

**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARIA
SEDE VIÑA DEL MAR – JOSÉ MIGUEL CARRERA**

**MODELADO Y SIMULACIÓN DEL CONTROL DE VELOCIDAD DE UNA CORREA
TRANSPORTADORA UTILIZANDO UNA MÁQUINA ELÉCTRICA**

Trabajo de Titulación para optar al Título
Profesional de Ingeniero de Ejecución en
CONTROL E INSTRUMENTACIÓN INDUSTRIAL

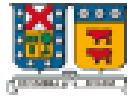
Alumno:

Horacio Andrés Soto Olivares

Profesor Guía:

Mag. Guelis Montenegro Zamora

2025



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): Memoria o trabajo de título Tesis de Postgrado

Título del trabajo: **MODELADO Y SIMULACIÓN DEL CONTROL DE VELOCIDAD DE UNA CORREA TRANSPORTADORA UTILIZANDO UNA MÁQUINA ELÉCTRICA**

Nombre del candidato(a): **HORACIO ANDRES SOTO OLIVARES**

Carrera / Grado: **INGENIERÍA DE EJECUCIÓN EN CONTROL E INSTRUMENTACION INDUSTRIAL**

Campus: **SEDE VIÑA DEL MAR** Departamento: **ELECTROTECNIA E INFORMATICA**

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, **GUELIS MONTENEGRO ZAMORA**, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- Ha revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

El trabajo **NO** contiene información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por (marcar una opción):

6 meses 12 meses 2 años 3 años 5 años 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: **22/10/2025** Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: **22-10-2025** Firma: 

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

RESUMEN

KEYWORDS: CORREA TRANSPORTADORA, SISTEMA, ANÁLISIS, SIMULACIÓN, EFICIENCIA.

El presente trabajo se centra en el estudio y análisis del sistema de correa transportadora, cuyo objetivo principal es modelar y simular el comportamiento dinámico de este sistema, el cual juega un papel importante en la automatización industrial. Para llevar a cabo este modelado y simulación, se empleará el software de simulación MATLAB, específicamente con la herramienta Simulink la cual permitirá crear un modelo integrado del sistema de correa transportadora y con sus componentes asociados.

En el desarrollo del proyecto se describirán detalladamente los diferentes elementos que componen el sistema, tales como el motor eléctrico que impulsa la correa, el sistema de control de velocidad, los componentes mecánicos involucrados, como los rodillos y los mecanismos de transmisión y las características del propio material transportado. Se abordará también el análisis de los parámetros eléctricos y mecanismos que influyen en el rendimiento del sistema, tales como la velocidad de la correa, la potencia, las tensiones y corrientes en el motor, así como los valores de eficiencia y las pérdidas energéticas asociadas.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1: ESTADO DEL ARTE.....	2
1. ESTADO DEL ARTE	3
1.1 CORREA TRANSPORTADORA	5
1.2 ECUACIONES DE FUNCIONAMIENTO CORREA TRANSPORTADORA	9
1.2.1 Fuerza Normal	10
1.2.2 Fuerza de fricción	11
1.2.3 Fuerza del motor	12
1.2.4 Tensión de la correa	13
1.2.5 Torque del motor	14
1.2.6 Potencia consumida	15
1.2.7 Energía acumulada	16
1.2.8 Eficiencia del motor.....	17
1.2.9 Aceleración.....	18
1.2.10 Velocidad	18
1.3 TRANSFORMACIÓN (ABC →DQ)	19
1.3.1 Idea central y motivación física.....	20
1.3.2 Función de los ejes d y q	21
1.3.3 Construcción conceptual para obtener d y q.....	21
1.3.4 Forma matricial	22
1.3.5 Interpretación física	23
1.3.6 Acoplamiento ω	24
1.3.7 Aplicación e interpretación	24

