por medio del catálogo:

M=11,10 kg/m

$$F_c = 11,10 \text{ kg/m} * (0,57 \text{ m/s})^2 = 3,606 \text{ N} \quad (39)$$

Entonces el esfuerzo total será:

$$F_T = F_u + F_c = 13157,89 \text{ N} + 3,606 \text{ N} = 13161,496 \text{ N} \quad (40)$$

Coefficiente de seguridad:

$$C_s = \frac{R}{F_T} \quad (41)$$

Donde:

R=314,9 kN es la carga de rotura

$$C_s = \frac{314,9 \text{ kN}}{13,161 \text{ kN}} = 24 \quad (42)$$

Se dice que:

$$C_s = 24 \text{ donde } C_s > 12$$

Presión máxima:

$$P_s = \frac{F_T}{d * 2 * L} \quad (43)$$

Donde:

d=11,10 mm es el diámetro del perno de la cadena hallado del catalogo

L=25,22 mm es el ancho del eslabón

$$P_s = \frac{13161,49 \text{ N}}{11,10 \text{ mm} * 2 * 25,22 \text{ mm}} = 23,50 \text{ N/mm}^2 \quad (44)$$

10. Desarrollo del Modelo matemático del motor de inducción

10.1. Realización Modelo equivalente monofásico del motor de inducción

Debido a que un motor de inducción es un sistema trifásico en equilibrio, es posible determinar su funcionamiento mediante el circuito equivalente de alguna de sus fases. Con este motor es posible traer a colación el principio de inducción, por lo cual el circuito equivalente, se asemeja al de un transformador monofásico, de tal forma que el estator será el primario y el rotor se tomara como el secundario. Sin embargo, el sistema tiene como diferencia con el transformador la frecuencia, ya que estas son distintas en el rotor (f_r) y en el estator (f), por lo cual se puede decir, que el transformador (estático), representa al motor cuando se encuentra completamente detenido, con una velocidad mecánica cero ($\omega_m=0$) y normalmente deslizamiento equivalente a uno ($S=1$ puesto que $\omega_s=\omega_r$).

A partir de lo anterior es posible determinar la transformación del motor de inducción, en referencia al esquema de la (Figura 18).

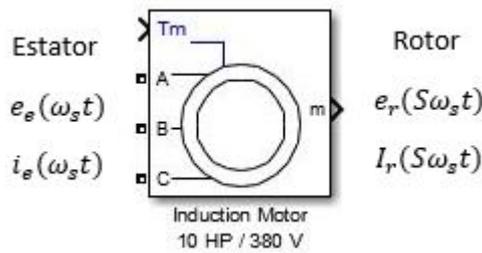


Figura 18. Esquema motor de inducción

En la (Figura 18), se puede observar que la frecuencia eléctrica de las distintas variables de rotación, se deben corregir respecto al deslizamiento S (cociente de la velocidad de la rotación de los campos magnéticos del rotor y estator).

Una característica que vale la pena señalar, es que la expresión $S \cdot \omega_s$ hace referencia a la velocidad física del campo magnético rotatorio del rotor respecto del mismo, es decir, que representa de una velocidad relativa. Para determinar dicha velocidad en un valor absoluto, debe tenerse en cuenta la velocidad de giro mecánica del rotor, sumado con la del campo magnético rotatorio del rotor, de esta manera, la fuerza magnética motriz corresponde a $S \cdot \omega_s + \omega_m$ que es la velocidad sincrónica ω_s .

A partir del circuito equivalente y de que tanto el estator como el rotor presentan la misma frecuencia (frecuencia sincrónica), es posible realizar los cálculos de forma fasorial. De acuerdo a esto, en la (Figura 19) se muestra el circuito equivalente por fase del motor de inducción.

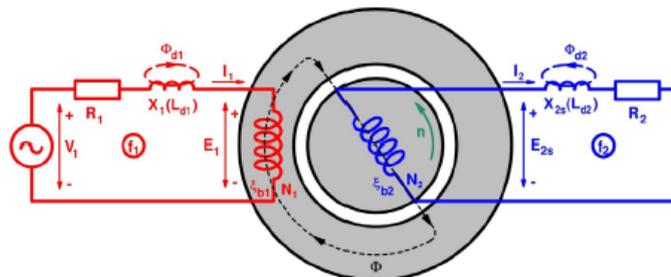


Figura 19. Esquema de un motor de inducción por fase

Simplificando el esquema anterior, para modelar un motor trifásico de inducción se emplea el circuito equivalente del motor trifásico por fase representado en la (Figura 20).

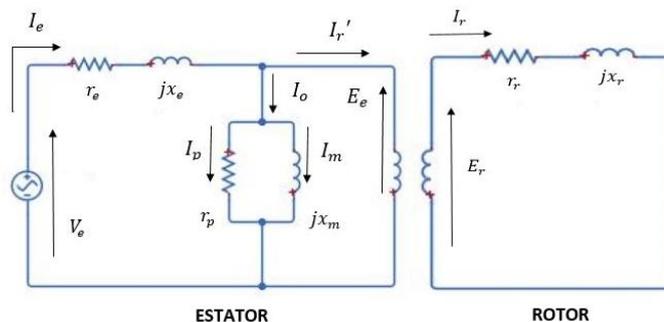


Figura 20. Circuito general equivalente por fase

A partir del circuito de la figura, es un sistema análogo para el caso del transformador:

- Las resistencias r_e y r_r hacen referencia a las pérdidas en los embobinados de estator y rotor respectivamente.
- Las inductancias X_e y X_r modelan las pérdidas por flujos de fuga en el estator y rotor respectivamente.
- La rama paralela en el estator representa las pérdidas en vacío, como por ejemplo, pérdidas en el hierro en el estator y rotor, pérdidas por rozamiento (en función de la velocidad) y otras pérdidas.

Para verificar el funcionamiento del motor de inducción en base al circuito equivalente, se debe determinar qué efecto tiene el deslizamiento respecto a la magnitud de las características del rotor, por lo cual se debe encontrar una razón de transformación entre las variables del rotor y estator [41].

- 1) Relación entre las magnitudes de \dot{E}_e y \dot{E}_r , por medio de la vista en transformadores:

$$E_e = |\dot{E}_e| = 4,44 * f * N_e * \emptyset \quad (45)$$

$$E_r = |\dot{E}_r| = 4,44 * s * f * N_r * \emptyset \quad (46)$$

Donde:

f = frecuencia de alimentación (estator).

N_e = número de espiras del estator.

N_r = número de espiras del rotor.

\emptyset = flujo mutuo que es enlazado tanto por el rotor como por el estator.

De este modo:

$$\frac{E_e}{E_r} = \frac{N_e}{s * N_r} = \frac{a}{s} \quad (47)$$

Donde:

$$a = \frac{N_e}{N_r} \quad (48)$$

- 2) Para las corrientes se debe considerar la relación entre las fuerzas magnetomotrices del rotor y estator y el flujo mutuo enlazado.

$$R * \emptyset = N_e * I'_r = N_r * I_r \quad (49)$$

$$\frac{I'_r}{I_r} = \frac{N_r}{N_e} = \frac{1}{a} \quad (50)$$

Donde:

I'_r = Corriente efectiva que produce el flujo mutuo (descontada la corriente de pérdida de la rama de paralela del estator $I'_r = |\vec{I}'_r|$).

I_r = Corriente efectiva inducida en el rotor ($I_r = |\vec{I}_r|$).

3) Para las magnitudes entre las impedancias se tiene:

$$\dot{Z}_e = r_e + j\omega_s L_e = r_e + jX_e \quad (51)$$

$$\dot{Z}_r = r_r + j\omega_s L_r = r_r + jsX_r \quad (52)$$

Donde:

\dot{Z}_e = Impedancia del estator.

\dot{Z}_r = Impedancia del rotor.

Además:

$$\dot{Z}_r = \frac{\dot{E}_r}{\dot{I}_r} = \frac{s}{a} * \frac{\dot{E}_e}{a\dot{I}'_r} = \frac{s}{a^2} * \dot{Z}'_r \rightarrow \frac{\dot{Z}'_r}{\dot{Z}_r} = \frac{a^2}{s} \quad (53)$$

Donde \dot{Z}'_r = Impedancia del rotor referida al estator.

En el caso particular de las componentes resistiva e inductiva de la impedancia del rotor se tiene:

$$\dot{Z}'_r = \frac{a^2}{s} (r_r + jsX_r) = \left(\frac{a^2 r_r}{s} + ja^2 X_r \right) \dot{Z}'_r \quad (54)$$

Se define:

$$r'_r = a^2 r_r \quad (55)$$

$$X'_r = a^2 X_r \quad (56)$$

Por lo tanto:

$$\dot{Z}'_r = \frac{r'_r}{s} + jX'_r \quad (57)$$

De acuerdo al análisis previo se tiene el circuito equivalente por fase referido al estator de la (Figura 21).

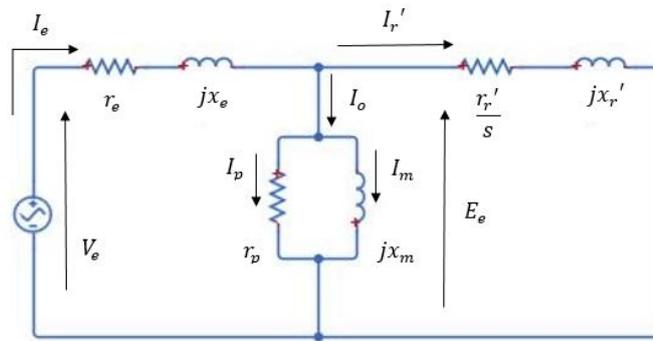


Figura 21. Circuito equivalente por fase (referido al estator).

Generalmente en el circuito equivalente de la figura anterior, la resistencia del rotor $\frac{r_r}{s}$ es representada como una resistencia fija (independiente del deslizamiento) más una resistencia variable, de esta manera se puede obtener una analogía de un circuito con carga, como el que se ilustra en la (Figura 22).

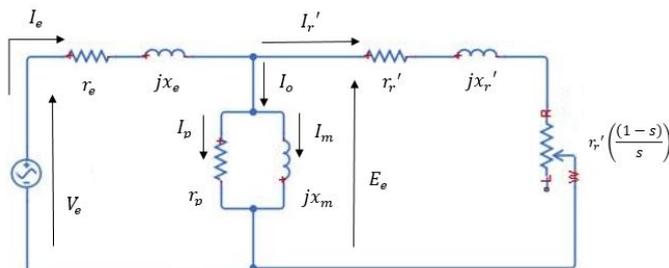


Figura 22. Circuito equivalente por fase (con carga representada).

Entonces, r_r' representa la resistencia equivalente de los enrollados de rotor referidos al estator, y la expresión $r_r' \left(\frac{1-s}{s} \right)$ hace referencia a la resistencia en el eje, es decir, a la carga mecánica de la máquina.

Como la carga en el eje es función del deslizamiento s , se tiene que:

- Cuando el motor está en vacío: $r_r' \left(\frac{1-s}{s} \right) \rightarrow \infty$ por lo cual $s \rightarrow 0$ y $\omega_r = \omega_s$.
- Cuando el motor está detenido: $r_r' \left(\frac{1-s}{s} \right) \rightarrow 0$ por lo cual $s=1$ y $\omega_r = 0$.

10.2. Desarrollo del Modelo del motor de inducción por medio de *ident*

Si bien se conoce de antemano el modelo equivalente del motor inductivo, es necesario complementar dicho modelo, teniendo en cuenta el sistema completo con las tres fases, de tal manera que para cumplir con este propósito MATLAB cuenta con una herramienta que permite estimar el modelo matemático de cualquier planta. En la (Figura 23) se observa las especificaciones del motor de inducción implementadas en el bloque de configuración de simulink.

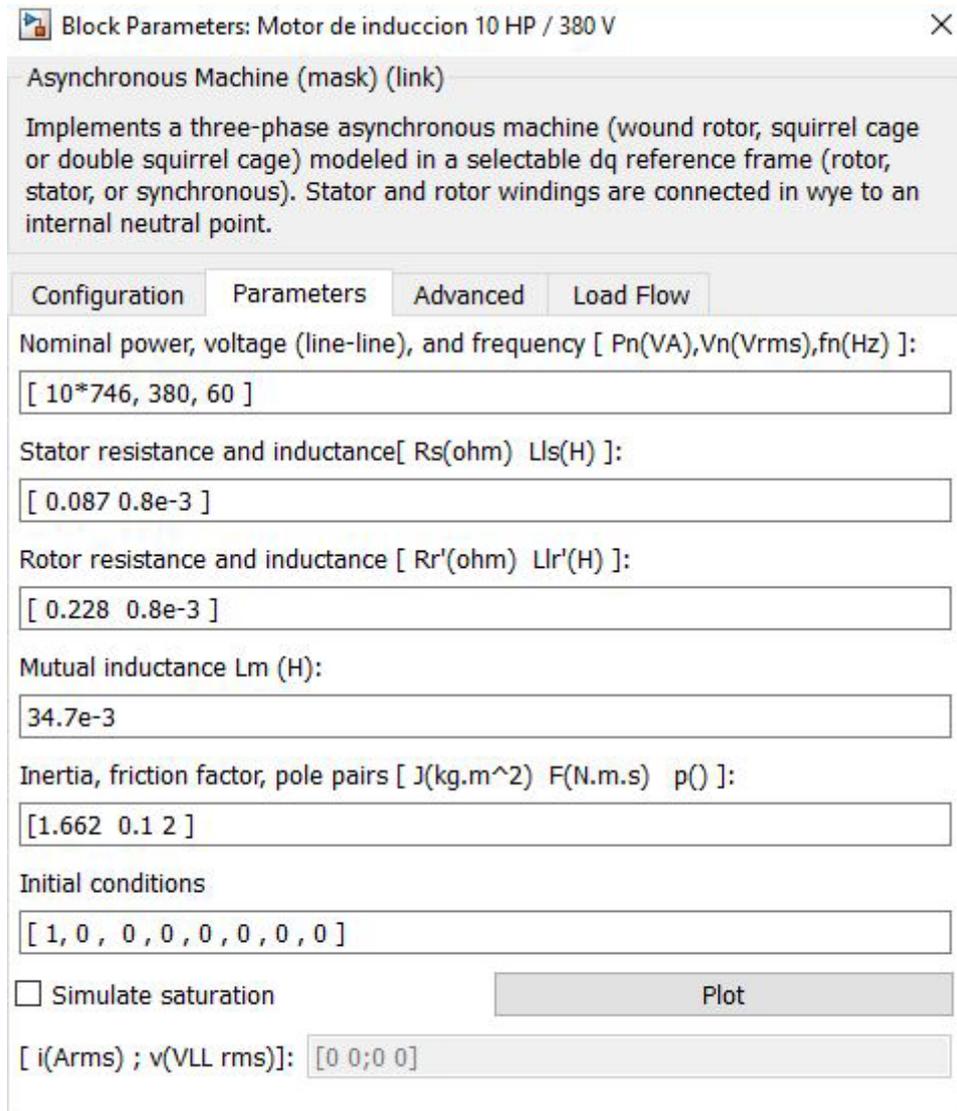


Figura 23. Parámetros del motor de inducción

Tomando en cuenta estas especificaciones, se debe realizar la caracterización de la respuesta de la planta; para esto, en la (Figura 24) se observa el esquema para la simulación del motor en Simulink, en donde se tiene una señal de entrada constante de 100 rad/s que equivale a los 960 rpm del motor trifásico de inducción, previamente calculados, además cuenta con un torque cero, como segundo parámetro.

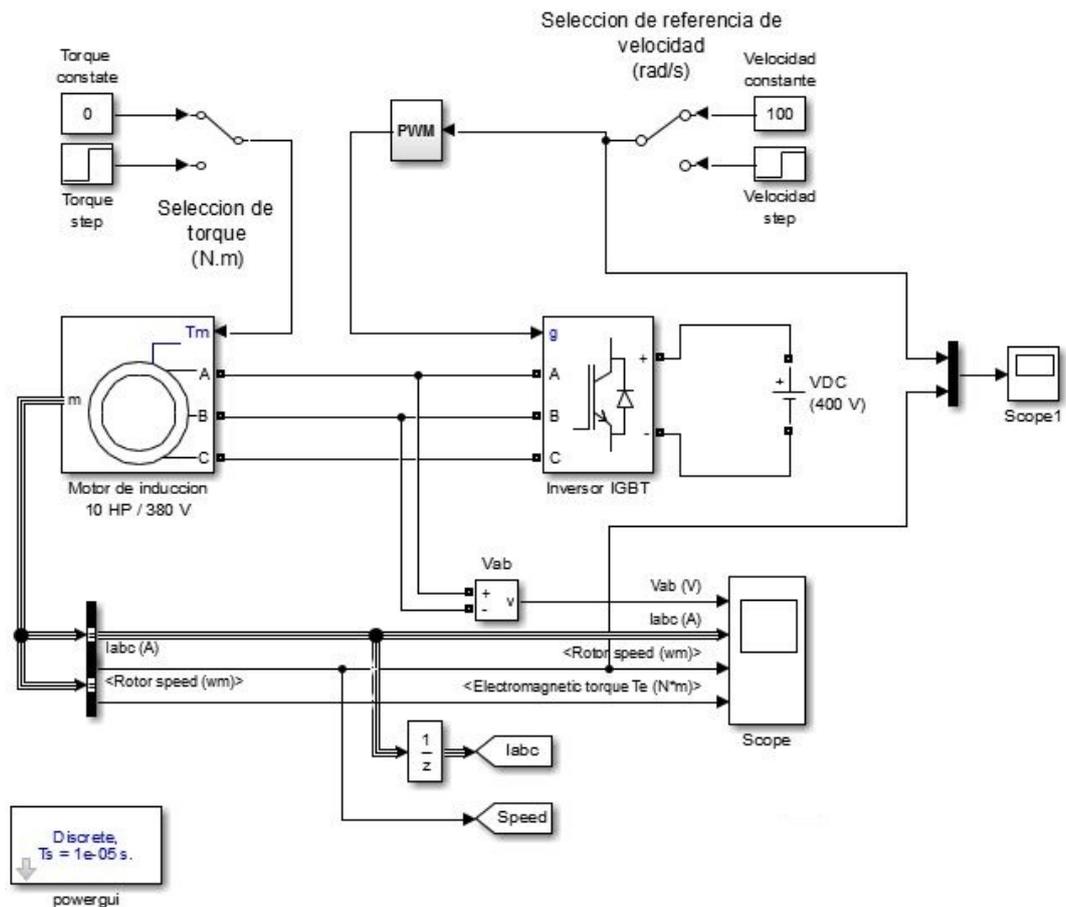


Figura 24. Esquema de simulación de un motor de inducción en Simulink

Con la planta simulada, es posible observar la respuesta del sistema en el Scope 1. Estos datos van a ser útiles ya que con respecto a estos, se va a determinar el comportamiento de la planta, respecto a la señal de entrada. En la (Figura 25) se observan la gráfica de la respuesta obtenida, cuyos datos hacen referencia a las señales de entrada y salida del sistema, estos datos son exportados a Excel por medio de la función xlswrite.

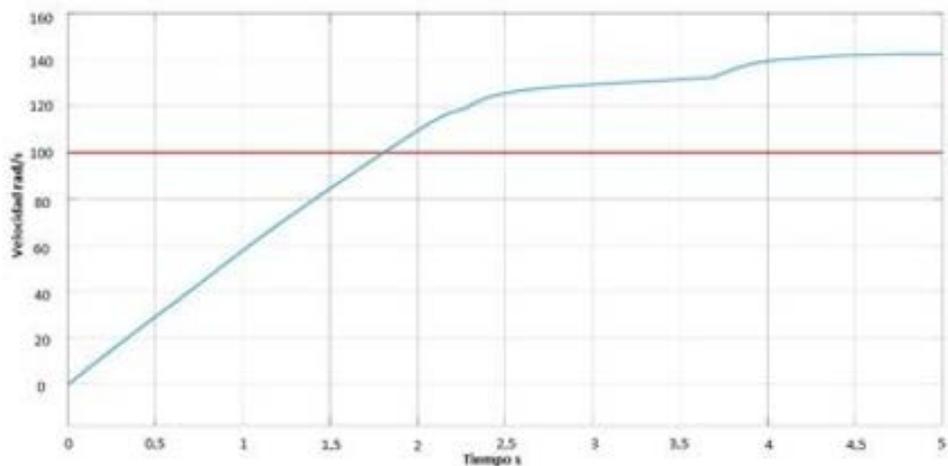


Figura 25. Respuesta del sistema

Donde:

La línea roja es la señal de entrada del sistema.

La línea azul es la salida del sistema.

El siguiente código fue el implementado para exportar los datos de entrada y salida al archivo de Excel.

```
data(:,1)=y.time;  
  
data(:,2)=y.signals(1).values(:,1);  
data(:,3)=y.signals(1).values(:,2);  
  
%vref=data(:,2);  
%vout=data(:,3);  
xlswrite('datosok.xlsx',data,1);
```

Después de realizar todo este proceso, los datos que se exportaron a Excel serán el parámetro principal para la estimación de la planta. Para esto el Toolbox *ident* de MATLAB, permite hallar el modelo más aproximado para cualquier tipo de planta, en este caso un motor de inducción.

En la (Figura 26) se muestra el procedimiento de la importación de los datos de Excel a *ident* en donde se tienen los datos de la entrada y de salida del sistema.

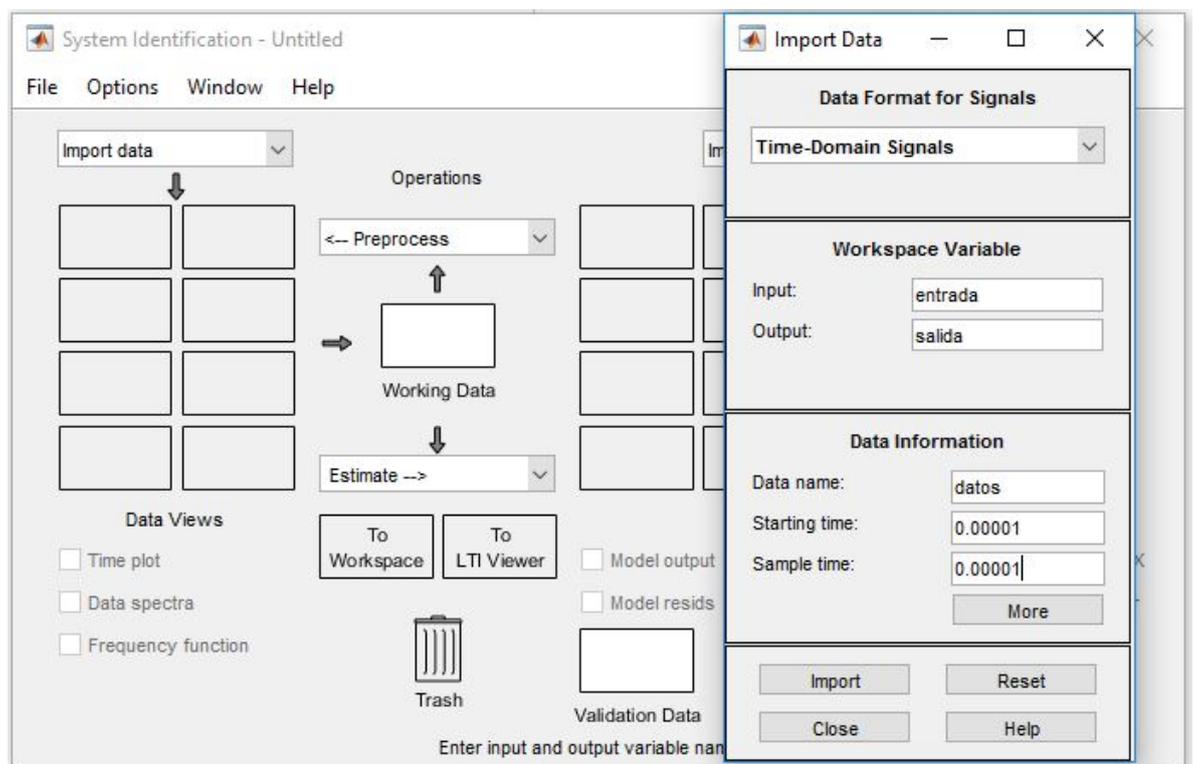


Figura 26. Importación de datos de Excel a *ident*

Con los datos de salida y entrada en *ident*, se procede a escoger el número de polos de la función de transferencia para obtener el modelo más aproximado posible del sistema. En la (Figura 27), se puede observar este proceso.

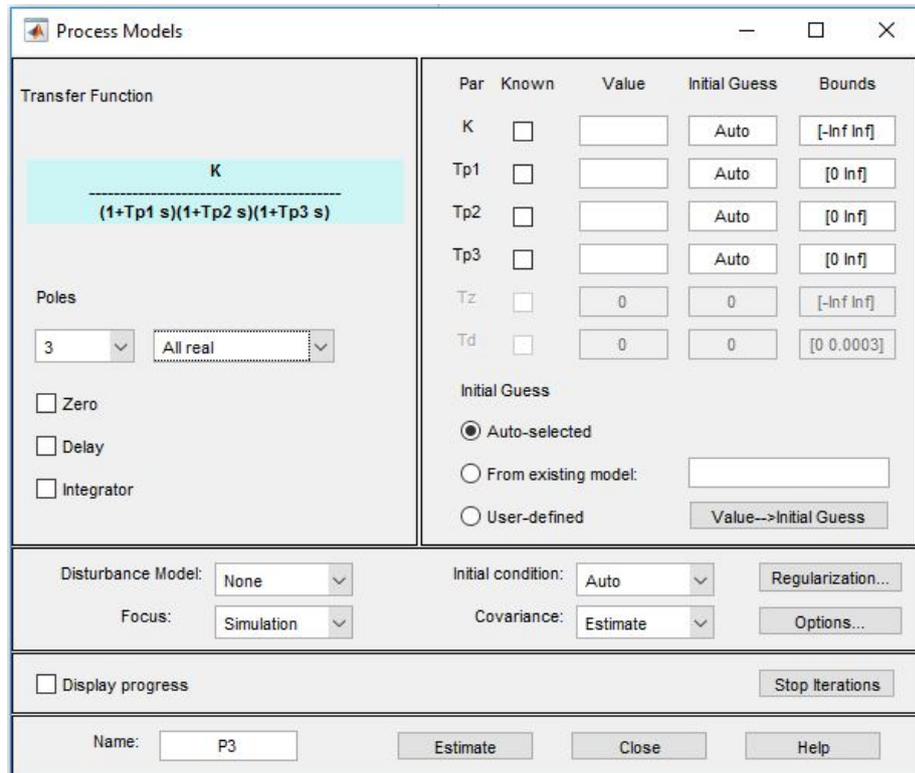


Figura 27. Configuración de los parámetros de *ident*

Como se observa en la (Figura 27) el número polos seleccionado fue 3, ya que *ident* tiene este valor como limitante para para la identificación del modelo de sistema. Sin embargo, el cálculo de número de polos fue 4, esto en base a la ecuación (58), donde el número de pares de polos de inducción trifásica es directamente proporcional a la frecuencia de corriente de la alimentación e inversamente proporcional a la velocidad de sincronización:

$$P = 60 \frac{f}{N} = 60 * \frac{60\text{Hz}}{960\text{RPM}} = 3.75 \approx 4 \quad (58)$$

Donde:

F=Frecuencia en Hz

N= velocidad de sincronización en RPM

P= Numero de pares de polos

Para ver cuánto es el porcentaje de proximidad que tiene la estimación del sistema, se procede a verificar dicho valor seleccionando en el panel principal, en "Import Models" el grafico que corresponda el modelo, en este caso P3 (Figura 28).

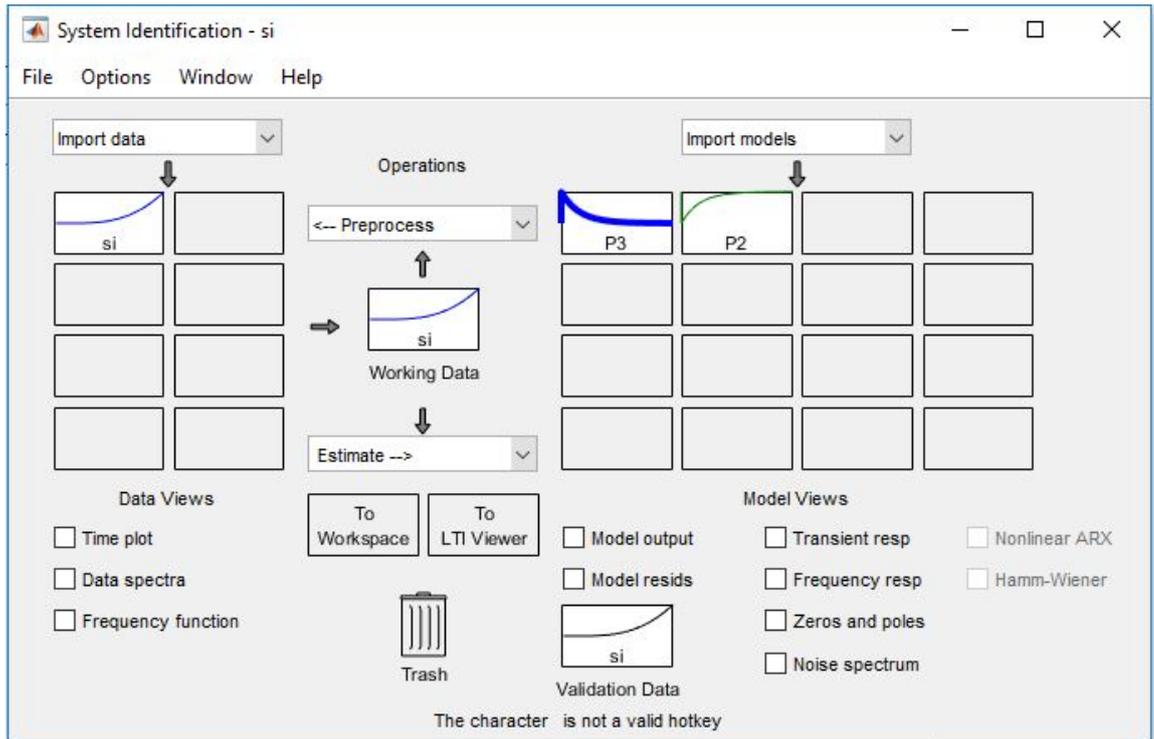


Figura 28. Identificación del modelo por medio de *ident*

Para finalizar, al proceder como previamente se describió, fue posible hallar el modelo más aproximado al real del sistema. En la (Figura 29) se puede observar que el modelo estimado tiene un 92,86% de proximidad al real de la planta, cuya función de transferencia se muestra en la ecuación (59). Esta función de transferencia será la que se va a utilizar para la realización del control PID.

$$G(s) = \frac{2,138}{2,226 * 10^{-9}s^3 + 0,0001722s^2 + 2,839s + 1} \quad (59)$$

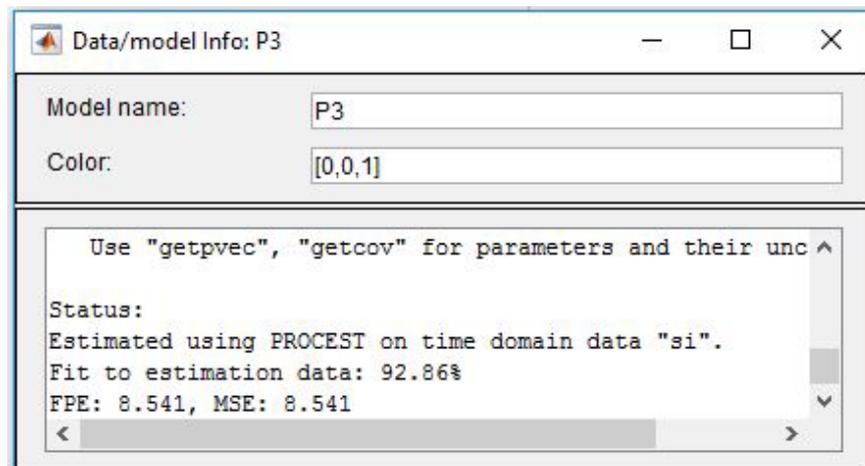


Figura 29. Porcentaje de estimación del modelo de la planta

En la (Figura 30) se observa la respuesta en frecuencia y amplitud del modelo anteriormente hallado.

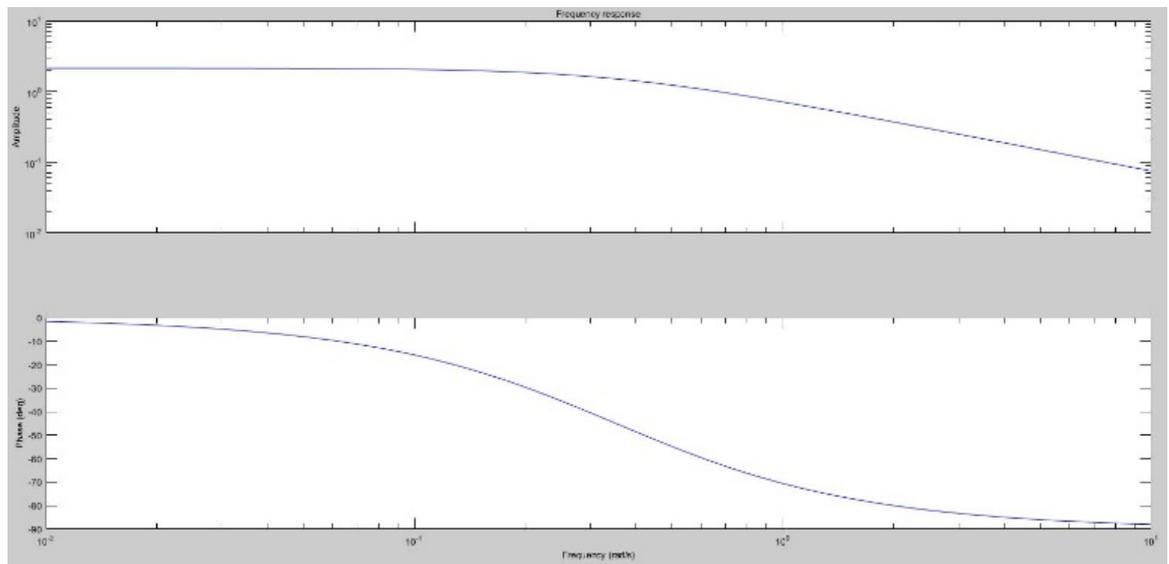


Figura 30. Respuesta en frecuencia y amplitud del modelo de la planta

11. Selección del sistema de detección del usuario

Para realizar la detección del usuario, existen distintas formas de cumplir con este propósito. Para el diseño presente en este documento, se tienen los siguientes sistemas de detección [48]:

- Detección por medio de sensores tipo láser (Figura 31), el cual cuando se interrumpe su haz de luz, podrá saberse el momento en que el usuario va a usar la escalera mecánica.



Figura 31. Detección del usuario por medio de sensores fotoeléctricos de laser

- Detección por sensor de presión (Figura 32), el cual detectara la presencia del usuario al momento que este entra al campo de operación del sensor y hay un aumento en la presión.



Figura 32. Detección del usuario por medio de sensores de presión

Tomando en cuenta estos dos sistemas de detección es pertinente decir, que ambos sistemas son eficaces para realizar el trabajo, sin embargo, al implementar los sensores laser, la estructura se va a modificar en cuanto a su diseño. Por esta razón la detección con sensores de presión, resulta ser el sistema más ideal ya que las características de diseño de la estructura no van a presentar una gran modificación.

12. Diseño del control de velocidad

El control propuesto se representa en el diagrama de bloques de la (Figura 33), donde se puede observar cada etapa del control. Al inicio con una alimentación trifásica, seguida de una rectificación de onda completa para obtener niveles DC de la señal; luego esta pasa por una etapa de inversión controlada para obtener de nuevo una señal trifásica con la capacidad de variar su frecuencia. Esta señal alimenta el motor de inducción en el cual hay dos sensores (uno de velocidad y otro de corriente), los cuales basados en sus lecturas, permitirá al control realizar la acción de generar la señal PWM de seis pulsos para activar los MOSFETS, los cuales permitirán que la frecuencia de la señal generada varíe y de esta forma lograr controlar la velocidad del motor trifásico.

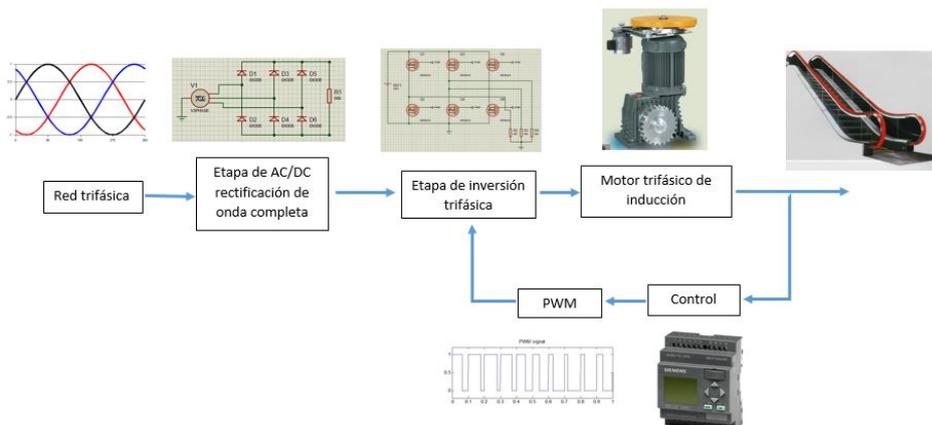


Figura 33. Diagrama de bloques del proceso de control

12.1. Etapa de acondicionamiento de la señal trifásica

Para lograr controlar la velocidad de un motor trifásico de inducción es necesario de dos etapas de acondicionamiento de la señal trifásica [43]. La primera es la rectificación de onda completa trifásica no controlada para obtener una señal DC, en seguida una etapa de inversión trifásica controlada por medio de seis señales PWM. Estas señales PWM, generadas por un control PID, son las que permiten variar la frecuencia manteniendo constante el voltaje, pero teniendo un cambio también en la corriente proporcional al de la frecuencia. Estas reformas tienen como consecuencia la modificación de la velocidad del motor.

Inicialmente, en la (Figura 34) se muestra el circuito de rectificación trifásica de onda completa no controlado implementado en Proteus®, el cual cuenta con seis diodos rectificadores y un filtro pasivo, el cual se diseñó para acondicionar la salida de señal obtenida.

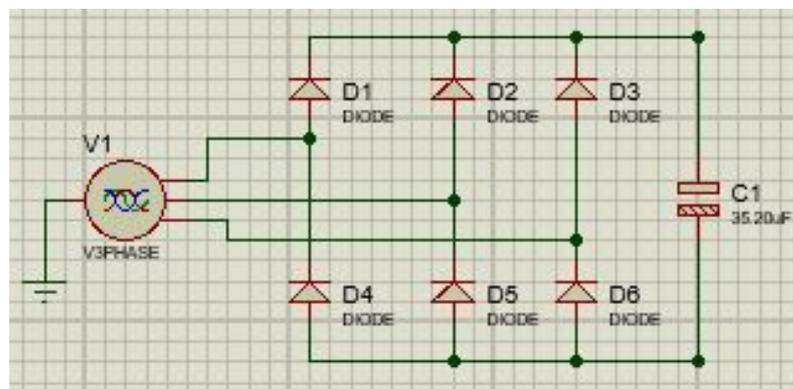


Figura 34. Rectificador trifásico de onda completa no controlado en proteus®

El cálculo del filtro se observa a continuación:

Frecuencia de onda de salida del rectificador ecuación (60), donde se tiene en cuenta las 6 señales PWM:

$$6 * 60 \text{ Hz} = 360 \text{ Hz} \quad (60)$$

Duración ciclo de trabajo:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{60 \text{ Hz}} = 16,1 \text{ ms} \quad (61)$$

Tiempo de encendido de cada par de diodos:

D1 - D5

$$\frac{\pi}{6} * \frac{180^\circ}{\pi} * \frac{16,6 \text{ ms}}{360^\circ} = 1,38 \text{ ms} \quad (62)$$

D1 - D6

$$\frac{\pi}{2} * \frac{180^\circ}{\pi} * \frac{16,6 \text{ ms}}{360^\circ} = 4,15 \text{ ms} \quad (63)$$

D2 - D6

$$\frac{5\pi}{6} * \frac{180^\circ}{\pi} * \frac{16,6 \text{ ms}}{360^\circ} = 6,91 \text{ ms} \quad (64)$$

D2 - D4

$$\frac{7\pi}{6} * \frac{180^\circ}{\pi} * \frac{16,6 \text{ ms}}{360^\circ} = 9,68 \text{ ms} \quad (65)$$

D3 - D4

$$\frac{9\pi}{6} * \frac{180^\circ}{\pi} * \frac{16,6 \text{ ms}}{360^\circ} = 12,45 \text{ ms} \quad (66)$$

D3 - D5

$$\frac{11\pi}{6} * \frac{180^\circ}{\pi} * \frac{16,6 \text{ ms}}{360^\circ} = 15,21 \text{ ms} \quad (67)$$

La salida del rectificador proporciona un voltaje de corriente directa pulsante, por lo que se debe filtrar para reducir el rizado. Para filtrar la salida del rectificador se utilizó un filtro capacitivo. Sin embargo, debido a que la carga es inductiva, en este caso un motor de inducción, la potencia que tiene el sistema es reactiva, De tal manera que el sistema del inversor deberá manejar dicha potencia. Este proceso será realizado por el filtro capacitivo, que además reduce el rizado del voltaje de CD.

$$V = 220 \text{ V}$$

$$P = 7,5 \text{ kW}$$

$$F.P.=0,81$$

$$I = 16,21 A$$

El desfase en tiempo se obtiene del factor de potencia en la carga, partiendo de:

Para un $\cos(\varphi) = 0,81$ factor de potencia, donde φ es el ángulo entre la potencia activa P y el valor absoluto de la aparente S.

$$\cos(\varphi) = 0,81 \quad (68)$$

$$\varphi = \cos^{-1}(0,81) = 35,90^\circ \quad (69)$$

Teniendo en cuenta que un ciclo completo de 60 Hertzios tiene un periodo de 16.667 ms, se tiene que:

$$\begin{array}{ccc} 360^\circ & \longrightarrow & 16,6 \text{ ms} \\ 35,90^\circ & \longrightarrow & X \end{array}$$

$$X = \frac{35,90^\circ * 16,6 \text{ ms}}{360^\circ} = 1,655 \text{ ms} \quad (70)$$

Luego el área bajo la curva que relaciona el voltaje y la corriente en la carga, puede calcularse como:

$$A = \frac{\text{corriente} * \text{tiempo de operacion}}{2} = \frac{16,21 A * 1,655 \text{ ms}}{2} = 0,013414 \quad (71)$$

Pero el área bajo la curva de la gráfica voltaje vs corriente en la carga representa la corriente en la carga misma, entonces

$$Q = 13,414 \times 10^{-3} \text{ coulombs}$$

Se sabe que además la capacitancia se define como:

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{13,414 \times 10^{-3}}{220 V * \sqrt{3}} = 35,20 \text{ uF} \quad (72)$$

En la (Figura 35) se observa básicamente el mismo circuito diseñado en Proteus. Sin embargo la implementación de este circuito en SIMULINK®, simplifica la visualización del mismo, además al realizarse en un software más robusto, va a presentar mejores resultados al momento de la simulación:

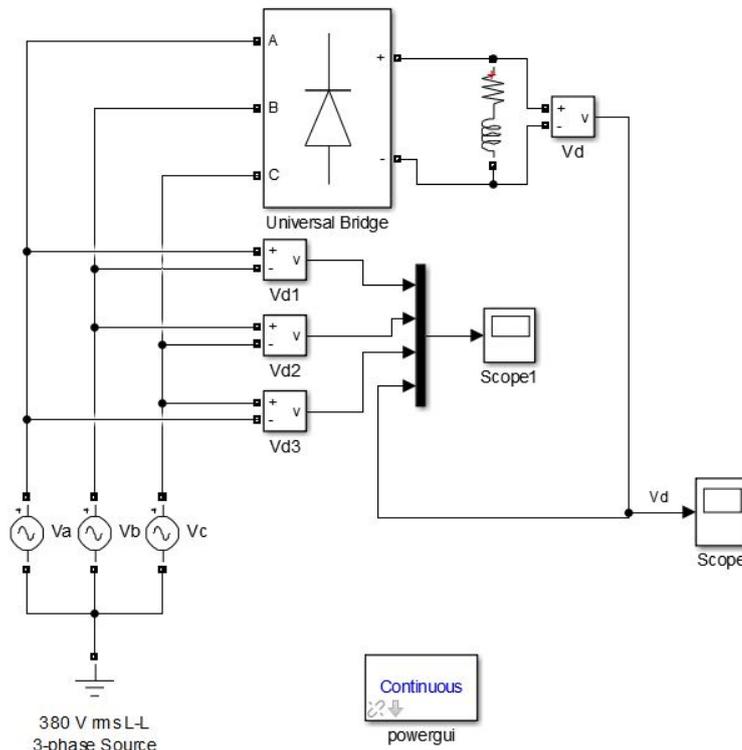


Figura 35. Rectificador trifásico de onda completa no controlado en simulink

De acuerdo a lo anterior, En la (Figura 36) se observa gráficamente la respuesta de la rectificación de onda completa trifásica representada por la señal de color verde con un voltaje de 380 Vrms.