1.4	OBJETIVOS.....	25
1.4.1	Objetivo General	26
1.4.2	Objetivos específicos.....	26
CAPÍTULO 2: PLANTAMIENTO Y DESARROLLO		27
2.	PLANTEAMIENTO Y DESARROLLO	28
2.1	ESPECIFICACIONES DE LA CORREA TRANSPORTADORA	32
2.2	NORMA ISO 14890	33
2.3	NORMA ISO 5048	35
2.3.1	Diagrama de fuerzas.....	37
2.4	MODELO SIMULINK	39
2.4.1	Zona roja – Generación y transformación de señales de entrada.....	40
2.4.2	Zona amarilla – Modelo del motor de inducción.....	42
2.4.3	Zona azul – Modelo mecánico de la correa transportadora.....	43
2.4.4	Zona verde – Medición y análisis de resultados	44
2.4.5	Modelo Dinámico Del Motor De Inducción	44
CAPÍTULO 3: MODELADO DE PRUEBAS DE CARGA		47
3	MODELADO DE PRUEBA DE CARGA	48
3.1	ESCENARIO 200 KG	49
3.1.1	La velocidad del rotor.....	49
3.1.2	Distancia recorrida	50
3.1.3	Torque electromagnético.....	52
3.1.4	Aceleración del sistema.....	53
3.1.5	Corrientes Estatóricas	55
3.2	ESCENARIO 150 KG	56
3.2.1	La velocidad del rotor.....	57
3.2.2	Distancia recorrida	57

3.2.3	Torque electromagnético.....	59
3.2.4	Aceleración del Sistema	60
3.2.5	Corrientes estatóricas	60
3.3	ESCENARIO 100 KG	62
3.3.1	Velocidad del rotor.....	62
3.3.2	Distancia Recorrida	63
3.3.3	Torque Electromagnético.....	64
3.3.4	Aceleración del sistema.....	65
3.3.5	Aceleración del sistema.....	66
3.4	ESCENARIO 50 KG	67
3.4.1	Velocidad del rotor.....	68
3.4.2	Distancia recorrida	68
3.4.3	Torque electromagnético.....	70
3.4.4	Aceleración del sistema.....	71
3.4.5	Corriente estatóricas.....	72
3.5	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	73
	CONCLUSIÓN	76
	BIBLIOGRAFÍA.....	81

ÍNDICE FIGURAS

Figura 1-1 Ejemplificación tensión.....	14
Figura 1-2 Matriz de componentes d y q	23
Figura 1-3 Variable de acoplamiento	24
Figura 2-1 Especificaciones del motor	32
Figura 2-2. Ejemplo de Correa Transportadora	35
Figura 2-3. Diagrama de Fuerzas.....	38
Figura 2-4. Modelo Completo de la correa Transportadora.....	40
Figura 2-5. Ecuaciones señales sinusoidales trifásicas.....	41
Figura 2-6. Ecuaciones Diferenciales del comportamiento del motor	42
Figura 2-7. Modelo dinámico del motor de inducción.....	45
Figura 3-1. Gráfica de Simulación Velocidad de Rotor.....	50
Figura 3-2. Gráfica “Distancia Recorrida” operando bajo una carga de 200 kg.	51
Figura 3-3. Gráfica del “Torque “operando bajo una carga de 200 kg.	52
Figura 3-4. Gráfica de “Aceleración” operando bajo una carga de 200 kg.....	54
Figura 3-5. Gráfica “Corrientes Estatoricas” operando bajo una carga de 200 kg.	56
Figura 3-6. Gráfica “Velocidad de Rotor” operando con una carga de 150 kg.	57
Figura 3-7. Gráfica “Distancia Recorrida” operando bajo una carga de 150 kg.	58
Figura 3-8. Gráfica del “Torque “operando bajo una carga de 150 kg.	59
Figura 3-9. Gráfica del “Aceleración “operando bajo una carga de 150 kg.....	60
Figura 3-10. Gráfica “Corrientes Estatoricas” operando bajo una carga de 150 kg.	61
Figura 3-11. Gráfica “Velocidad de Rotor” operando con una carga de 100 kg.	62
Figura 3-12. Gráfica “Distancia Recorrida” operando bajo una carga de 100 kg.	63
Figura 3-13. Gráfica del “Torque “operando bajo una carga de 100 kg	65
Figura 3-14. Gráfica del “Aceleración “operando bajo una carga de 100 kg.....	65
Figura 3-15. Gráfica “Corrientes Estatoricas” operando bajo una carga de 100 kg.	67
Figura 3-16. Gráfica “Velocidad de Rotor” operando con una carga de 50 kg.	68
Figura 3-17. Gráfica “Distancia Recorrida” operando bajo una carga de 50 kg.	69
Figura 3-18. Gráfica del “Torque “operando bajo una carga de 50 kg.	70