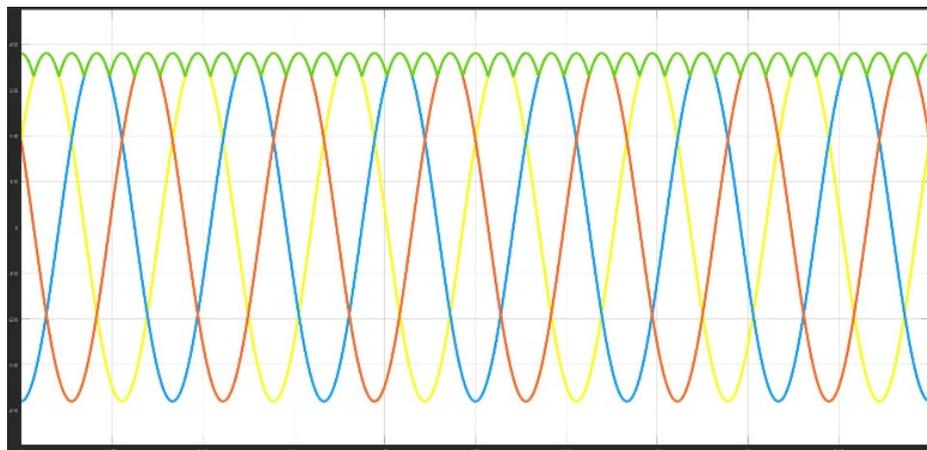


Figura 36. Respuesta de la etapa de rectificación

Después de obtener el voltaje DC, se procede al diseño de la etapa del inversor trifásico. En esta etapa se realizó un circuito que cuenta con seis transistores MOSFET en puente, los cuales contarán con señales PWM que permitirá controlar cada dispositivo. La configuración desarrollada se puede observar en la (Figura 37).

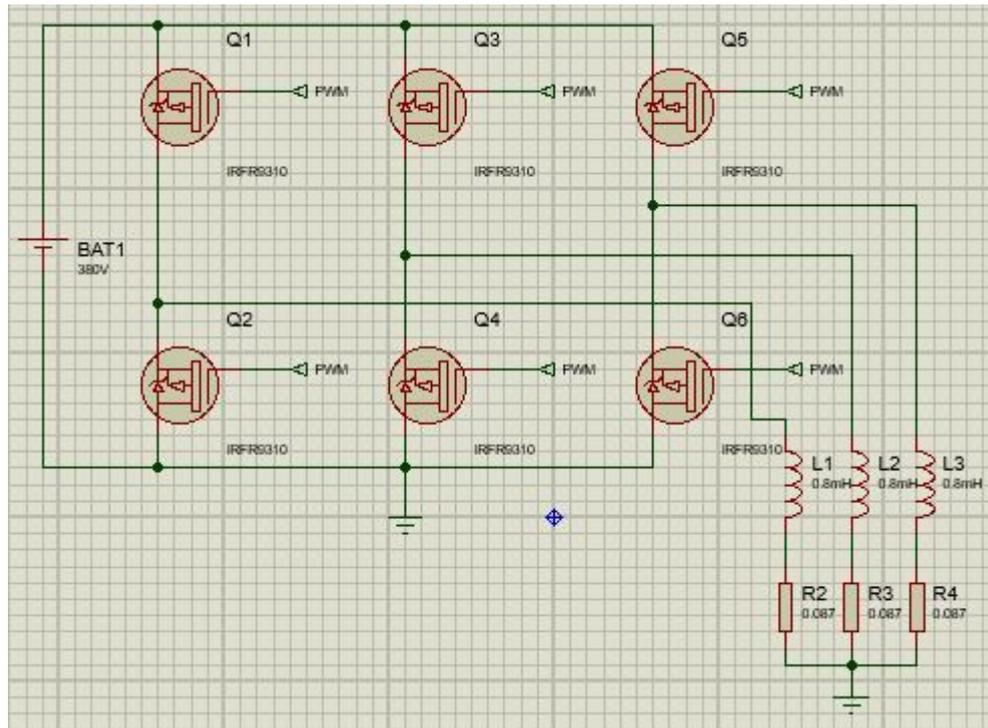


Figura 37. Inversor trifásico controlado en proteus®

Para la simulación de las dos etapas en conjunto que se, descritas anteriormente, se optó por utilizar el software simulink para dicho propósito. Esta simulación tiene como característica principal la implementación de un PWM, el cual fue generado a partir del producto de dos señales distintas: una con un valor constante que representa el índice de modulación, y la otra es una señal trifásica senoidal, y cuya configuración se presenta en la (Figura 38).

Parameters	
Sine type:	Time based
Time (t):	Use simulation time
Amplitude:	1
Bias:	0
Frequency (rad/sec):	$2 \cdot \pi \cdot 60$
Phase (rad):	$[0 \ -2 \cdot \pi / 3 \ 2 \cdot \pi / 3]$
Sample time:	$2e-6$
<input checked="" type="checkbox"/> Interpret vector parameters as 1-D	

Figura 38. Configuración de las señales del generador PWM

En la (Figura 39) muestra la implementación del circuito en Simulink, en donde se observa la configuración del circuito, el cual cuenta con el rectificador de onda

12.2. Diseño del control análogo y discreto en MATLAB®

MATLAB brinda herramientas que son útiles para la realización de distintos tipos de control (tanto discreto como análogo), básicamente para cualquier tipo de sistema. Es por esto, que haciendo uso de las herramientas que presenta este software se realizó un control para el motor inductivo, en base a la función de transferencia previamente presentada (ecuación (59)).

Con base a esto, en MATLAB existe el sistema autotuning en el bloque PID, el cual resulta de bastante utilidad, ya que ayudar al diseñador a determinar de manera relativamente sencilla las constantes K_p , K_i y K_d para el control de la planta. En la (Figura 41), se muestra la configuración que se realizó de un sistema de lazo cerrado, de tal manera que con el uso de autotuning se pudiese determinar las constantes del control del sistema.

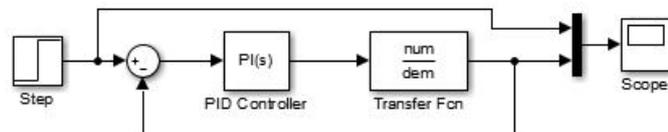


Figura 41. Diagrama de bloques del control análogo

A partir de determinar el error de estado estacionario de la planta, sabiendo de antemano que el sistema es tipo cero, se halló el error de estado estacionario para la planta a partir de:

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{(1 + 2,8394s)(1 + 1,8665 \times 10^{-5}s)(1 + 4,1995 \times 10^{-5}s)}{(1 + 2,8394s)(1 + 1,8665 \times 10^{-5}s)(1 + 4,1995 \times 10^{-5}s) + 2,1368} \left(\frac{1}{s}\right) \quad (73)$$

$$e_{ss} = \frac{1}{1 + 2,1368} = 0,3188 \approx 31,88\%$$

Puesto que en la planta existe un error en estado estacionario, se hace necesario reducirlo al máximo. Por lo cual, la implementación de un control PI, permitirá gracias a su acción integradora, dar un polo adicional al sistema, que reducirá el valor de dicho error.

Para implementar el autotuning del bloque PID, se deberá seleccionar el tipo de control, que como se mencionó anteriormente, para un motor inductivo deberá ser de tipo PI. Después de definido esto, se sintoniza dicho bloque, con lo cual se podrá determinar los valores de las constantes K_p y K_i para el control análogo: (Figura 42).

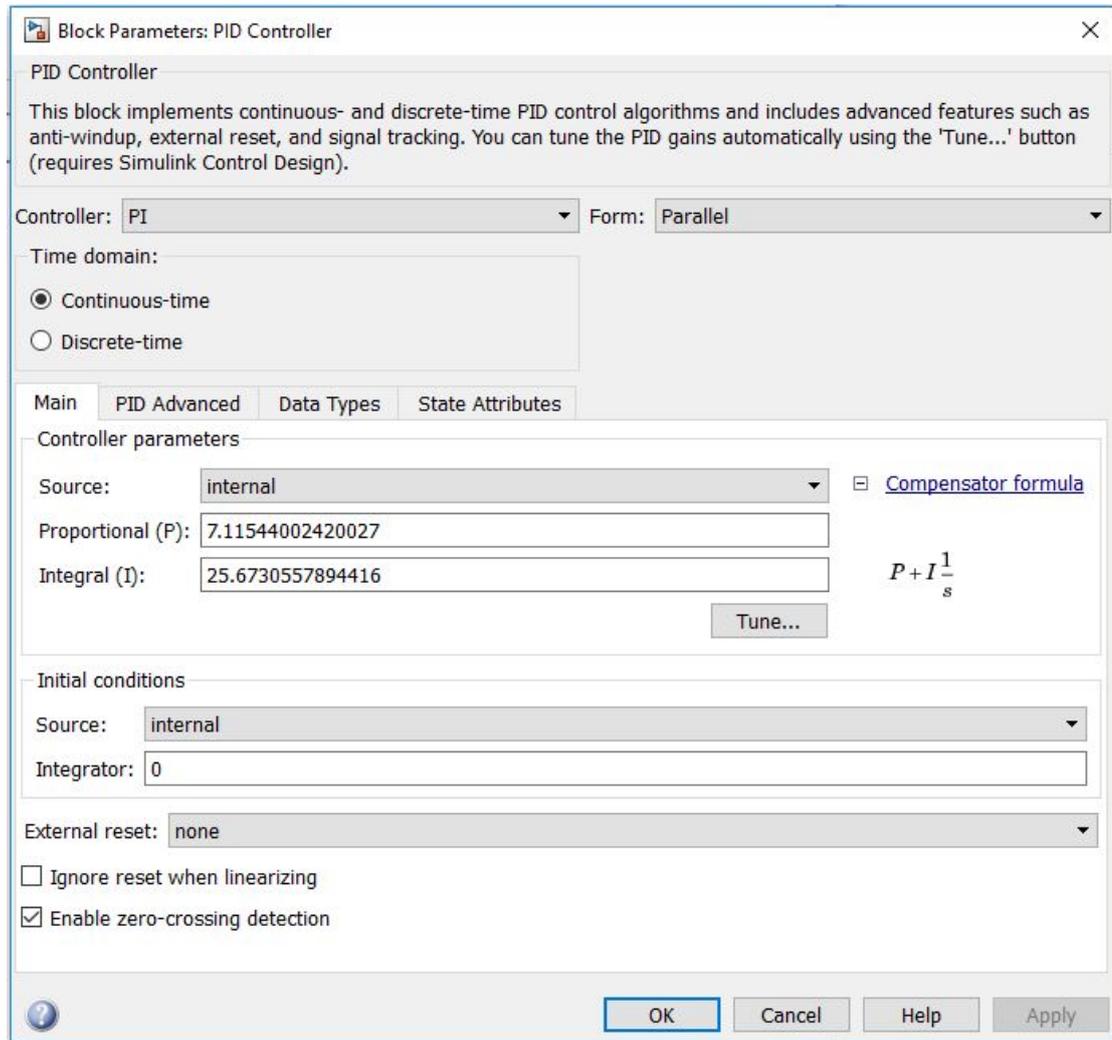


Figura 42. Constantes del control PI análogo medio de autotuning

Los valores de las constantes K_P y K_I son:

$$K_P=7,11544002420027$$

$$K_I=25.6730557894416$$

Teniendo estos valores definidos, al proceder con la simulación del sistema completo (control PI análogo y función de transferencia), en la (Figura 43) se puede observar la respuesta del control con respecto a la entrada escalón de la planta, en donde la respuesta del sistema presenta una reducción del error en estado estacionario en comparación con la planta sin control de la (Figura 30), por lo cual el control diseñado cumple con el propósito de reducir dicho error, de tal forma que se obtiene un mejor comportamiento de la planta.

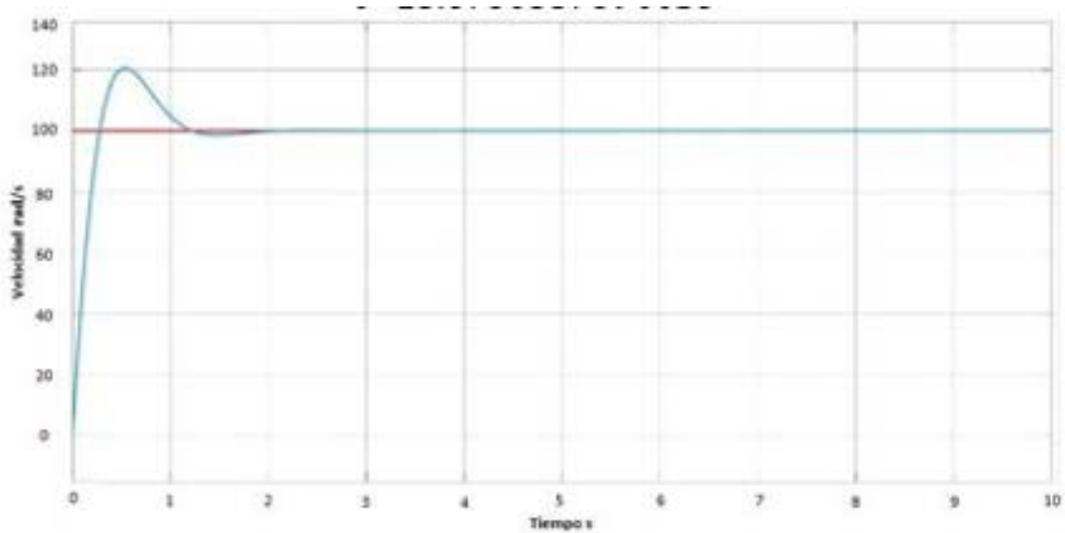


Figura 43. Respuesta del control análogo

Si bien el control análogo presenta un funcionamiento adecuado, es necesario diseñar un control discreto para la misma planta, puesto que se desea implementar en algún dispositivo programable, y esta señal de control debe tener un tiempo de muestreo para que opere en este tipo de elementos. El tiempo de muestreo viene definido a partir del criterio de Nyquist, que garantizara la reconstrucción de la señal [44]:

$$f_n = 2f \quad (74)$$

Donde:

f_n = frecuencia de muestreo

f = frecuencia señal a muestrear

De la misma manera que con el análogo, para el diseño del control discreto se va a implementar el autotuning del bloque PID (z). En este caso la configuración para la sintonización será la siguiente (Figura 44):

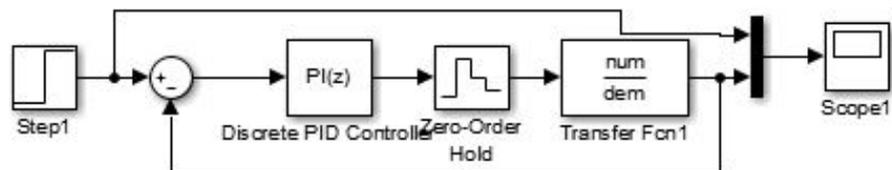


Figura 44. Diagrama de bloques del control discreto

Dentro del bloque PID(z), en base a las características de diseño del control, se debe tener en cuenta cual el tipo de control a diseñar y el método para calcular al mismo. De igual manera que en el análogo, el control a diseñar será un PI, teniendo en cuenta las características que tiene la parte integral para reducir el error de estado estable.

En cuanto al método para hallar el control discreto, se implementara el método de Tustin, el cual es el mejor método que dará una mayor estabilidad al control frente a los métodos de Euler en adelanto y Euler en atraso [45], además se dará un tiempo de muestreo de $ts=10\mu s$. En la (Figura 45) se puede observar, las especificaciones dadas para la sintonización del control:

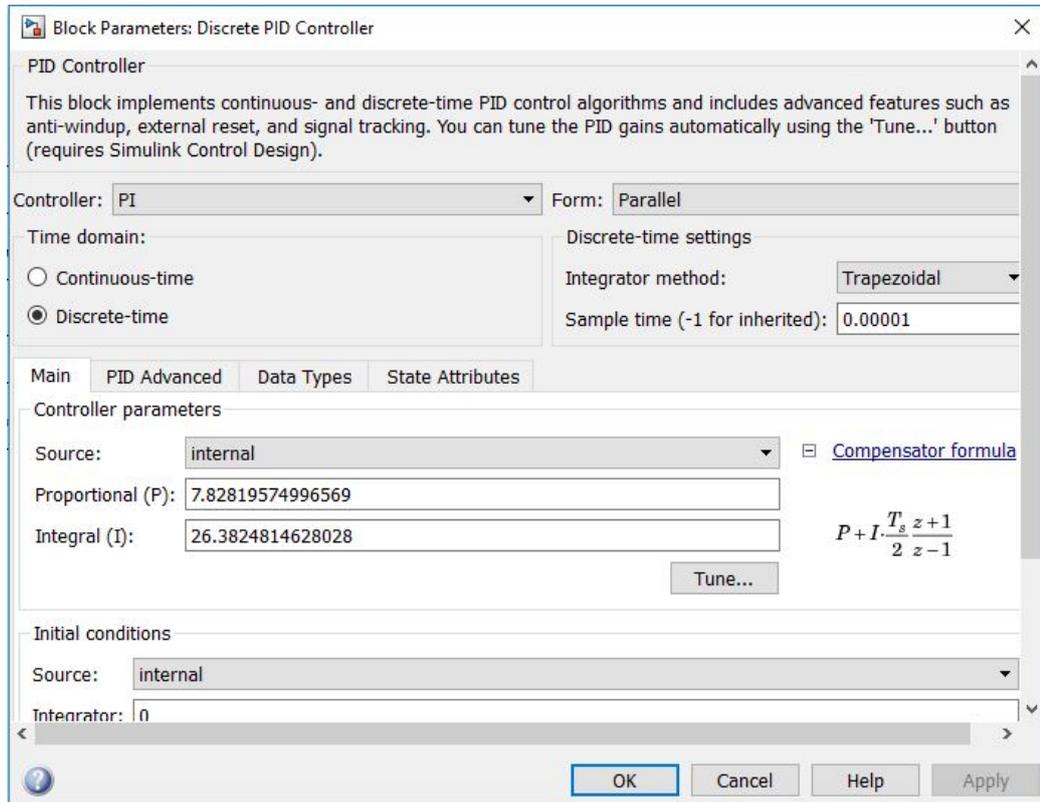


Figura 45. Constantes del control PI discreto por medio de autotuning

Los valores de las constantes KP y KI discretos son:

$$KP=7,82819574996569$$

$$KI=26,3824814628028$$

Conociendo los valores de Ki y Kp , se realiza la simulación del sistema, donde se observa que el funcionamiento del control es el esperado al comparar su salida, con la señal de entrada tipo escalón (Figura 46), cuyo tiempo de establecimiento es de 2s.

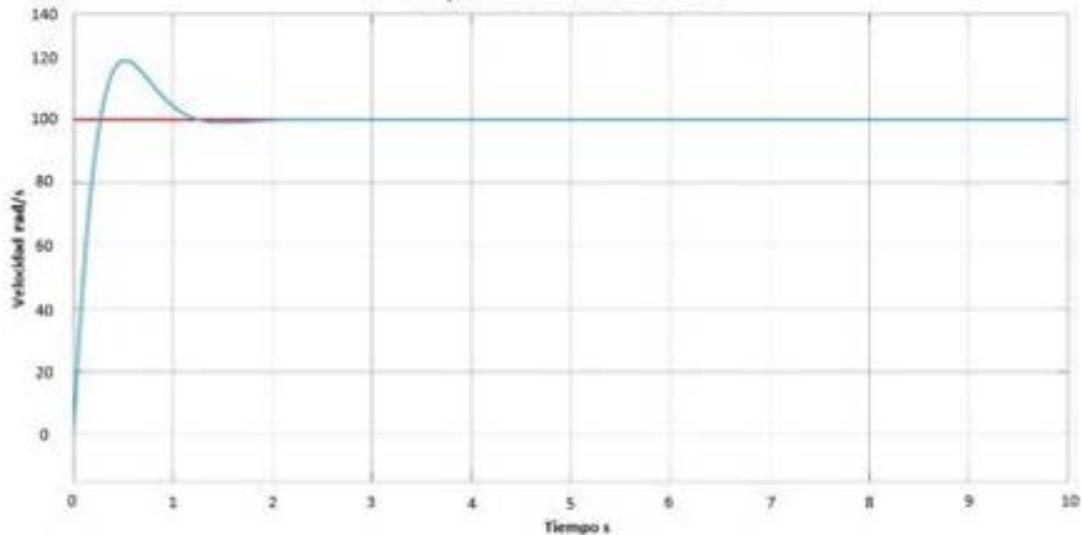


Figura 46. Respuesta del control discreto

13. Resultados y Discusión

13.1. Análisis de los escalones

A partir de todos los parámetros establecidos para el análisis mecánico de la escalera, a continuación, se va a presentar los resultados obtenidos por medio del análisis de elementos finitos realizado en SOLIDWORKS®. Inicialmente se va a presentar el análisis del factor de seguridad; los resultados se pueden observar en la (Figura 47), (Figura 48):

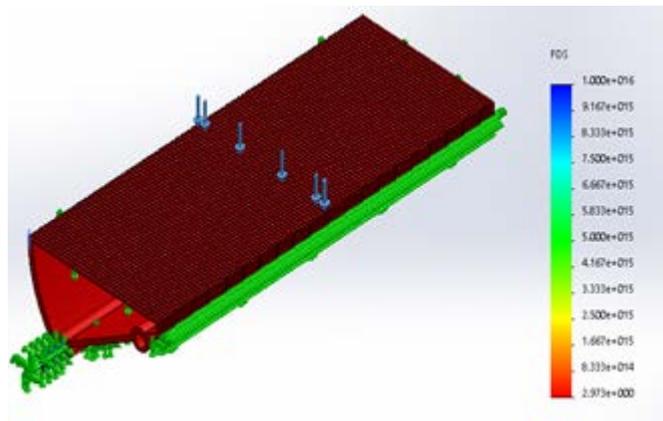


Figura 47. Factor de seguridad Shindler

Como se puede observar en la ecuación (4), la variación del factor de seguridad depende de la carga aplicada. Por esta razón al tener un diseño estándar, si se aplica una carga, como la que utiliza Schindler® en su control de calidad, el factor de seguridad apenas cumple con la condición mínima del valor de factor de seguridad (2.993) presente en la norma ASME A17.1-2013.