Figura 3-19. Gráfica “Aceleración” operando bajo una carga de 50 kg.....71
Figura 3-20. Gráfica “Corrientes Estatoricas” operando bajo una carga de 50 kg.72

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Modelo Referencia del motor27
Tabla 2-2 Especificaciones de la correa transportadora.....30

SIGLAS Y SIMBOLOGÍA

A. SIGLAS:

AREF	: Analog Reference (Referencia Analógica).
COM3	: Comunicaciones 3.
CPU	: Central Processing Unit (Unidad Central de Procesamiento).
DC	: Direct Current (Corriente Continua).
EEPROM	: Electrically Erasable Programmable Read Only Memory (Memoria de Solo Lectura Programable y Borrable Eléctricamente).
HMI	: Human Machine Interface (Interfaz Hombre Máquina).
I2C	: Inter Integrated Circuit (Circuito Inter-Integrado).
ICSP	: In Circuit Serial Programming (Programación Serie en Circuito).
IP	: Internet Protocol (Protocolo de Internet).
ISA	: International Society of Automation (Sociedad Internacional de Automatización).
LabVIEW	: Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench (Laboratorio de Ingeniería de Instrumentos Virtuales Workbench).
LPT	: Line Print Terminal (Terminal de Impresión de Línea).
LED	: Light Emitting Diode (Diodo Emisor de Luz).
NI	: National Instruments (Instrumentos Nacionales).
Vis	: Virtual Instruments (Instrumentos Virtuales).
OSI	: Open Systems Interconnections (Interconexiones de Sistemas Abiertos).
PC	: Personal Computer (Computador Personal).
PCB	: Printed Circuit Board (Placa de Circuito Impreso).
PLC	: Programmable Logic Controller (Controlador Lógico Programable).
PIC	: Programmable Integrated Circuit (Circuito Integrado Programable).
P&ID	: Piping and Instrumentation Diagram (Diagrama de tuberías e instrumentación).
PWM	: Pulse Width Modulation (Modulación por Ancho de Pulsos).

SPI : Serial Peripheral Interface (Interfaz de Periféricos Serie).
SRAM : Static Random Access Memory (Memoria Estática de Acceso Aleatorio).
TCP : Transmission Control Protocol (Protocolo de Control de Transmisión).
UART : Universal Asynchronous Receiver/ Transmitter (Transmisor/ Receptor Asíncrono Universal).
VDC : Voltage of Direct Current (Current (Voltaje de Corriente Continua).
WWW : World Wide Web (Red Mundial).