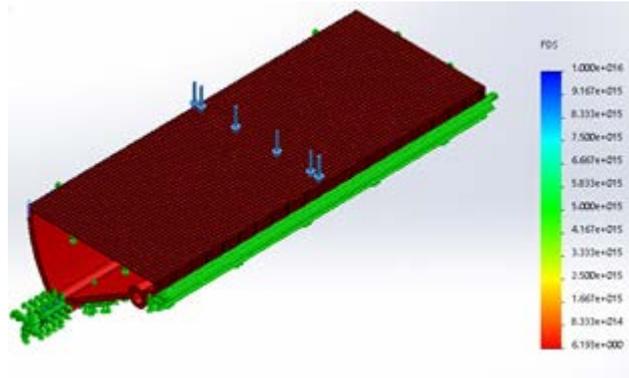


Figura 48. Factor de seguridad ASME

En cambio, al aplicar una carga como la que especifica la norma ASME, el factor de seguridad es mayor que la obtenida con la carga que aplica Schindler® (6.193), obteniendo con la carga de la norma ASME, un factor de seguridad mayor al doble del obtenido Schindler®.

Teniendo en cuenta los resultados, es viable decir que el factor de seguridad con ambos ensayos, cumple con lo establecido en la norma ASME A17.1-2013 que especifica un factor de seguridad mínimo de 3. Otra característica física que se debe analizar y que brinda información importante acerca del comportamiento del escalón, es el estudio de deformación unitaria.

Este análisis permitirá observar la rigidez que tiene la pieza al aplicarle una carga axial, ya que se podrá observar en qué lugar la pieza tiene mayor riesgo de sufrir una deformación plástica [35] o en el peor de los casos una ruptura. De la misma manera que el factor de seguridad, se realizó un análisis en elementos finitos en SOLIDWORKS® donde se pudo observar las deformaciones de la pieza a partir de las condiciones de carga que se dan en las pruebas de Schindler y de ASME, conociendo de antemano que:

$L = L_0 = \text{longitud cuerpo inicial}$

$L_f = \text{longitud cuerpo final}$

$$\Delta L = L_f - L_0 \quad (75)$$

$$\text{Deformación} = \varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (76)$$

A partir de la ecuación de deformación unitaria (ecuación (76)), SOLIDWORKS® toma las características del material y las especificaciones geométricas de la pieza para realizar dicho análisis. En la (Figura 49), se observa, que la deformación unitaria máxima que tiene el escalón al aplicar la carga que especifica la norma ASME, da como resultado una deformación de 8,285e-005,

que observando de manera detallada en el diagrama de color el máximo valor de deformación unitaria será justamente donde es aplicada la carga.

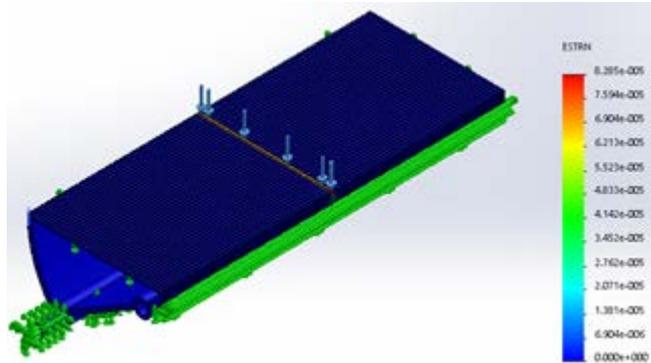


Figura 49. Deformación unitaria ASME

Si se aplica la carga que especifica Schindler® (Figura 50), la deformación unitaria máxima será relativamente mayor ($1,726e-004$), pero, aunque la deformación no se va a notar a simple vista, gracias a este análisis se pudo verificar que efectivamente, el escalón tiene una mayor deformación unitaria que con la de la norma ASME. Sin embargo, vale la pena aclarar, que, a pesar de tener ciertas variaciones en los valores de los ensayos, en ambos casos cumple con el factor de seguridad especificado en la norma, por lo cual teóricamente, es viable utilizar este diseño de peldaño en una escalera de Schindler®, cumpliendo la condición mínima del factor de seguridad que establece la norma.

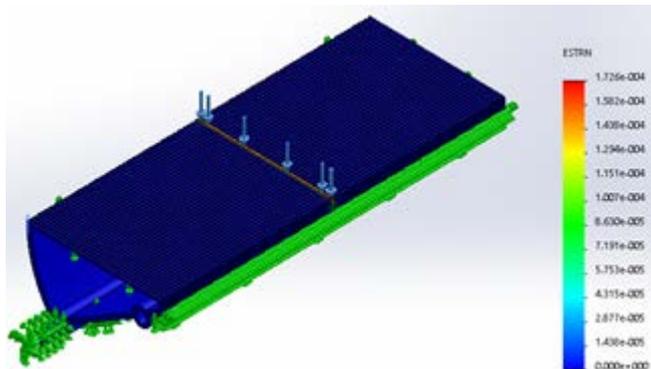


Figura 50. Deformación unitaria Shindler®

Como se mencionó anteriormente, en muchas ocasiones resulta más rigurosos los análisis físicos que hacen los fabricantes a la estructura, que los que se encuentran en la normativa, y una de las razones puede ser, que los fabricantes deben ser más precavidos para construir las piezas de la escalera mecánica ya que si no se toman las medidas necesarias, las consecuencias de un accidente de un usuario en la estructura pueden llegar a ser fatales.

Uno de los factores que afecta en mayor medida las condiciones de funcionamiento de una estructura, es el material con que están construidas sus piezas, ya que dependiendo de este se va a tener ciertas consecuencias a la hora de fabricar la estructura como tal [34], como por ejemplo el peso de la estructura o el factor seguridad, esto solo por nombrar algunos de sus efectos. Sin embargo, la condición que afecta tanto al fabricante como al consumidor, es el costo monetario que puede llegar a alcanzar la estructura si no se elige de manera correcta el material a utilizar, ya que debido a que la construcción de escaleras mecánicas no deja de ser un negocio, ofrecer la mejor calidad al mejor precio resulta el ideal para la industria.

Referente a lo anterior, para el análisis que se muestra en este documento, no se tuvo en cuenta el factor monetario que afecta la elección del material durante la construcción de las piezas, pero si se tuvo en cuenta las especificaciones mínimas que debe presentar los materiales según sean las normas de construcción de escaleras mecánicas, además de que se facilita el trabajo de diseño de las piezas ya que ocasionalmente los fabricante muestran de antemano el material con que se construyen las piezas, en cuyo caso, se utilizó el material que hace referencia el fabricante para el desarrollo de la pieza.

13.2. Análisis estático de las pistas

Si bien el valor calculado de la carga total en la escalera es de 29400 Nm, en busca de realizar un análisis de mayor calidad, se tomó como parámetro, una carga de 58800 Nm, que equivale al doble del calculado. Este valor permitió llevar al límite las características mecánicas de la estructura, ya que como se verá más adelante, el factor de seguridad, es cercano al presentado por la norma ASME. Esta carga total aplicada, fue distribuida en las pistas donde se encuentran apoyados los escalones, de tal manera que hubiera un cierto equilibrio de carga en la estructura distribuida en toda esta, teniendo como resultado (Figura 51):

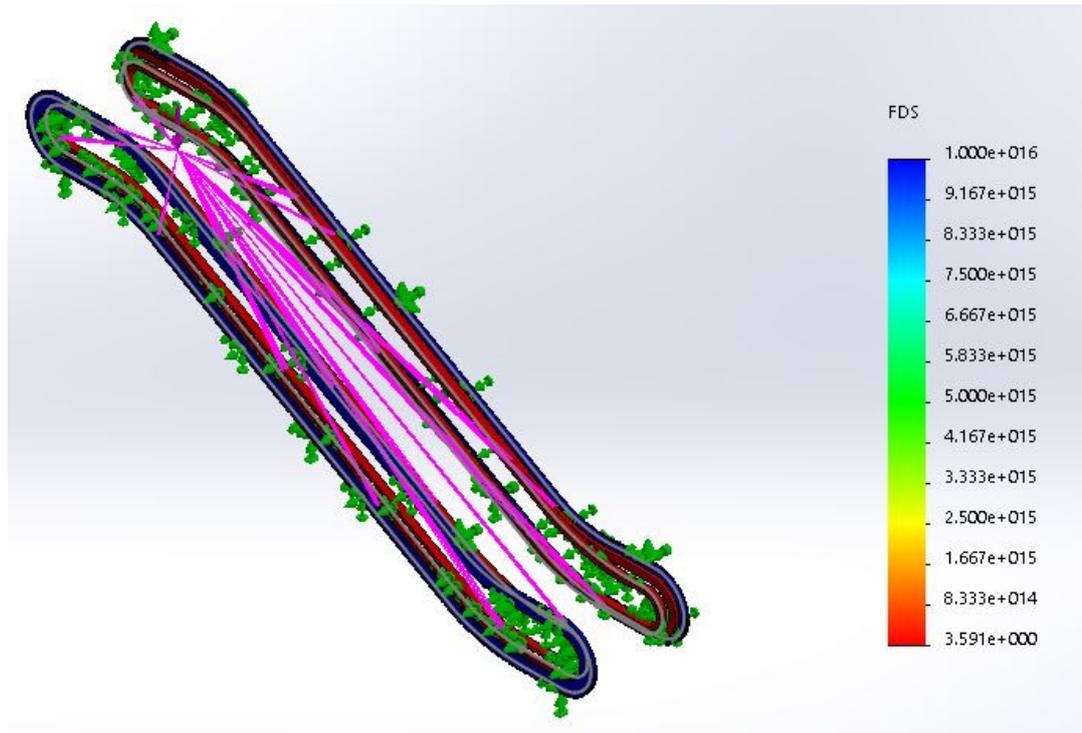


Figura 51. Factor de seguridad de la pista totalmente cargada

Por medio del análisis estático se halló el factor de seguridad usando Von Mises, obteniendo un factor de seguridad de 3,5, que es un valor cercano al que se establece en la norma como parámetro.

De la misma manera que con los escalones, en las pruebas que se le realizó a la pista, se incluyó un análisis de deformación unitaria, para que de esta manera se pudiera observar de forma detallada los puntos en donde la pieza podría ser más afectada. Tomando en cuenta esto, se realizó el análisis por elementos finitos en SOLIDWORKS®, cuyos resultados se pueden observar en la siguiente (Figura 52):

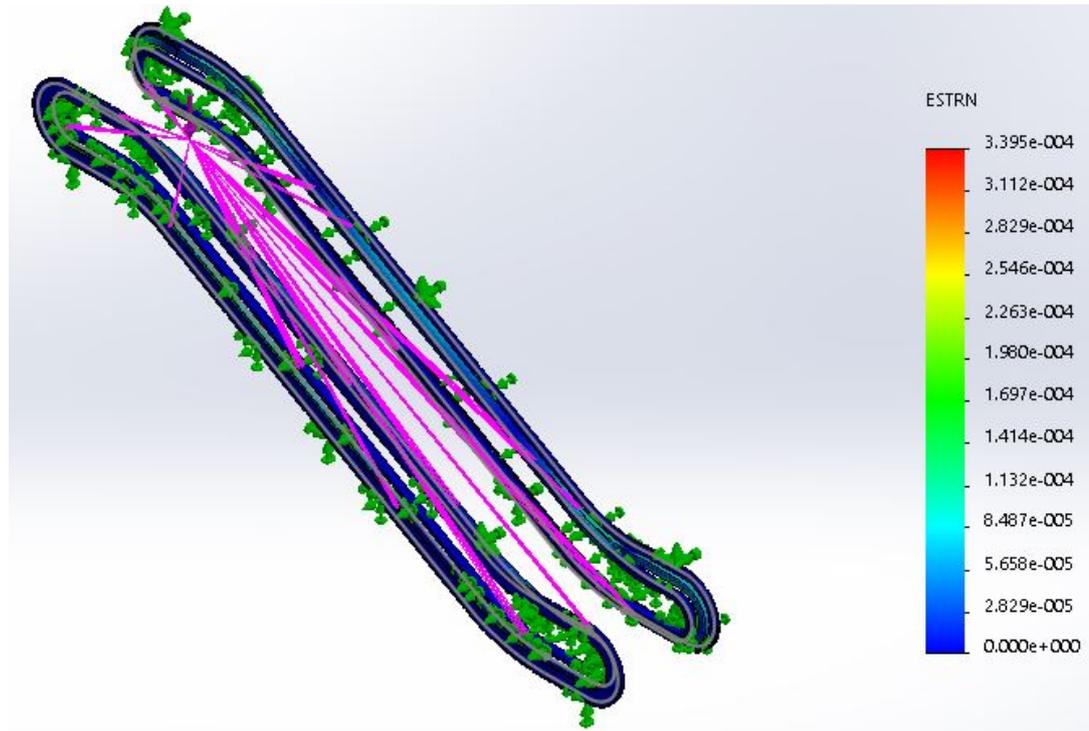


Figura 52. Deformación unitaria de la pista totalmente cargada

Aplicando la misma carga que en el análisis de factor de seguridad, que hace referencia a la estructura totalmente cargada, el análisis de deformación unitaria da como resultado $3,395e-004$, siendo un valor mínimo de cambio de la estructura. De tal manera que el diseño cumple con las condiciones dadas en la normativa, y es viable para su construcción.

14. Ensamble escalera mecánica

Como herramienta final que se usó en este análisis para verificar la viabilidad del diseño expuesto, se realizó un ensamble con todas piezas diseñadas que componen la estructura de la escalera mecánica. Referente a esto, este ensamble se realizó principalmente con las piezas previamente analizadas, pero, además, como componente adicional se implementó la cadena que une los peldaños de la escalera mecánica y que permite el movimiento de la misma. En este caso, para la construcción de la cadena de unión de los peldaños, se tomó como base el diseño que utiliza Schindler® en el desarrollo de la cadena (Figura 58), tomando a cabalidad todas las características referentes a la geometría y materiales que Schindler utiliza para su construcción (Figura 54) [46].

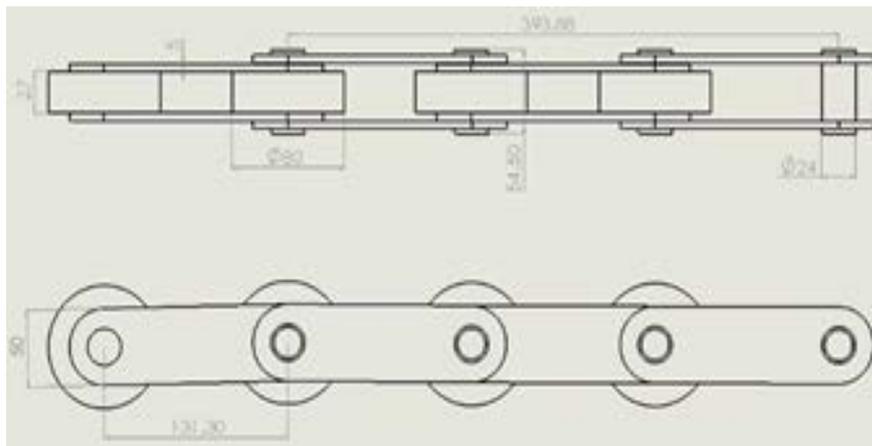


Figura 53. Dimensiones de la cadena de escalones

Paso (P)	131.33 mm
Diámetro de la rueda (d1)	80 mm
Diámetro del pin (d2)	24 mm
Longitud del pin (L)	54,5 mm
Distancia entre centros (Le)	394 mm

Tabla 8. Dimensiones de la cadena de escalones

Fuente: ASME A17.1-2013

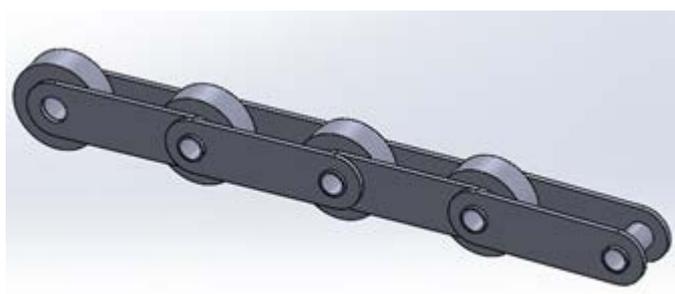


Figura 54. Ensamblaje de una sección de cadena de escalones

Teniendo en cuenta lo anterior, en la (Figura 55) se encuentra la escalera totalmente ensamblada con todos los componentes, definido además todas sus características físicas y de seguridad, cumpliendo con lo que establece la norma que rige la construcción de estas estructuras.



Figura 55. Ensamblaje final de una escalera mecánica

Para realizar el análisis ideal de una estructura compuesta por muchas piezas, como es el caso de la escalera mecánica, existen diversas formas de cumplir dicho objetivo. Sin embargo, vale la pena aclarar que algunos de estos análisis son algo costosos [33] y son realizados casi que exclusivamente por los fabricantes de la escalera. Es a partir de esto que realizar un análisis por medio de un software CAD, que cuente con las herramientas necesarias para verificar las características de la estructura, resulta ser la solución más viable para un estudio de este tipo. Para el caso específico presentado en este documento, el desarrollo total de la estructura se realizó en SOLIDWORKS®, ya que este cuenta con todas las herramientas necesarias para realizar un análisis adecuado a la estructura.

Si bien todas las piezas fueron diseñadas en base a lo que realizan los fabricantes, en el caso del escalón, el diseño se basó casi exclusivamente en las especificaciones técnicas dadas en la normativa internacional. Pero dada la importancia del escalón dentro del funcionamiento del sistema, y teniendo en cuenta que el diseño realizado en este análisis tomó a colación ciertas condiciones de construcción de distintos fabricantes, el escalón se debió acomodar a estas sin descartar en ningún momento las normas, ya que son en esencia condiciones que brindan una mayor seguridad para los usuarios.

Es por esto que conocer la respuesta de la escalera mecánica cuando es sometida a ciertas condiciones físicas, permite conocer de mejor manera la fiabilidad de este tipo de estructuras. En la (Tabla 9) se puede ver de forma resumida el comportamiento de la estructura a partir de los resultados obtenidos en el análisis expuesto en la (Figura 51) y (Figura 52).

	ASME	SCHINDLER
Material	Aleación aluminio-silicio (Al Si 6063-O).	Aleación aluminio-silicio (Al Si 6063-O).
Carga axial	12 kN	25 kN
Deformación unitaria	8,285e-005	1,726e-004
Factor de seguridad	6,193	3

Tabla 9. Análisis de resultados del análisis estático del escalón según ASME A17.1-2013 y Schindler ®

En la (Tabla 9), se ven de manera concreta los datos máximos (deformación unitaria), y mínimos (factor de seguridad) que permiten identificar de manera clara, cuál es el comportamiento de la estructura a partir de unas condiciones dadas. Como ya fue mencionado, una de las características que se logra observar, es el cumplimiento de la norma en lo referente al factor de seguridad para un mismo diseño de escalón, basado en la geometría que se encuentra en la norma ASME, aplicando dos cargas axiales diferentes, dadas tanto por la norma, como por parte de un fabricante (Schindler®). Sin embargo, es necesario aclarar, que, dependiendo de la carga, el factor de seguridad va a variar, y es por esta razón que cuando se usa la condición de Schindler®, el factor de seguridad, está al límite de la especificación de la norma.

	Cálculos mecánicos
Material	AISI 1020
Carga axial	29400 N
Deformación unitaria	3,395e-004
Factor de seguridad	3,5

Tabla 10. Análisis de resultados del análisis estático de la pista totalmente cargada

En la (Tabla 10), se puede observar el comportamiento de las pistas que van a soportar a los escalones. En este caso las condiciones que se tuvieron en cuenta, estuvieron basados en los cálculos físicos realizados para una escalera

que está totalmente cargada. Esto permite verificar, de igual manera que en los peldaños, el factor de seguridad, es un valor mayor al especificado en la norma ASME. Esto permite corroborar la fiabilidad de esta estructura, para el uso de las personas.

15. Comprobación de ahorro de energía

Con base al diseño de control obtenido, se realizó la simulación del motor inductivo implementando el control discreto hallado (Figura 56), sabiendo además que la funcionalidad del sistema viene definido por las características que previamente fueron definidas para la operación del motor (torque=0 y 960 rpm). Se tiene entonces que:

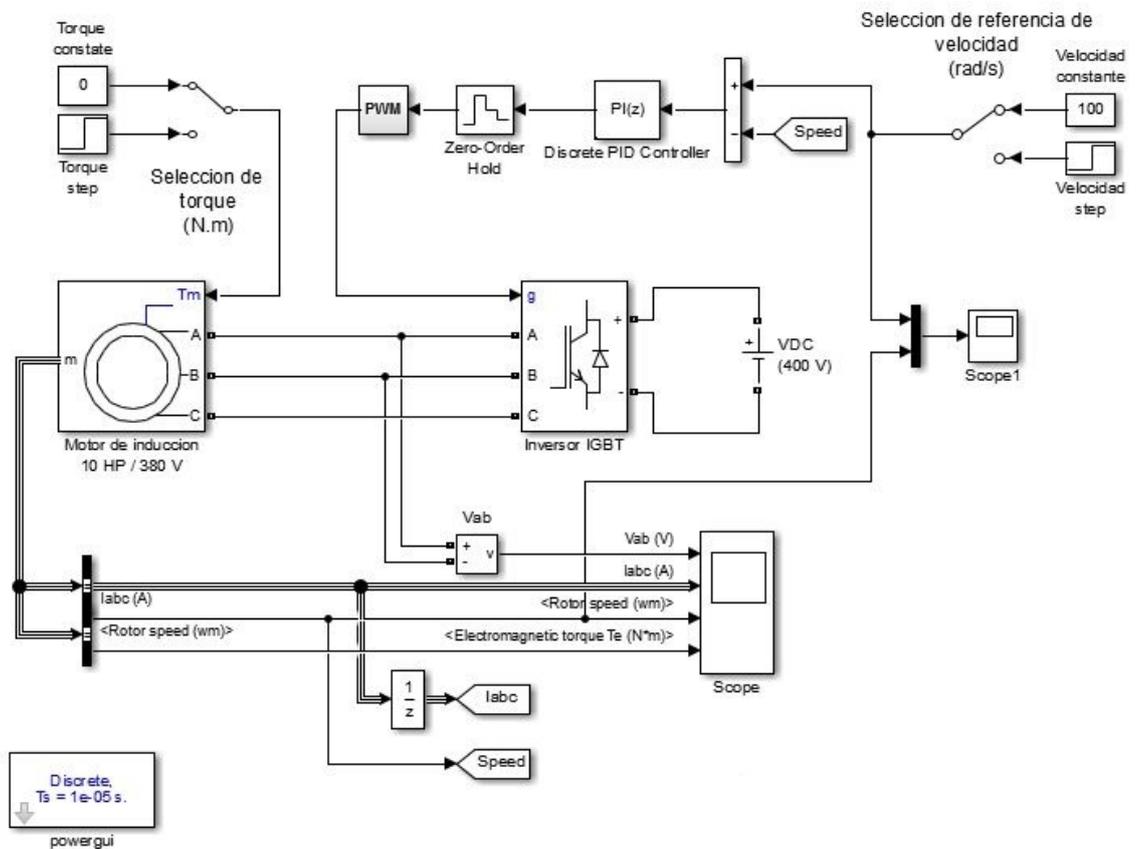


Figura 56. Simulación del sistema con el control PI

Al observar la respuesta de la planta con el control (Figura 57), se observa que efectivamente el funcionamiento de este es el adecuado, ya que se obtiene una respuesta similar a la obtenida con la función de transferencia de la planta, por lo cual, en la respuesta del sistema se tuvo una reducción del error de estado estacionario, con un tiempo de establecimiento de la planta de aproximadamente 2.2 segundos.

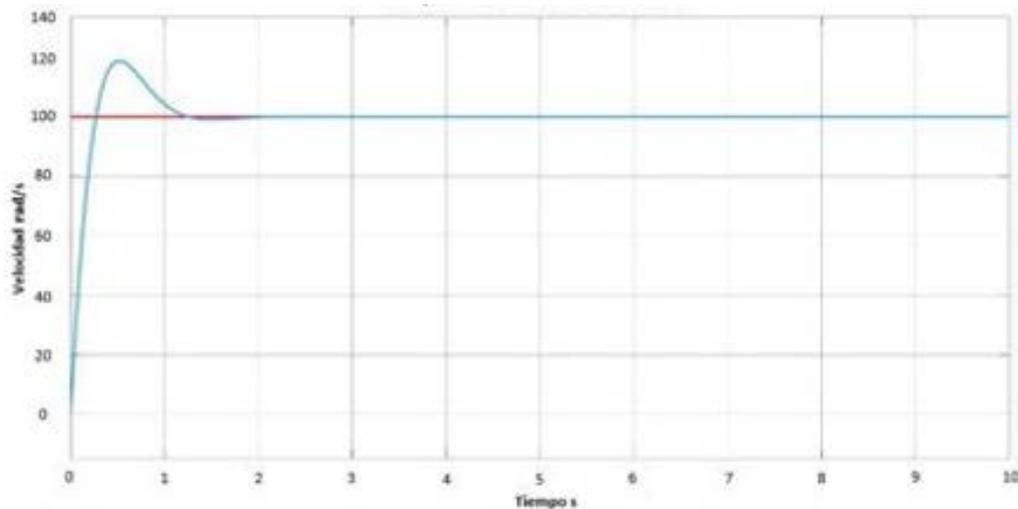


Figura 57. Respuesta de la planta con el control PI

Teniendo en cuenta el funcionamiento del control con la planta, se debe verificar que el sistema realice el trabajo esperado y que con el control propuesto se puede obtener un ahorro significativo en el consumo de energía eléctrica en la puesta en marcha de la escalera mecánica.

Para poder corroborar que efectivamente se cumple con el propósito, se diseñaron tres distintas señales de entrada que representan tres configuraciones distintas de funcionamiento del motor (Tabla 11), donde:

- Primero, velocidad constante de operación para la escalera mecánica de 0,5 m/s.
- Segundo, rampa que representa a la estructura cuando se encuentra en operación a una velocidad inicial de 0.1 m/s, que aumenta a una velocidad constante de 0,5 m/s, al ser detectado un usuario, y que retorna al valor de velocidad inicial al terminar con el proceso de transportar del usuario.
- Tercero, rampa de velocidad donde la escalera mecánica se encuentra en total reposo (0 m/s), hasta detectar un usuario y entrar en operación a una velocidad constante de 0,5 m/s, y retorna al valor a su condición de reposo al terminar con el proceso de transporte del usuario

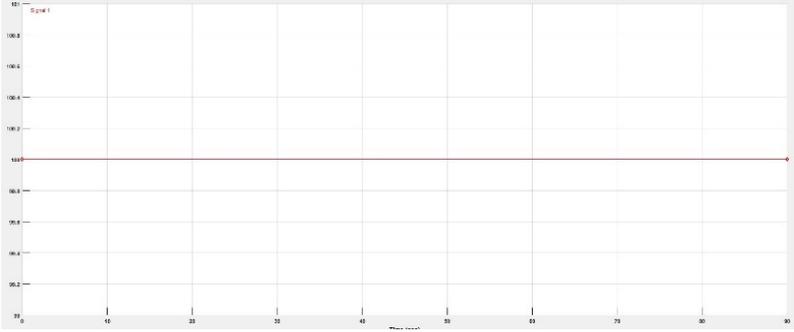
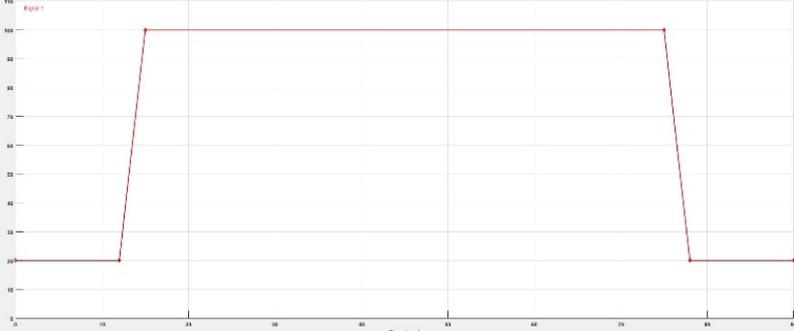
	GRAFICA
<p>Velocidad constante de 0,5m/s</p>	 <p>The graph shows a constant velocity profile. The y-axis represents velocity in m/s, ranging from 0 to 100. The x-axis represents time in seconds, ranging from 0 to 90. A horizontal red line is plotted at a constant value of 0.5 m/s.</p>
<p>Velocidad inicial de 0,1 m/s</p>	 <p>The graph shows a velocity profile that starts at 0.1 m/s, rises linearly to 100 m/s at approximately 15 seconds, remains constant at 100 m/s until approximately 85 seconds, and then falls linearly back to 0.1 m/s.</p>
<p>Velocidad inicial de 0,0 m/s</p>	 <p>The graph shows a velocity profile that starts at 0.0 m/s, rises linearly to 100 m/s at approximately 15 seconds, remains constant at 100 m/s until approximately 85 seconds, and then falls linearly back to 0.0 m/s.</p>

Tabla 11. Perfiles de velocidad

A partir de estas configuraciones de entrada, se realizó la implementación en la configuración total del sistema (Figura 58), cuya simulación fue realizada en Simulink, donde además de las velocidades de operación del motor, se tiene en cuenta el torque máximo calculado ($74.60Nm$), y un tiempo de simulación de 90 segundos, que es suficiente para observar los cambios que se producen en lo referente al consumo de energía eléctrica del motor

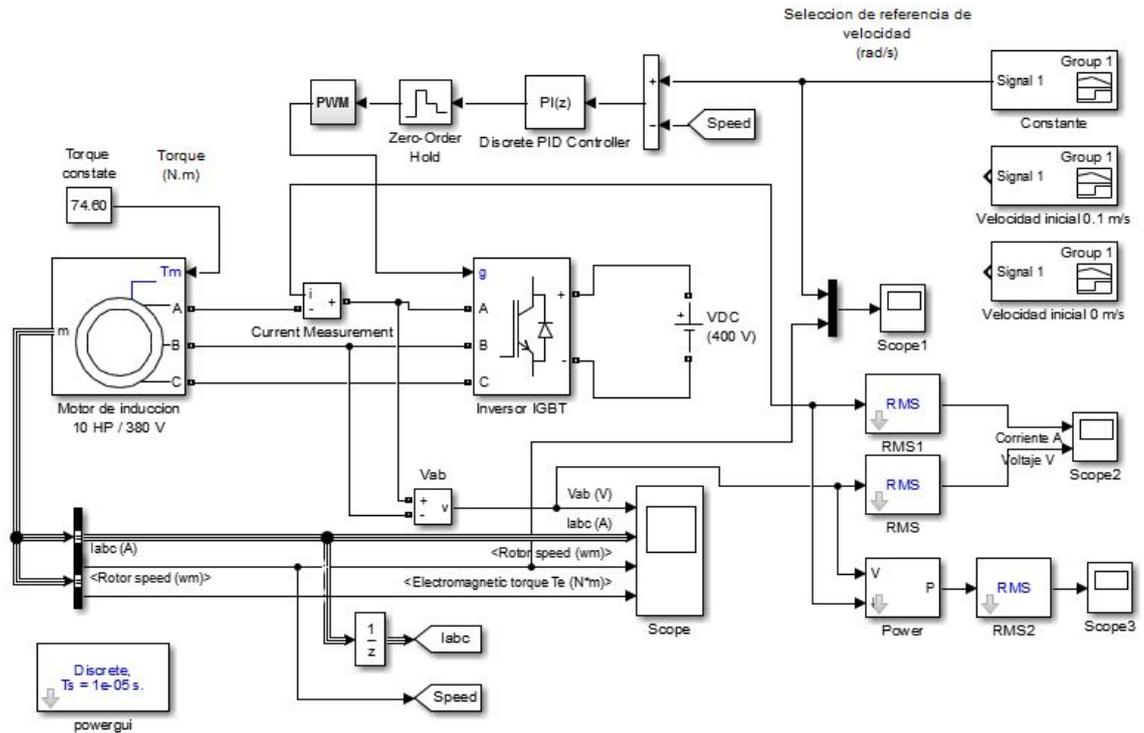


Figura 58. Sistema con las tres configuraciones de entrada

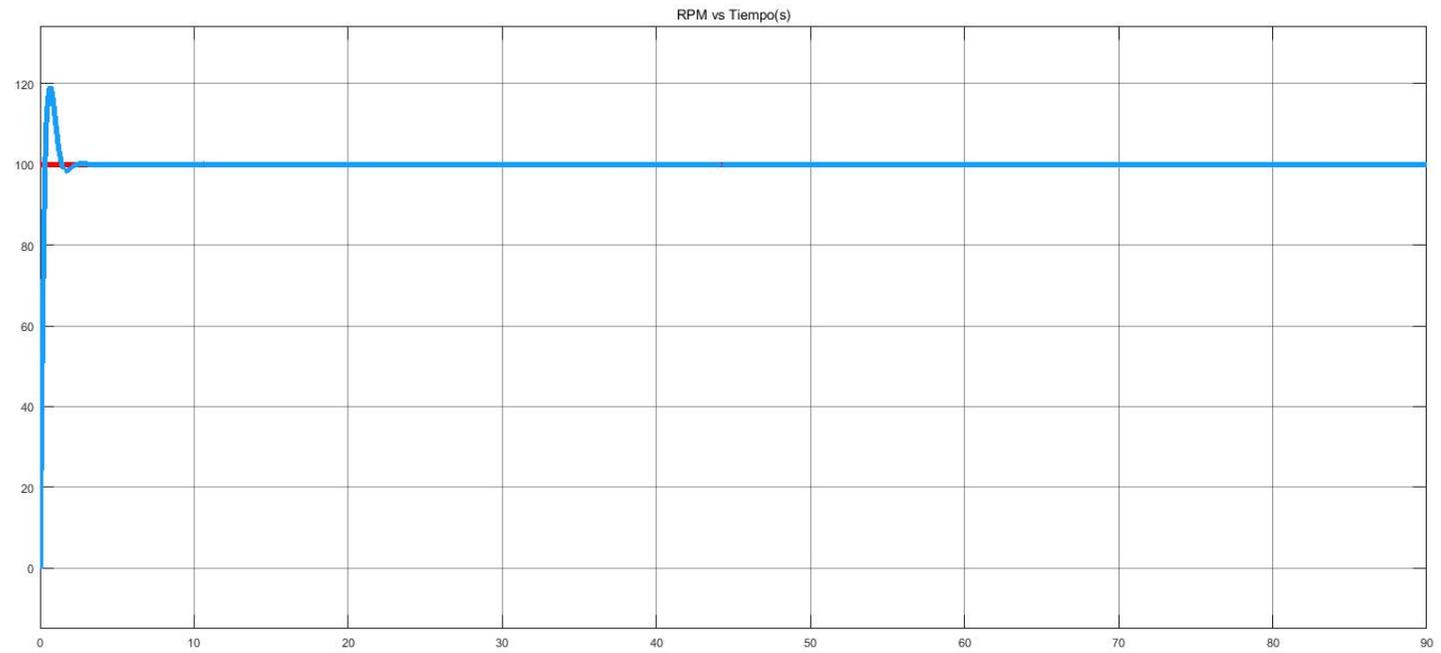
Al realizar la simulación del sistema completo, las características de respuesta del control, debe tener ciertas características similares al control del motor de inducción con parámetros estándar de funcionamiento (véase sección 12.2). Sin embargo, puesto que las condiciones de funcionamiento van a cambiar de acuerdo al tipo de entrada que se tenga, la respuesta del control también va a tender a variar, principalmente en el sobre impulso inicial de la respuesta.

Dicha variación, no afecta de forma trascendental la influencia del control en el sistema, ya que debido al modo de operación de la escalera mecánica, la velocidad va a permanecer constante cuando el mecanismo se encuentra en el proceso de transporte de los usuarios, lo cual va permitir que el sistema se estabilice en un momento determinado. En la (Tabla 12), se puede observar la respuesta del sistema a los distintos tipos de entrada:

Respuesta del sistema

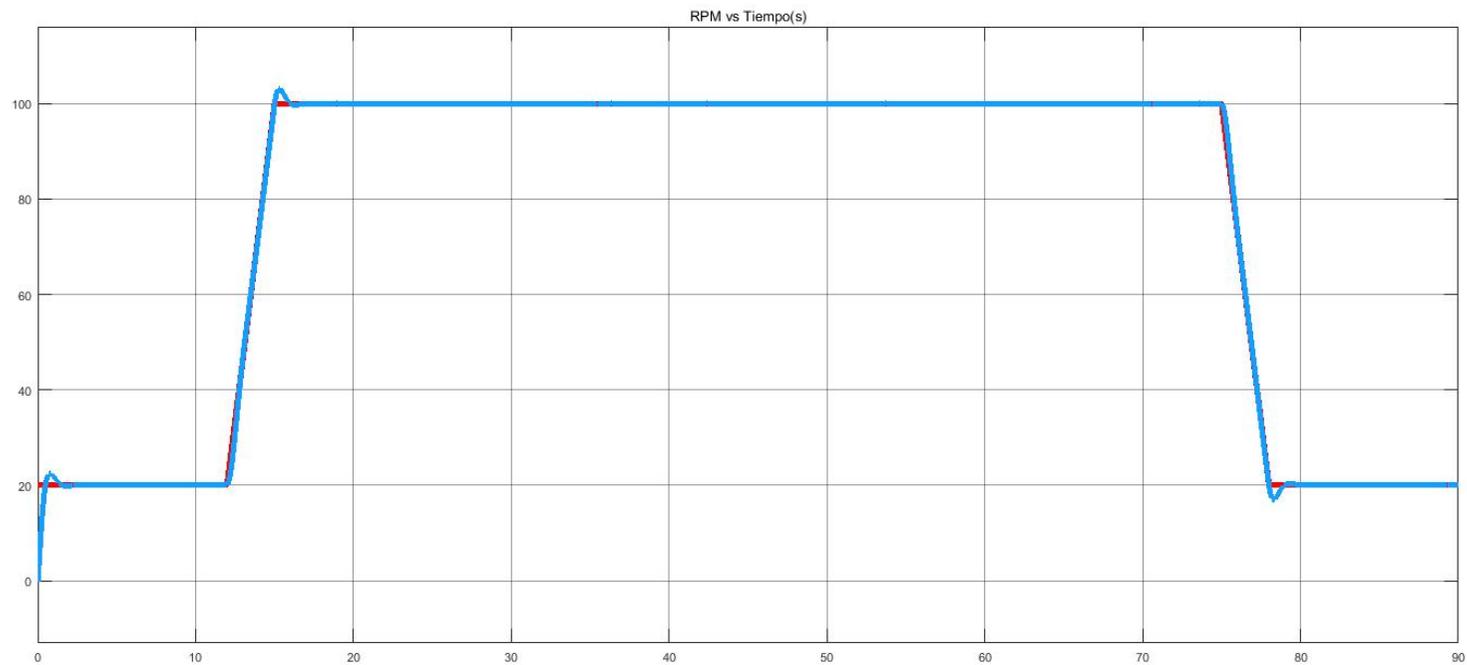
Velocidad
constante de 0.5
m/s

$T_s=2.2s$



Velocidad inicial
de 0.1 m/s

$T_s=2.2s$



Velocidad inicial
de 0.0 m/s

$T_s=2.2s$

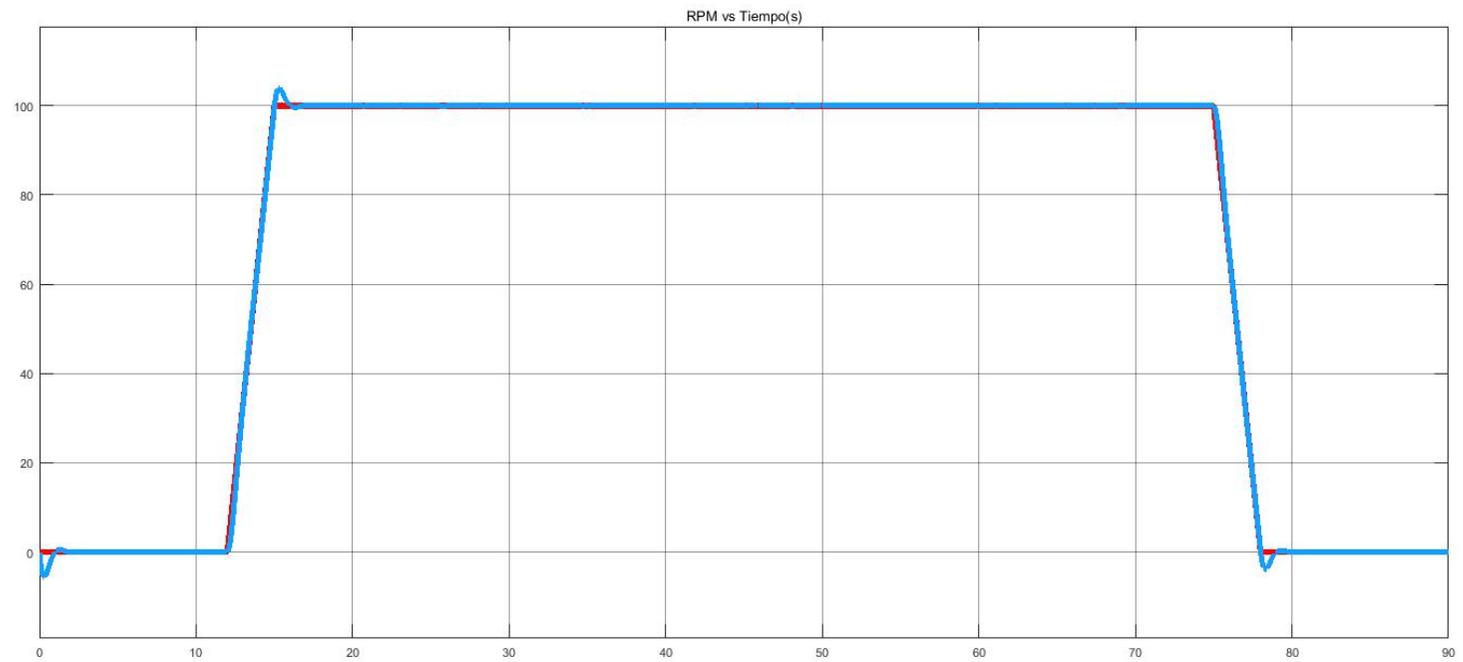
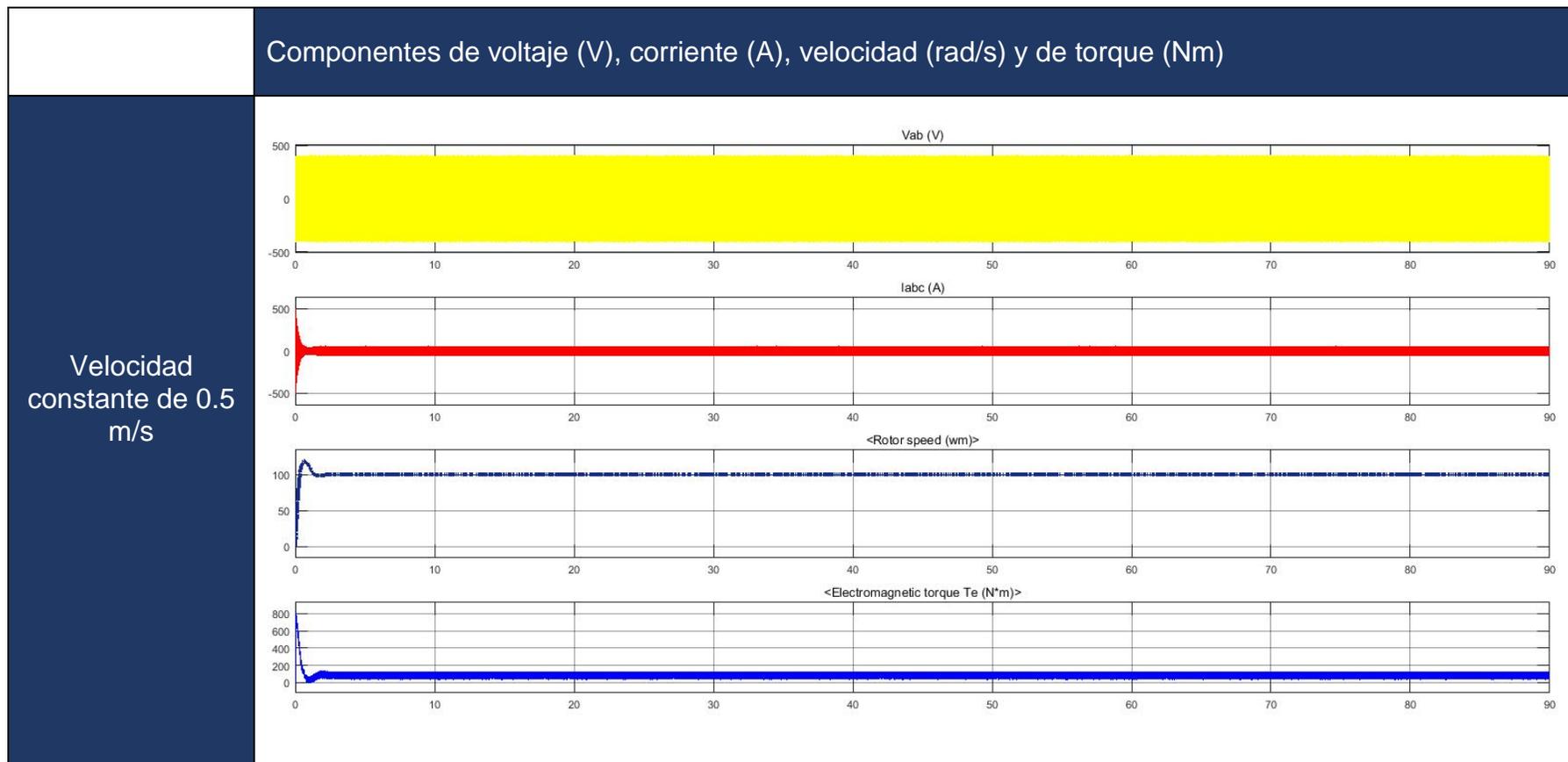
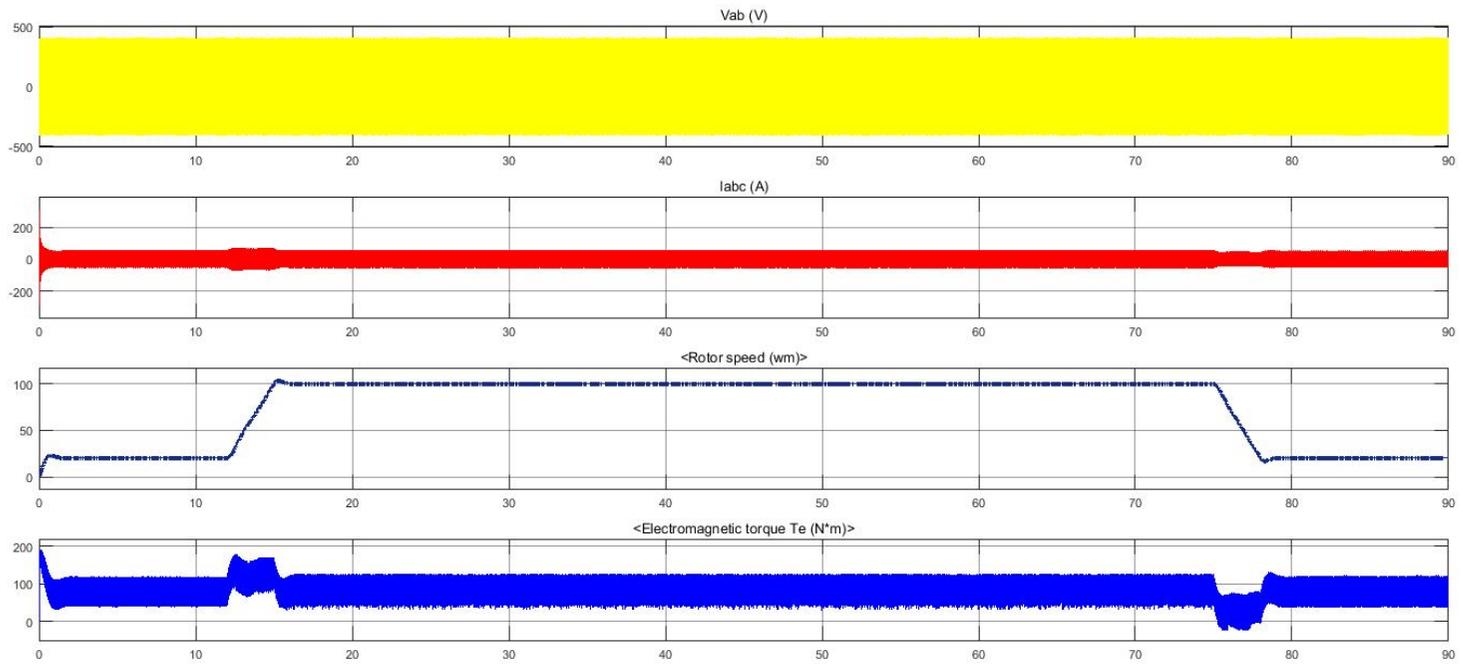


Tabla 12. Respuestas de control del sistema

Otras características que se pueden verificar al realizar la simulación del sistema, tiene que ver con el voltaje (V), corriente (A), velocidad (rad/s) y torque (Nm) del motor. Con el análisis de estas características se busca corroborar que las condiciones para la puesta en marcha del motor no hayan sido afectada momento de la implementación del control. En la (Tabla 13), se puede visualizar dichas características, respecto a los distintos tipos de entrada del sistema:



Velocidad
inicial de 0.1
m/s



Velocidad
inicial de 0.0
m/s

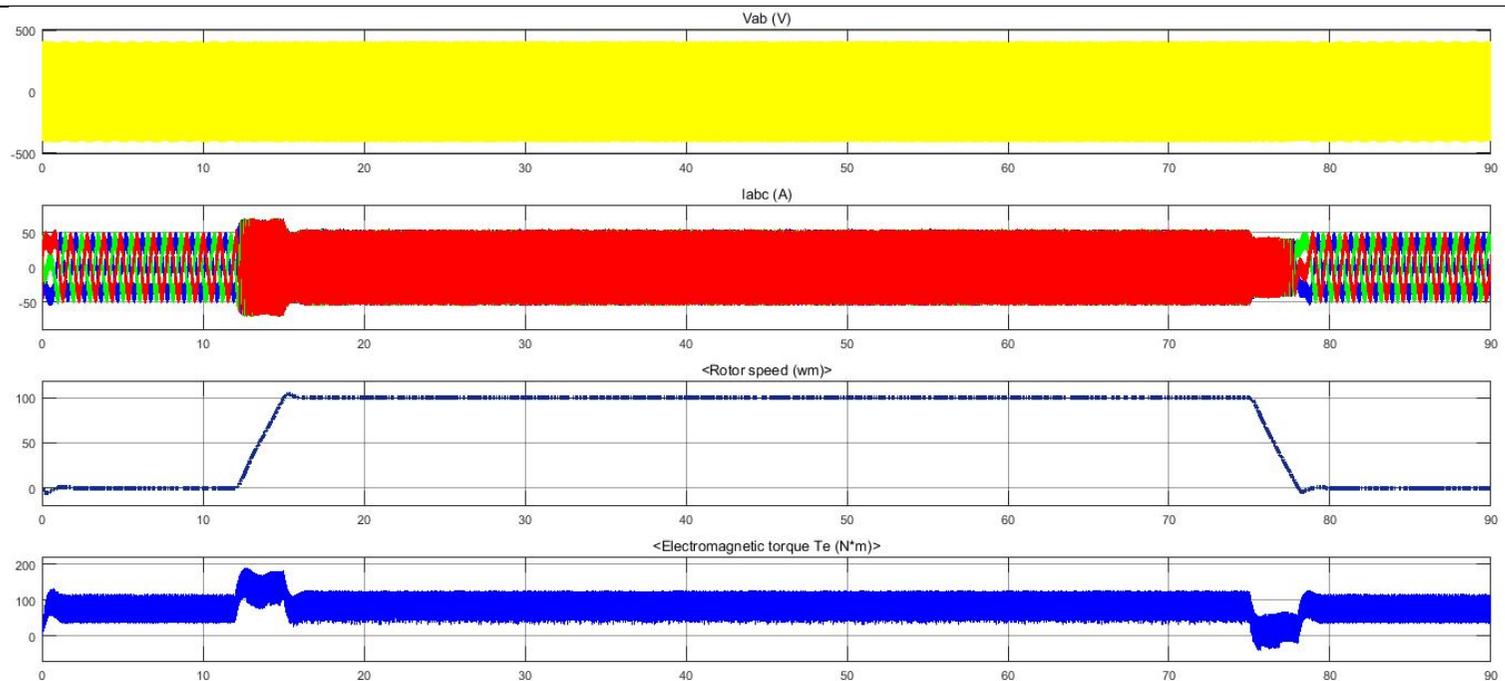
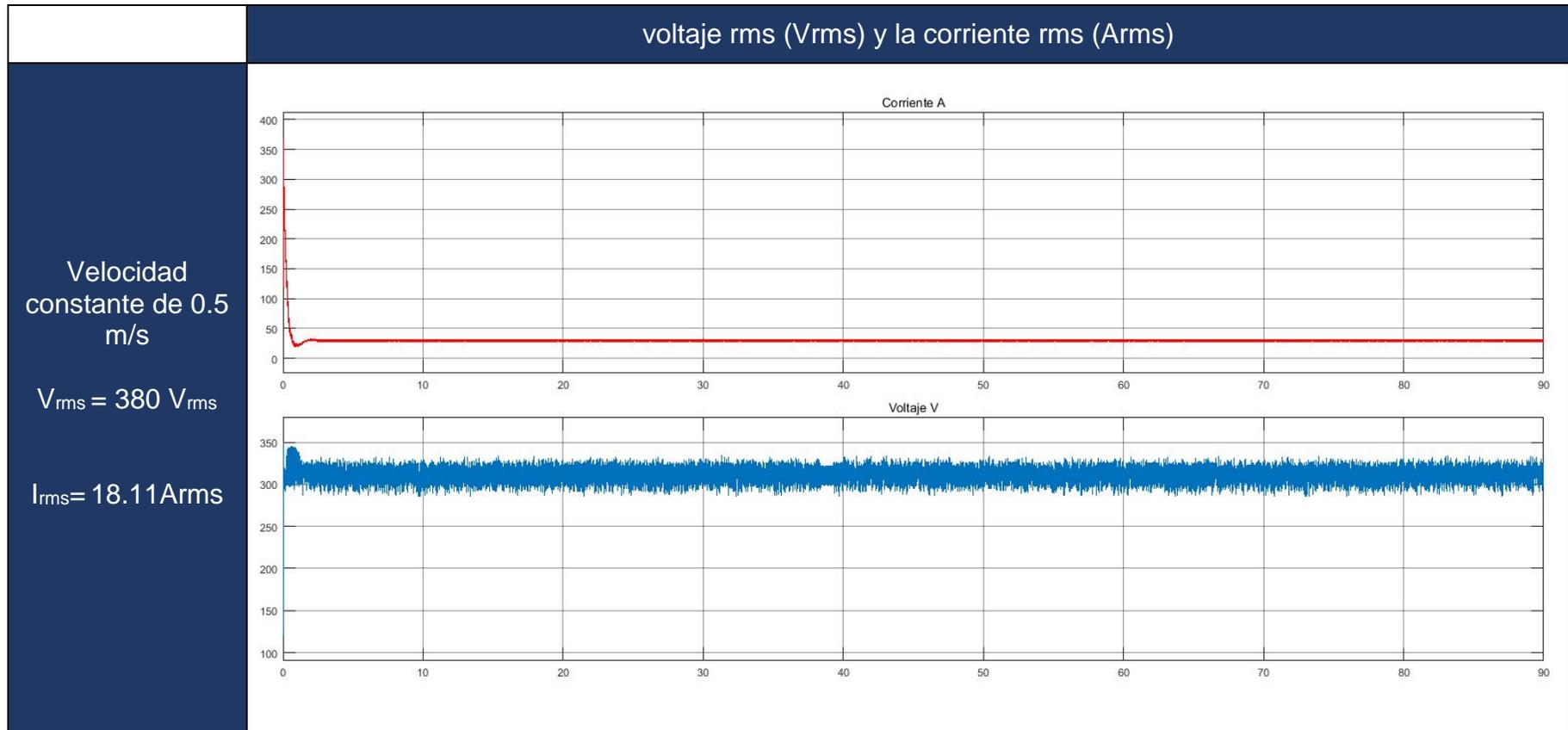


Tabla 13. Respuestas del sistema

Para corroborar la funcionalidad del control en el sistema, se debe tener en cuenta las condiciones de Voltaje rms (V_{rms}) y Corriente rms (I_{rms}). Si bien V_{rms} tiene el mismo valor con las señales de entrada establecidas, la I_{rms} si va a variar; con este

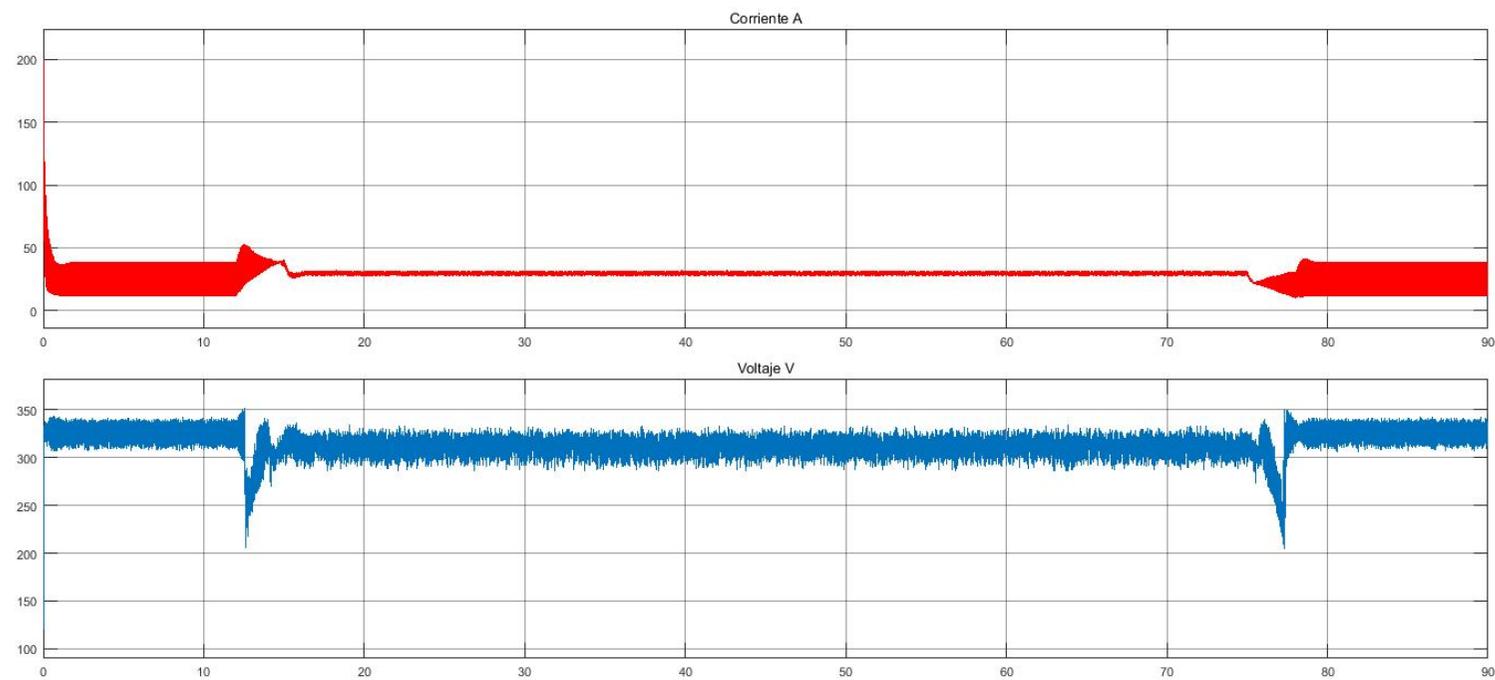
dato será posible determinar el tipo de guarda-motor que el sistema debe tener para la protección del sistema. En la (Tabla 14), se observa la simulación con las características mencionadas:



Velocidad inicial
de 0.1 m/s

$V_{rms} = 380 \text{ V}_{rms}$

$I_{rms} = 11.13 \text{ Arms}$



Velocidad inicial
de 0.0 m/s

$$V_{rms} = 380 \text{ V}_{rms}$$

$$I_{rms} = 10.953 \text{ Arms}$$

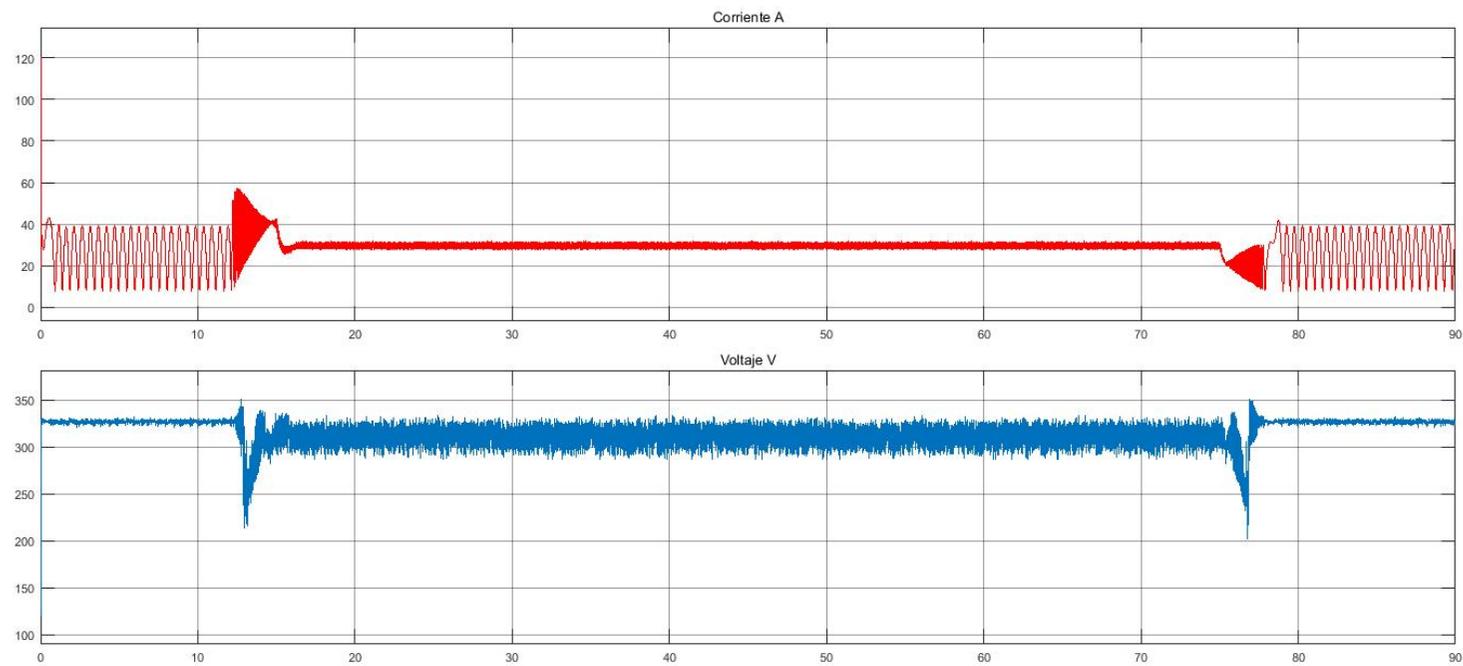
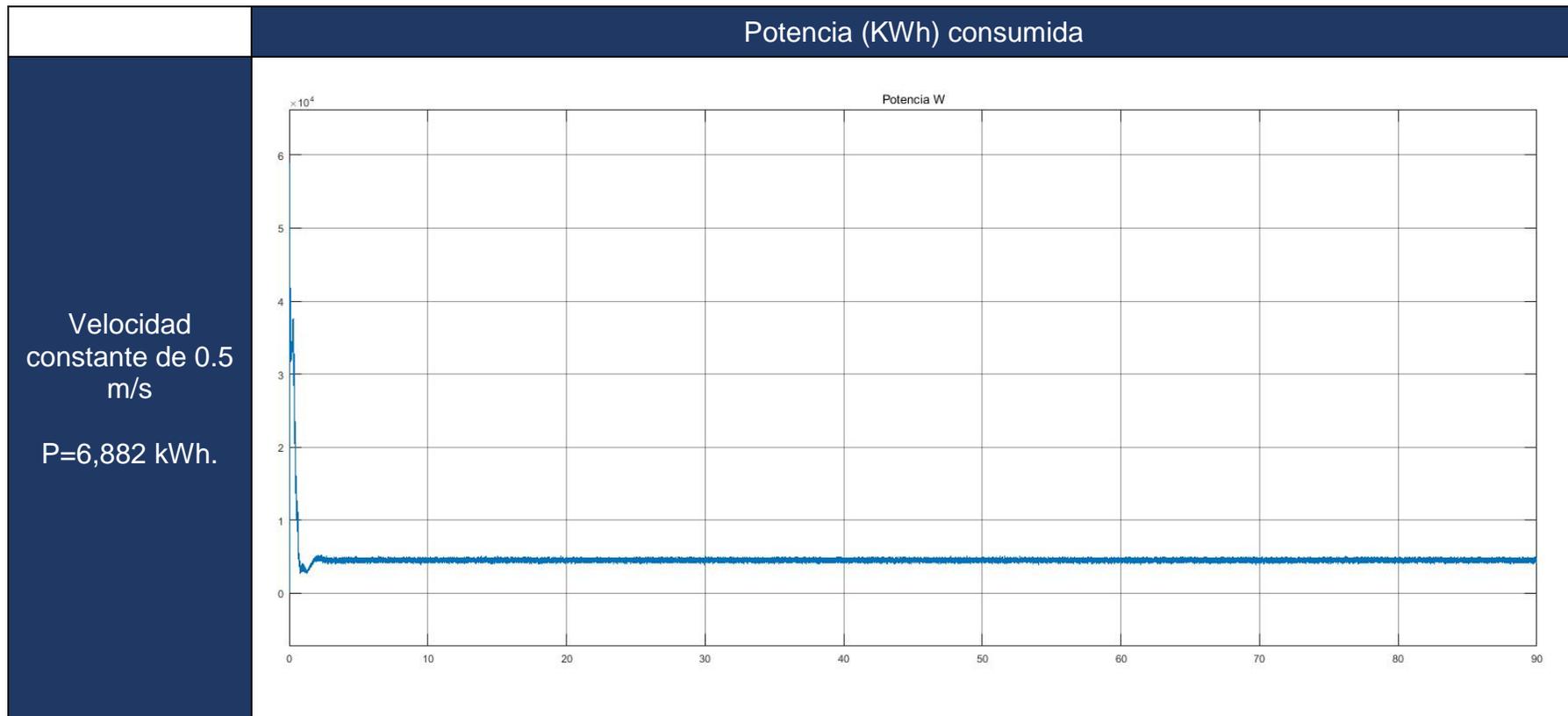