B. SIMBOLOGÍA:

A : Ampere. Unidad de intensidad de corriente eléctrica.
b : Bit. Unidad mínima de información empleada en informática.
B : Byte. Unidad de información formada por una secuencia de bits adyacentes que equivale a un conjunto ordenado de 8 bits.
Bd : Baudios. Unidad de medida que representa el número de símbolos por segundos en un medio de transmisión digital.
cm : Centímetros. Medida de longitud que corresponde a la centésima parte de un metro.
Hz : Hertz. Unidad de frecuencia.
mA : Miliamper. Medida de intensidad de corriente eléctrica que corresponde a la milésima parte de un Amper.
ms : Milisegundos. Medida de tiempo que corresponde a la milésima parte de un segundo.
Ohm : Ohm. Unidad derivada de la resistencia eléctrica y su símbolo es Ω .
s : Segundos. Unidad de tiempo.
V : Volts. Unidad de la tensión eléctrica, potencial eléctrico y fuerza electromotriz.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de transporte son esenciales en la industria moderna, permitiendo el traslado eficiente y seguro de materiales en sectores como minería, manufactura, agroindustria, logística y construcción. Mejoran la productividad, optimizan recursos y reducen la carga física del trabajador.

Las correas transportadoras destacan por mover grandes volúmenes de forma continua y con bajo consumo energético, conectando etapas productivas y reduciendo la intervención manual. Se usan para trasladar minerales, cosechas o paquetería. Surgieron en el siglo XIX en minería, con materiales simples y tracción mecánica, evolucionando con caucho, acero, motores eléctricos, controles de velocidad y automatización, lo que mejoró eficiencia, flexibilidad y precisión.

Hoy combinan estructuras robustas, materiales duraderos y accionamientos eficientes, con diseño modular adaptable a cada proceso, integrándose con tecnologías para cumplir estándares de productividad y sostenibilidad.

Este trabajo de título modela y simula el comportamiento dinámico de una correa transportadora, analizando variables como velocidad angular, tensión, torque, aceleración, carga y consumo energético. Con Matlab/Simulink se desarrolló un modelo que reproduce condiciones reales y escenarios como arranque, frenado o sobrecarga, permitiendo optimizar energía, reducir costos, prolongar la vida útil, prevenir fallas y diseñar controles o mantenimientos predictivos.

El modelo integra mecánica, electricidad, control y dinámica en una herramienta de análisis y mejora sin intervenir el sistema físico, reduciendo riesgos y tiempos. Este trabajo aporta al conocimiento técnico y metodológico de los sistemas de transporte automatizados, demostrando que la simulación es clave para aumentar eficiencia, confiabilidad y adaptabilidad de las correas transportadoras frente a las demandas actuales y futuras.

CAPÍTULO 1: ESTADO DEL ARTE

1. ESTADO DEL ARTE

Los sistemas de transportes constituyen uno de los pilares fundamentales de la industria moderna. Su función principal es facilitar el movimiento eficiente, continuo y seguro de materiales y productos dentro de los distintos procesos productivos, ha hecho que su implementación sea esencial en una amplia gama de sectores industriales. Desde la minería hasta la industria alimentaria, pasando por la manufactura, la agricultura, la logística, la construcción y muchas otras áreas, los sistemas de transportes automatizados permiten no solo mejorar la productividad y reducir los tiempos de operación, sino también optimizar los recursos disponibles, minimizar el desgaste de los trabajadores y garantizar un flujo de trabajo ordenado y controlado.

Las correas transportadoras también conocidas como bandas transportadoras, son actualmente uno de los sistemas de transportes más utilizados a nivel industrial. Esto se debe a su capacidad para mover grandes volúmenes de material de forma continua, sin interrupciones con un bajo consumo energético relativo y con altos niveles de fiabilidad.

Estos sistemas permiten conectar distintas etapas de un proceso productivo, automatizando el traslado de insumos, productos intermedios o mercancías terminadas, reduciendo la intervención manual y asegurando una mayor uniformidad y control en el movimiento. En sectores como la minería las correas transportadoras son utilizadas para movilizar toneladas de minerales desde el punto de extracción hasta las plantas de procesamiento. En agroindustria para clasificar y transportar cosechas y en el sector de logística para el manejo de paquetería en almacenes automatizados y centro de distribución.