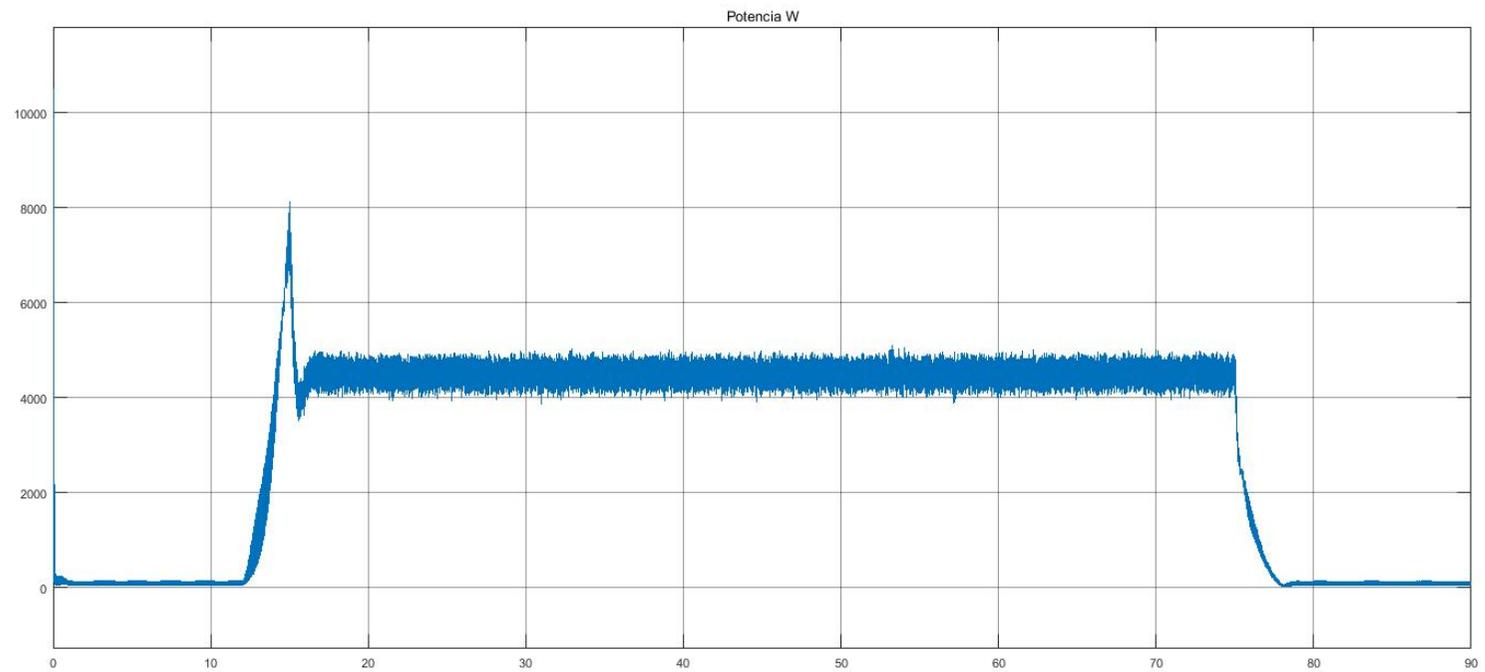
Tabla 14. Corriente rms y Voltaje rms del sistema

Finalmente, en la (Tabla 15), se puede observar las características de consumo de Potencia (P) en una hora de operación del sistema, con respecto a los diferentes tipos de funcionamiento de la escalera mecánica. Este valor permite determinar si efectivamente el sistema está ahorrando, se tiene entonces que:



Velocidad inicial
de 0.1 m/s

P=4,223 kWh



Velocidad inicial
de 0.0 m/s

P=4,162 kWh.

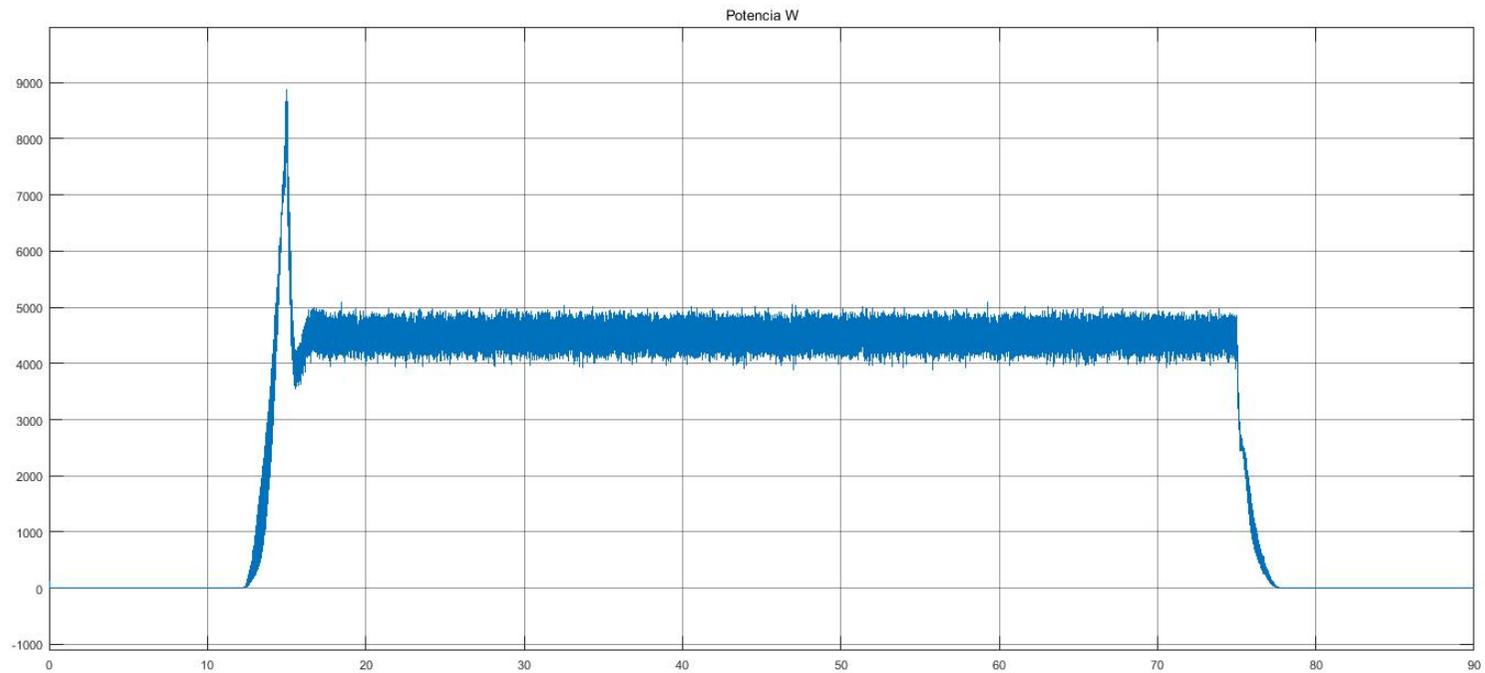


Tabla 15. Potencia consumida del sistema

A partir de estos resultados, se puede decir que:

- Con la configuración inicial a velocidad constante (0.5m/s), tiene un consumo de aproximadamente 6,882 kWh; este valor hace referencia al consumo que tiene la escalera mecánica cuando está operando de manera convencional. Por esta razón, este dato se tomó como parámetro de comparación respecto a las otras dos configuraciones, para poder determinar si existe ahorro con los otros dos tipos entrada.
- La segunda configuración (velocidad inicial=0.1m/s) tiene un consumo de 4,223 kWh. En comparación con la primera configuración, existe un ahorro de aproximadamente 38,64% de consumo de energía.
- La ultima configuración (velocidad inicial=0.0m/s) tiene un consumo de 4,162 kWh. En comparación con la primera configuración, equivale a tener un ahorro de aproximadamente 39,52%, pero cuando se compara con la segundo tipo de entrada, también se tiene un ahorro respecto a esta, ya que existe una reducción en el consumo de cerca de 0,88% en comparación a la segunda configuración.

En la (Tabla 16) se muestra el resumen de las características de ahorro de cada uno de los tipos de entrada, luego:

	CONSUMO	AHORRO
Velocidad constante de 0,5m/s	6,882 kWh	—————
Velocidad inicial de 0,1 m/s	4,223 kWh	38,64%
Velocidad inicial de 0,0 m/s	4,162 kWh	39,52%,

Tabla 16. Ahorro de energía

Si bien la configuración con la que se obtuvo mayor ahorro de energía fue la correspondiente a la que opera con velocidad inicial de 0.0 m/s, se debe mencionar, que como inicialmente en este tipo de operación el sistema está en reposo, su momento de inercia al iniciar la operación de transporte del usuario va a ser elevado, lo que va a provocar un sobre impulso de corriente muy alto (Tabla 14), y por ende puede ocasionar daños en el sistema eléctrico y de control. Para evitar este tipo de riesgo, es recomendable implementar la configuración con velocidad inicial de 0.1 m/s, ya que al contar con esta velocidad, el momento de inercia al iniciar el proceso de transporte del usuario va ser menor, por lo cual se va reducir el pico corriente en este punto, evitando daños prematuros en el sistema eléctrico, además de que la diferencia de ahorro en el consumo entre la primera y segunda configuración va a ser de apenas de 0.88%, implementar

el tipo de operación de la escalera mecánica con velocidad inicial de 0.1m/s, resulta ser ciertamente más viable.

16. Análisis del control con respecto al impacto ambiental

La emisión de carbono anhídrido gramos de CO₂ por kWh de electricidad producida, varía mucho entre los países y depende de la combinación de fuentes de energía utilizada para producir energía.

Las emisiones de CO₂ por kWh de electricidad, tiene en cuenta las emisiones de CO₂ de los combustibles fósiles consumidos para la generación de electricidad. Las principales centrales térmicas actividad dividida por la producción de electricidad y calor generados a partir de combustibles fósiles, nuclear, hidráulica (sin almacenamiento por bombeo), geotérmica, solar y biomasa. Tanto los productores como actividad principal y los auto productores se han incluido en el cálculo de las emisiones de CO₂.

Si consideramos sólo la producción de electricidad (sin calor) en Colombia ese valor es de 175,737 CO₂gramos/kWh [47], por lo tanto, se calcula la emisión de CO₂ producida por cada configuración de velocidad:

	Consumo	Emisión de CO ₂
Velocidad constante de 0,5m/s	6,882 kWh	1209,42 g
Velocidad inicial de 0,1 m/s	4,223 kWh	742,14 g
Velocidad inicial de 0,0 m/s	4,162 kWh	731,42 g

Tabla 17. Emisión de CO₂

Se puede observar en la (Tabla 17) la emisión de CO₂ producida por cada una de las tres configuraciones de velocidad.

17. CONCLUSIONES

Los resultados de las simulaciones aquí presentadas, dependen de los modelos matemáticos utilizados, por tal razón, es importante hacer notar que el grado de exactitud deseado puede ser alcanzado, utilizando modelos más complejos. Los modelos utilizados aquí tienen la aproximación adecuada, para observar el control aplicado a los motores de inducción.

Cuando se trata de estructuras que son empleadas por seres vivos, sus características mecánicas deben tener en cuenta los posibles riesgos que pueden presentar las personas al utilizar estos mecanismos. Es por esto que, en el caso de las escaleras mecánicas, existen diversos tipos de normas que

brindan la información necesaria para la construcción de estas. Por esta razón, dependerá del diseñador realizar piezas que cumplan con las normas de tal forma que se reduzcan las posibilidades de que los usuarios tengan un accidente.

Para el diseño realizado, se tuvo en cuenta todos los parámetros presentados en la norma ASME, por lo cual en el diseño cinemático se obtuvo las características ideales para la implementación de la estructura, además de que como ciertos datos se deben sobredimensionar para verificar la fiabilidad de la estructura, se logró corroborar que, al implementar adecuadamente dicha norma, la escalera mecánica es una estructura segura para los usuarios.

Dentro de los convertidores de frecuencia se pueden distinguir dos grandes grupos, según trabajen como fuente de voltaje o como fuente de corriente. Siendo la modulación PWM la forma más habitual de control de la etapa de potencia en los accionamientos para motores de corriente alterna, que, aunque es un método empleado en los convertidores que actúan como fuente de voltaje, también su funcionamiento puede convertirse en uno semejante a los convertidores de corriente, con el simple uso de un lazo interno de corriente de un ancho de banda elevado. Estos últimos se conocen como inversores PWM controlados por corriente o simplemente CRPWM.

Gracias al control realizado, nos pudo obtener las siguientes ventajas:

- Regulación precisa de velocidad
- Un par máximo disponible a cualquier velocidad hasta la de sincronismo.
- La operación del inversor en seis cuadrantes.
- Una excelente respuesta dinámica.

A parte de las características mecánicas y de control que tiene la escalera mecánica, uno de los principales impactos que tiene el diseño presentado en este documento, es la reducción en el consumo de energía eléctrica, reduciendo de cierta manera el impacto medio ambiental del sistema, mejorando a su vez, la eficiencia en el uso de energías no renovables.

18. BIBLIOGRAFÍA

- [1]"EUROPRESS", EUROPRESS, 2016. [Online]. Available: http://www.lainformacion.com/estilo-de-vida-y-tiempo-libre/pasatiempos/compras/Metro-renovara-escaleras-mecanicas-Chueca_0_959004406.html. [Accessed: 29- Oct- 2016].
- [2]"Promateriales", OTIS, 2016. [Online]. Available: http://www.otis.com/site/es-esl/OT_DL_Documents/OT_DL_DocumentLibrary/Otis%20en%20los%20medios/2014/Entrevista%20a%20L.M.%20Alcazar,%20Promateriales,%20Octubre%202014.pdf. [Accessed: 29- Oct- 2016].
- [3]M. Sáez, "Niña de 3 años sufre heridas en escalera eléctrica de centro comercial de Soledad", El Heraldo, 2016. [Online]. Available: <http://www.elheraldo.co/judicial/nina-de-3-anos-sufre-heridas-en-escalera-electrica-de-centro-comercial-de-soledad-25703>. [Accessed: 29- Oct- 2016].
- [4]Ó. Dominguez, "Las escaleras eléctricas de Medellín que impactaron a Obama", ElEspectador, 2016. [Online]. Available: <http://www.elespectador.com/noticias/nacional/antioquia/escaleras-electricas-de-medellin-impactaron-obama-articulo-629716>. [Accessed: 29- Oct- 2016].
- [5]"Evolución de los dispositivos electrónicos", Milenio, 2016. [Online]. Available: http://www.milenio.com/firmas/universidad_politecnica_de_tulancingo/Evolucion_de_dispositivos_electronicos_18_769903036.html. [Accessed: 29- Oct- 2016].
- [6]"Guía para la planificación de escaleras mecánicas y rampas móviles", Schindler, 2012. [Online]. Available: http://prof.usb.ve/jaller/calificaciones/schindler_planning_es.pdf. [Accessed: 11- Mar- 2016].
- [7]E. Ramirez, "Escaleras mecanicas "a demanda" ahorran un 52% de electricidad - EIBlogVerde.com", EIBlogVerde.com, 2016. [Online]. Available: <http://elblogverde.com/escaleras-mecanicas-a-demanda-ahorran-un-52-de-electricidad/>. [Accessed: 11- Mar- 2016].
- [8]"PROYECCIÓN DE LA DEMANDA DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y POTENCIA MÁXIMA EN COLOMBIA", UPME, 2015. [Online]. Available: http://www.siel.gov.co/siel/documentos/documentacion/Demanda/UPME_Proyeccion_demanda_energia_electrica_Marzo2015.pdf. [Accessed: 11- Mar- 2016].
- [9]J. Lafuente, "Colombia vive al borde de un racionamiento de la energía", EL PAÍS, 2016. [Online]. Available: http://internacional.elpais.com/internacional/2016/03/08/colombia/1457458704_289136.html. [Accessed: 11- Mar- 2016].
- [10]J. Dominguez, "Cuidado con las escaleras eléctricas", Sura.com, 2015. [Online]. Available: <http://www.sura.com/blogs/calidad-de-vida/ni%C3%B1os-escaleras-electricas.aspx>. [Accessed: 12- Mar- 2016].
- [11] Kiang Chung Chau Nefield, Cheng Ka Wai Eric and Chan Ka Wing Kelvin, "Energy efficient technologies for railway escalators," Railway Engineering - Challenges for

Railway Transportation in Information Age, 2008. ICRE 2008. International Conference on, Hong Kong, 2008, pp. 1-5.

URL:

<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4730866&isnumber=4730822>

[12] H. Liu, H. He, S. L. Han, J. R. Yang, L. Su and F. Liu, "Based on Single-Chip Adaptive Fuzzy Algorithm Escalator Energy-Saving Control System," Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, 2008. FSKD '08. Fifth International Conference on, Shandong, 2008, pp. 523-526. doi: 10.1109/FSKD.2008.78

URL:

<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4666300&isnumber=4666196>

[13] J. Kuutti, R. E. Sepponen and P. Saarikko, "Escalator power consumption compared to pedestrian counting data," Applied Electronics (AE), 2013 International Conference on, Pilsen, 2013, pp. 1-4.

URL:

<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6636505&isnumber=6636459>

[14] Jordi Vidal Bort. Estudio del Modelo Matemático del Motor de Inducción Trifásico y simulación en Régimen Dinámico. Junio 2002. simulación en Régimen Dinámico. Junio 2002.

[15]. TOLEDO CHOJOLÁN, STEEVE ERASMO. Diseño de controladores PID en tiempo discreto, y análisis de respuesta utilizando herramientas computacionales. Guatemala, octubre de 2007. Trabajo de grado. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de ingeniería

[16]. UTKIN Vadim I. "Sliding Mode Control Design Principals and Applications to Electric Drives". IEEE Transactions on Industrial Electronics. Vol 40. No. 1. 1993.

[17]. GUTIÉRREZ GRANADOS CUITLÁHUAC. Módulo Didáctico para el Control de la Velocidad de un Motor de Inducción Trifásico Basado en la Tecnología de FPGA. 10º Congreso Nacional de Mecatrónica Noviembre 3 y 4, 2011. Puerto Vallarta, Jalisco. Universidad Tecnológica de San Juan del Río. Av. La Palma # 125, Col. Vista Hermosa, San Juan del Río, Qro. C.P. 76800

[18] Takahashi, I.; Noguchi, T: A new quick-response and high-efficiency control strategy of an induction motor. IEEE Trans. on Ind. Applicat., Vol IA-22, No. 5, PP. 820-827, September/October 1986.

[19] Habetler, T. G.; Divan, D. M: Control Strategies for direct torque control using discrete pulse modulation. IEEE Trans. on Ind. Applicat., Vol. 7, No. 5, PP. 893-901, September/October 1991.

- [20] Casadei, D.; Grandi, G.; Serra, G: Rotor flux oriented torque-control of induction machines based on stator flux vector control. The European Power Electronics Association "EPEA '93", PP.67-72.
- [21] Donescu, V.; Griva, G.; Profumo, F: A new discrete current vector regulator for torque controlled induction motor drives. IEE Conference on Power Electron. And Variable Speed Drives, Publication No. 429, PP. 454-458, 23-25 September 1996.
- [22] Cabrera, L. A.; Elbuluk, M. E.; Husain, I: Tuning the stator resistance of induction motors using artificial neural network. IEEE Trans. On Power Electron, Vol. 12, No. 5, PP. 779-787, September 1997.
- [23] CRIOLLO CÓRDOVA, ARMANDO DANILO RUIZ MALDONADO, CARLOS ALBERTO. Variador de velocidad para motores de C.A. ed. QUITO/ EPN/ 2007. Jul-2007. Formación tecnológica (esfot). Electromecánica (em). Tesis tecnólogo electromecánica (em). Escuela politécnica nacional
- [24] Construmatica.com. (2012). Escaleras | Construpedia, enciclopedia construcción. [online] Available at: <http://www.construmatica.com/construpedia/Escaleras> [Accessed 8 Mar. 2016].
- [25] Ramírez, F. (2012). Escaleras eléctricas. [online] Es.slideshare.net. Available at: <http://es.slideshare.net/nievesiita/escaleras-elctricas-15120850> [Accessed 8 Mar. 2016].
- [26] Electric Corporation, M. (2015). Ascensores y escaleras mecánicas - MITSUBISHI ELECTRIC. [online] Mitsubishielectric.com. Available at: http://www.mitsubishielectric.com/elevator/es/overview/e_m_walks/e_s_equipment.html [Accessed 8 Mar. 2016].
- [27] Electric Corporation, M. (2015). Ascensores y escaleras mecánicas - MITSUBISHI ELECTRIC. [online] Mitsubishielectric.com. Available at: http://www.mitsubishielectric.com/elevator/es/overview/e_m_walks/m_m_escalators.html [Accessed 8 Mar. 2016].
- [28] AceBes, F. (2013). Introducción a los sistemas de control. [online] Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática(ISA) de la Universidad de Valladolid (UVA). Available at: http://www.isa.cie.uva.es/~felipe/docencia/ra12itielec/tema1_trasp.pdf [Accessed 10 Mar. 2016].
- [29] Es.slideshare.net. (2010). Sistemas De Control. [online] Available at: <http://es.slideshare.net/26mms2b/sistemas-de-control-3333373> [Accessed 11 Mar. 2016].
- [30] INFORME TECNICO: IT-EE09(11/11), Arranque y control de motores trifásicos asíncronos, EATON.

- [31] M. Electric, "escalators Serie Z", Mitsubishi. [Online]. Available: http://www.mitsubishielectric.com/elevator/products/asme/escalators/z_type_es/pdf/catalog.pdf. [Accessed: 05- Jun- 2016].
- [32] atalogo Schindler 9300", schindler, 2016. [Online]. Available: http://www.schindler.com/content/es/internet/es/soluciones-de-movilidad/Instalaciones/transporte/_jcr_content/rightPar/downloadlist_0/downloadList/300_1360612766949.download.asset.300_1360612766949/escalera-mecanica-9300-ae.pdf. [Accessed: 07- Jun- 2016].
- [33] M. Garcia Guembe, "Alternativas al aluminio para la construcción de peldaños de las escaleras mecánicas.", uniovi.es, 2015. [Online]. Available: http://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/10651/33010/6/TFM_Maite%20Garc%c3%ad aGuembe.pdf. [Accessed: 09- Aug- 2016].
- [34] M. Portilla Zetina, "Resistencia de Materiales", uttijuana.edu.co, 2011. [Online]. Available: <http://blog.uca.edu.ni/estructuras/files/2011/01/ejercicios-de-factor-de-seguridad.pdf>. [Accessed: 30- Aug- 2016].
- [35] I. Vanegas, "Cargas variables -Teoria de Fatiga", utp.edu.co, 2014. [Online]. Available: <http://www.utp.edu.co/~lvanegas/dis1/Cap5.pdf>. [Accessed: 30- Aug- 2016].
- [36] A. Miravete and E. Larrode, "Elevadores: Principios e innovaciones", revert.com, 2007. [Online]. Available: <https://es.scribd.com/doc/144933417/Libro-Ascensores-pdf>. [Accessed: 18- Jul- 2016].
- [37] K. Elevator & Escalator solutions Group, "Universal Escalator Motor", imperialelectric.com, 2014. [Online]. Available: <http://imperialelectric.com/pdfs/yft160cs.pdf>. [Accessed: 09- Sep- 2016].
- [38] "Escalera mecánica del conductor de polea de la rueda en Gafas de seguridad de Seguridad y Defensa en AliExpress.com | Alibaba Group", aliexpress.com, 2014. [Online]. Available: <https://es.aliexpress.com/item/Escalator-driver-sheave-wheel/32419644365.html?spm=2114.43010308.4.51.i46K5V>. [Accessed: 23- Jun- 2016].
- [39] I. Ingenieria, consulta y Formacion, "Transmisión por Cadenas", Ingemecanica.com, 2016. [Online]. Available: <http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn127.html>. [Accessed: 15- Jun- 2016].
- [40] C. Joresa, "Cadenas de Rodillos", Joresa.es, 2014. [Online]. Available: <http://www.joresa.es>. [Accessed: 12- Jun- 2016].
- [41] A. Fitzgerald, C. Kingsley Jr. and S. Umans, Máquinas Eléctricas, 6th ed. Caracas: Mc Graw Hill, 2004, pp. [306-356].
- [42] Kiang Chung Chau and S. L. Ho, "Energy optimization of public service escalators," Advances in Power System Control, Operation and Management (APSCOM 2012), 9th IET International Conference on, Hong Kong, 2012, pp. 1-6
- [43] F. ROJAS ESPINOZA and C. NIETO PIERUCCINI, "DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN RECTIFICADOR TRIFÁSICO TOTALMENTE

CONTROLADO CON FACTOR DE POTENCIA MEJORADO BASADO EN TECNOLOGÍA CMOS Y DSP", uis.edu.co, 2007. [Online]. Available: <http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/3272/2/124182.pdf>. [Accessed: 25- Sep- 2016].

[44] <http://prof.usb.ve/>. (2016). Criterio de Nyquist. [online] Available at: [http://prof.usb.ve/montbrun/PS2320clase5\(a\)AJ08.pdf](http://prof.usb.ve/montbrun/PS2320clase5(a)AJ08.pdf) [Accessed 23 Oct. 2016].

[45] Rodríguez Ramírez, D. and Álamo Cantarero, T. (2013). Diseño de controladores Discretos. [online] control-class.com. Available at: http://www.control-class.com/Tema_6/Slides/Tema_6_Disenio_Controladores.pdf [Accessed 16 Oct. 2016].

[46] P. Infotech, "BTX Chain Industries", Industrialchains.co.in, 2013. [Online]. Available: <http://www.industrialchains.co.in/estep-chains.html>. [Accessed: 12- Jul- 2016].

[47] S. tools, "Calculadora de emisiones de CO2, del coche g/km, de dióxido de carbono de kWh", Sunearthtools.com, 2016. [Online]. Available: <http://www.sunearthtools.com/es/tools/CO2-emissions-calculator.php>. [Accessed: 27-Oct- 2016].

[48] Setting The Standard, A. (2010). Guide for Inspection of Elevators, Escalators, and Moving Walks. [online] law.resource.org. Available at: <https://law.resource.org/pub/us/code/ibr/asme.a17.2.2010.pdf> [Accessed 2 Jun. 2016].

[49] Mechanical Engineers, T. and Canadian Standard, A. (2008). Addenda to ASME A17.1-2007/ CSA B44-07. [online] law.resource.org. Available at: <https://law.resource.org/pub/us/code/ibr/asme.a17.1a.2008.pdf> [Accessed 2 Jun. 2016].

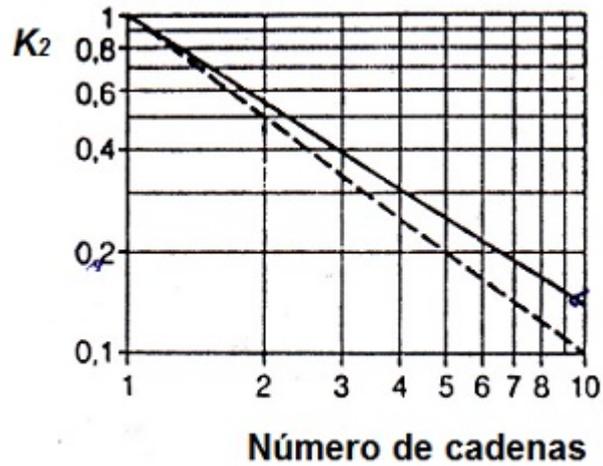
[50] Mechanical Engineers, T. (2004). Safety Code For Elevators And Escalator. [online] law.resource.org. Available at: <https://law.resource.org/pub/us/code/ibr/asme.a17.1.2004.pdf> [Accessed 3 Jun. 2016].

[51] Mechanical Engineers, T. and Group, C. (2013). Safety Code for Elevators and Escalators. [online] browntechnical.org. Available at: <http://www.browntechnical.org/content/PDF/a17.1.pdf> [Accessed 3 Nov. 2016].

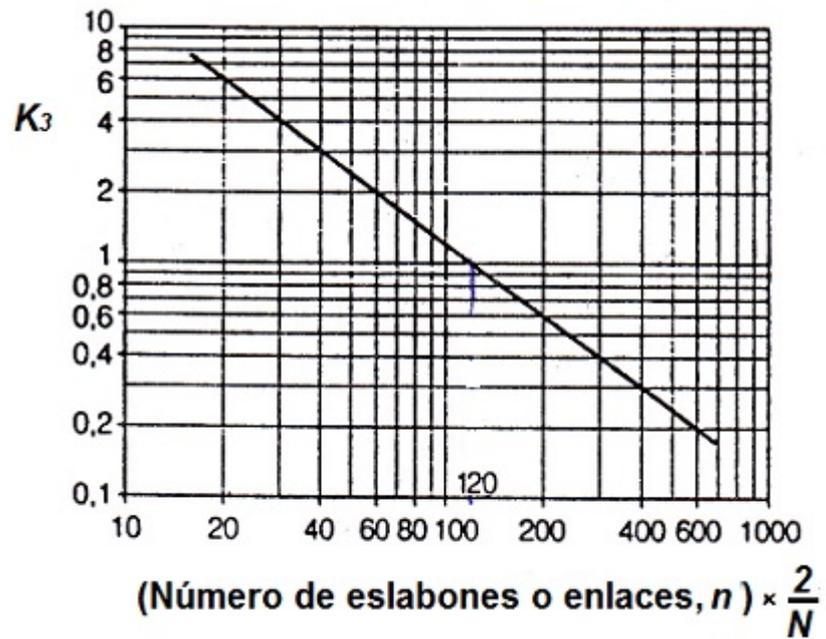
[52] STANDARDIZATION, E. (2016). Safety of escalators and moving walks - Part 1: Construction and installation. [online] inmetro.gov.br. Available at: http://www.inmetro.gov.br/barreirastecnicas/pontofocal/..%5Cpontofocal%5Ctextos%5Cregulamentos%5CSAU_437.pdf [Accessed 3 Jun. 2016].

19. ANEXOS

Anexo 1. Numero de cadenas



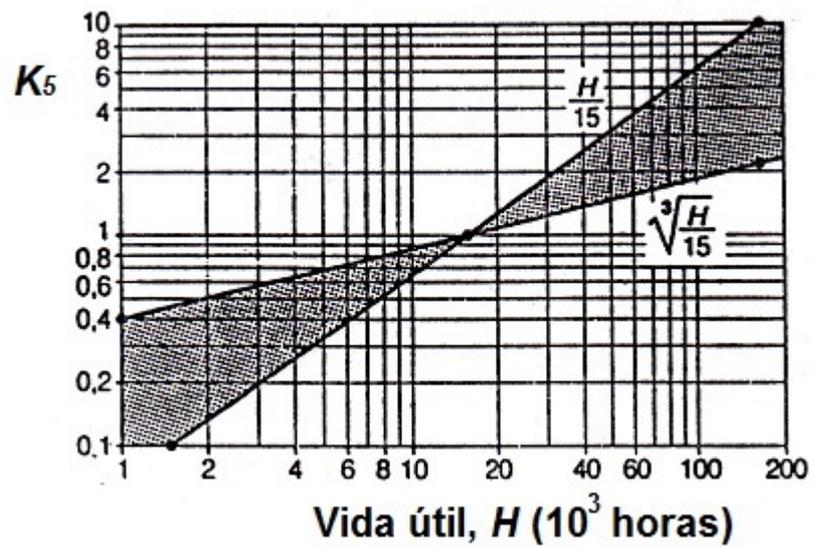
Anexo 2. Numero de eslabones o enlaces



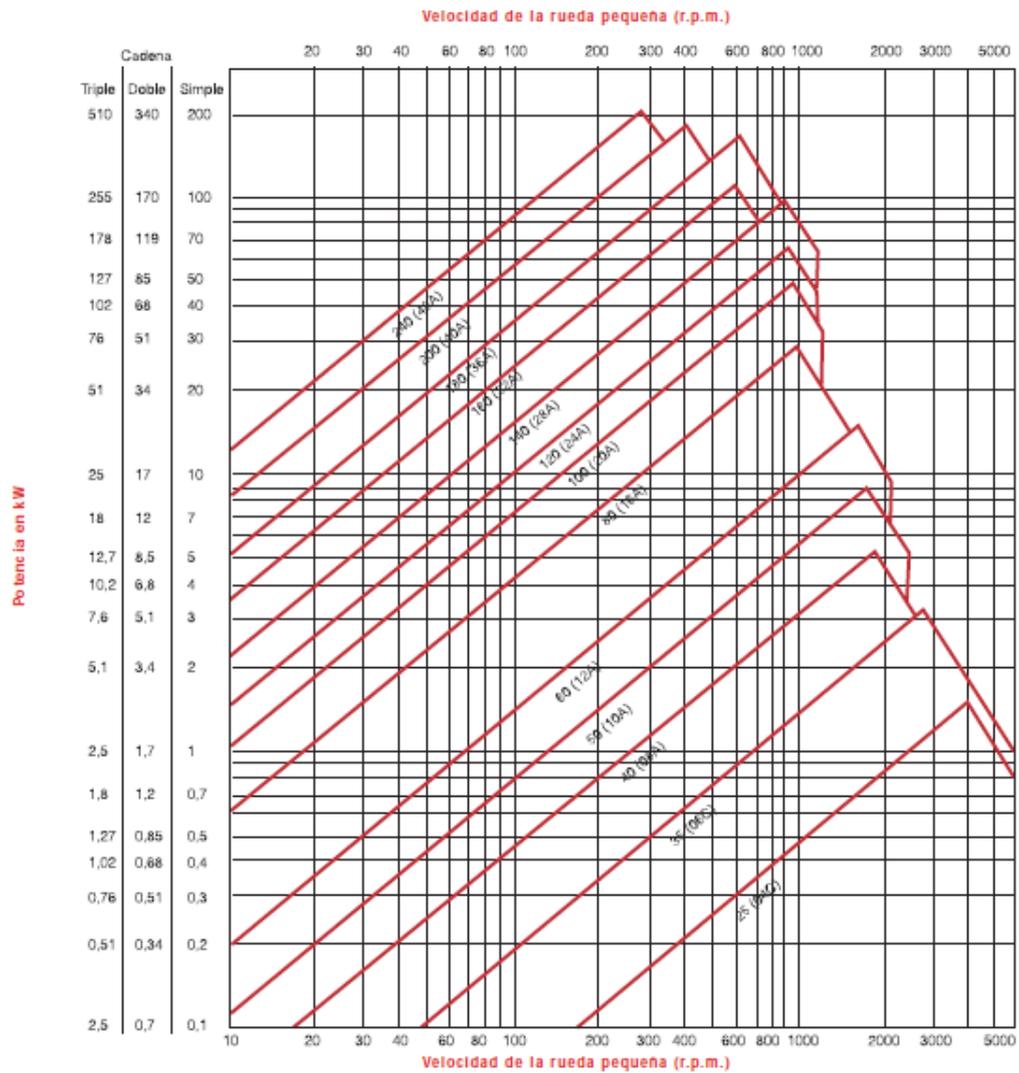
Anexo 3. Factor de servicio

Coeficiente K_4 , Factor de servicio					
Charges	Machines réceptrices	Machines motrices	Moteur à combustion interne à transmission mécanique		
			hydraulique Moteur électrique et Turbine	4 cylindres et plus	moins de 4 cylindres
Régulières	Machines d'imprimerie Pompes et compresseurs centrifuges Calandreuses pour papier Escaliers roulants Agitateurs de liquides		1,00	1,10	1,30
Irégulières	Malaxeurs à béton Broyeurs à boulets Pompes et compresseurs à 3 pistons ou plus Presses, cisailles Agitateurs de solides Tamis vibrants		1,40	1,50	1,70
À-coups	Excavatrices Raboteuses Broyeurs à marteaux et à cylindres Pompes et compresseurs à 1 piston Forage pétrolier		1,80	1,90	2,10

Anexo 4. Vida útil



Anexo 5. Tipo cadena



Anexo 6. Iteración de número de eslabones Excel

l	1.510			
z1	23		r1	139,9
z2	57		r2	346
betha	0,136800888			
eslabones	119,9998775			

Anexo 7. Corroboración cadena de transmisión

v3.2.14

RENOLD

CÁLCULO DE CADENA DE TRANSMISIÓN

Empresa: A&J

29/10/2016

Dirección:

Persona de contacto: Andres y Jason

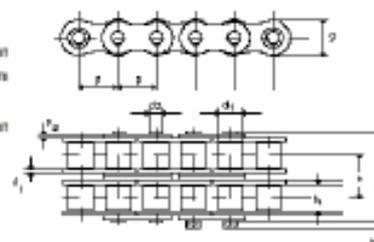
Cadena de transmisión

Cadena de rodillos Renold Synergy ANSI 120 (ISO 606) doble

Número de serie: 115127

Datos de la cadena:

Paso:	$p = 38,1 \text{ mm}$	Alt. max de placa:	$g = 36,2 \text{ mm}$
ISO Carga de rotura:	$F_b = 250000 \text{ N}$	Espesor de placa interior:	$s_i = 4,8 \text{ mm}$
Ancho interior:	$b_1 = 25,23 \text{ mm}$	Espesor de placa exterior:	$s_e = 4,8 \text{ mm}$
Diámetro de rodillo:	$d_1 = 22,23 \text{ mm}$	Max long. de perno:	$l = 94,7 \text{ mm}$
Diámetro de perno:	$d_2 = 11,11 \text{ mm}$	Ext. perno de conexión:	$k = 5,3 \text{ mm}$
Masa:	$q = 11 \text{ kg/m}$		
Superficie de contacto:	$7,84 \text{ cm}^2$		



Condiciones de carga:

Potencia de entrada:	$P = 7,5 \text{ kW}$	Velocidad de entrada:	$n_1 = 39,18 \text{ rpm}$
Torque:	$T = 1828,1 \text{ Nm}$	Fuerza estática:	$F = 13106,7 \text{ N}$
Velocidad lineal de la cadena:	$v = 0,572 \text{ m/s}$	Fuerza centrífuga:	$F_f = 3,6 \text{ N}$
Presión del cojinete:	$P_r = 23,55 \text{ N/mm}^2$	Fuerza dinámica:	$F_d = 18460,2 \text{ N}$
Factor de seguridad de la cadena:	Estático: 19 Dinámico: 13,5	Fuerza total:	$F_g = 18463,8 \text{ N}$

Condiciones ambientales:

Clasificación de carga:	Máquina propulsora: funcionamiento suave. Máquina conducida: ligeramente impulsiva.
Condición de servicio:	Lubricación inadecuada (en relación a la lubricación)
Condiciones ambientales:	ambiente normal, aplicación interior.

Transmisión de cadena:

Número de dientes:	$X = 828$	Longitud de cadena:	$l = 31546,8 \text{ mm}$
Distancia entre centros:	$a = 15006,65 \text{ mm}$		
Relación:	$i = 2,4782$		
Número de dientes:	Rueda conductora (z_1) = 23	Rueda conducida (z_2) = 57	
Diámetro de la circunferencia primitiva:	Rueda conductora (z_1) = 279,804 mm	Rueda conducida (z_2) = 691,623 mm	

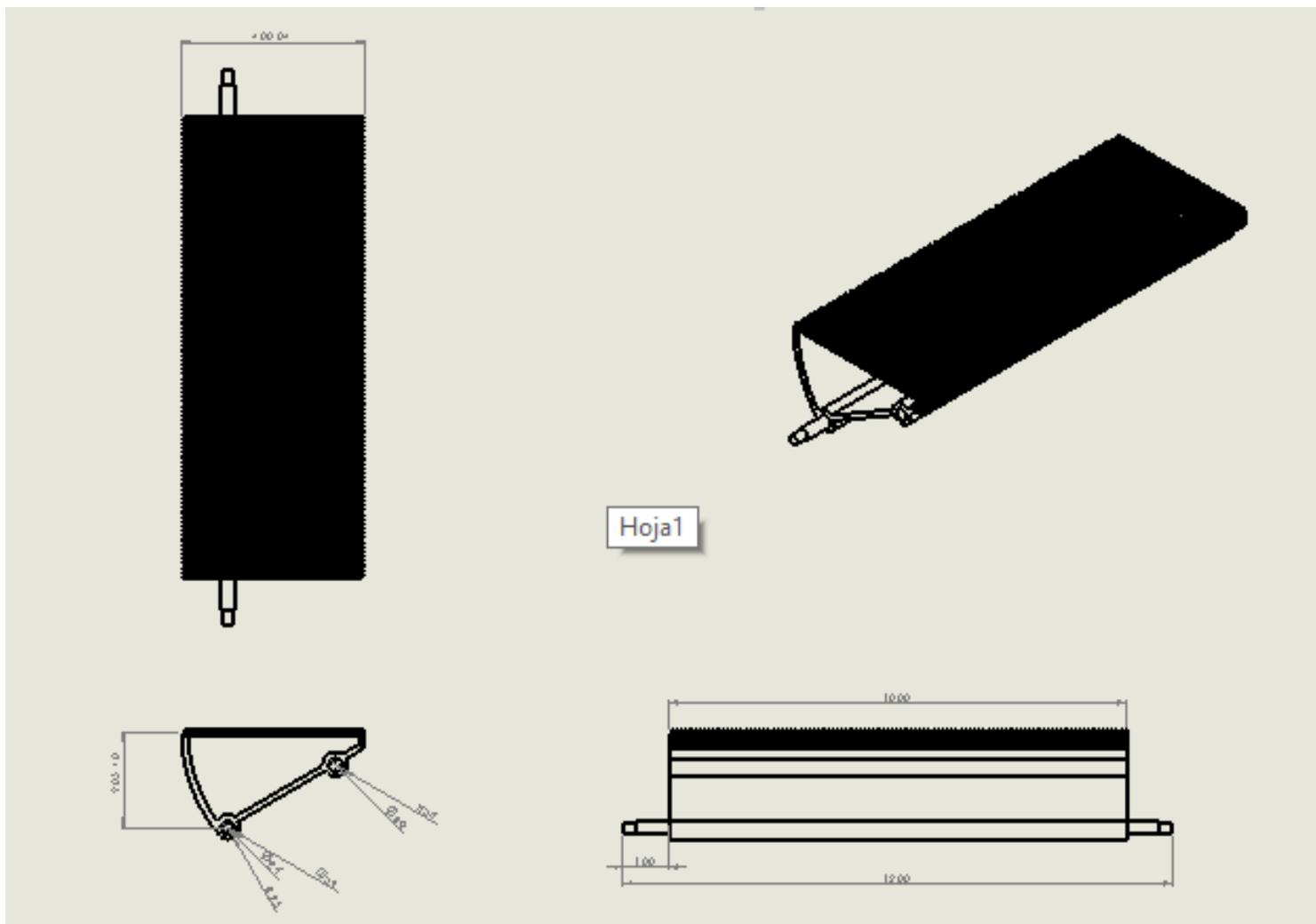
Lubricación recomendada: Lubricación por goteo

La vida de trabajo de la cadena es $> 30000 \text{ h}$,

y está dentro de su capacidad de resistencia al desgaste, es decir, después de este período se alcanzará el 3% de alargamiento.

Sólo válido para el código de producto anteriormente mencionado

Anexo 8. Dimensiones del escalón



Anexo 9. Dimensiones de la pista de la escalera mecánica