Históricamente, el desarrollo de estos sistemas se remonta a inicios del siglo XIX, con sus primeras aplicaciones en la industria minera, donde se requería trasladar materiales pesados como carbón o piedra a distancias considerables, reduciendo la necesidad de transporte manual o animal. Las primeras correas eran simples, hechas de cuero o telas reforzadas y eran impulsadas por poleas conectadas a fuentes de energía rudimentarias, como ruedas hidráulicas o vapor. Con el avance del tiempo estas tecnologías comenzaron a evolucionar, se incorporaron nuevos materiales más resistentes y duraderos como caucho vulcanizado o acero. Posteriormente con el

desarrollo de la electricidad como fuente de energía, los sistemas de tracción se modernizaron y con ellos aumentaron las capacidades de carga, la eficiencia de los motores y la velocidad del transporte.

A lo largo del siglo XIX las correas transportadoras han experimentado un desarrollo progresivo y sostenido, impulsadas principalmente por los avances en áreas como la electrónica, la automatización industrial y posteriormente la informática. Estos avances han permitido transformar lo que inicialmente era un sistema de mecánico simple en una solución tecnológica sofisticada, adaptada a las crecientes demandas de eficiencia, flexibilidad y versatilidad en los entornos industriales. Uno de los hitos más importantes de esta evolución fue la incorporación de sistemas de control de velocidad, que posibilitaron una regulación más precisa del movimiento de la correa, ajustando su funcionamiento a las necesidades específicas de cada proceso productivo. Esto fue especialmente relevante en entornos de producción continua, donde una variación mínima en la velocidad puede afectar directamente la calidad, el ritmo de trabajo o la sincronización entre distintas etapas del sistema.

Actualmente las correas transportadoras modernas combinan estructuras mecánicas robustas, materiales de alta durabilidad y sistemas de accionamiento eficientes, ofreciendo un rendimiento confiable y adaptado a los desafíos operativos contemporáneos. Además, su diseño modular y versátil permite personalizar su configuración según las necesidades del proceso ya sea en términos de longitud, inclinación, tipo de superficie o capacidad de carga. Esta flexibilidad ha hecho que su implementación se mantenga vigente en el tiempo consolidándose como una tecnología madura, pero en constante perfeccionamiento capaz de integrarse con otras tecnologías emergentes y responder a los estándares de productividad y sostenibilidad que exige la industria actual.

En este contexto histórico y tecnológico el presente trabajo de título se centra en el estudio detallado y análisis funcional de un sistema de correa transportadora, con el objetivo principal de modelar y simular su comportamiento dinámico. Esta aproximación permite comprender en profundidad las interacciones entre los distintos componentes del sistema tanto mecánicos como eléctricos y evaluar el impacto que tienen diferentes variables operativas sobre su rendimiento global. En particular este pretende identificar los factores críticos que afectan la

eficiencia del sistema tales como la velocidad angular del motor, la tensión aplicada sobre la correa, el torque generado por el motor, la aceleración del sistema, la variación de la carga transportada y los niveles de consumo energético. Estos elementos serán modelados y analizados mediante el software Matlab, utilizando su entorno de simulación gráfico Simulink, el cual permite crear representaciones visuales de sistemas dinámicos complejos, integrando señales, bloques de control, relaciones matemáticas y condiciones de frontera de manera flexibles y precisa.

1.1 CORREA TRANSPORTADORA

El sistema de correa transportadora constituye uno de los componentes fundamentales en la infraestructura de los procesos industriales contemporáneos, debido a su capacidad para realizar el transporte eficiente, continuo y seguro de los materiales entre distintos puntos dentro de una planta, centro de procesamiento o instalación logística. Este tipo de sistema ha sido concebido para minimizar la intervención humana, reducir los tiempos de traslados y mantener un flujo constante de producción, lo que convierte una solución estratégica para optimizar el rendimiento operativo en diversos entornos industriales.

La principal función de una correa transportadora es mover materiales ya sean materias primas, productos semielaborados o artículos terminados de forma controlada garantizando que lleguen al destino adecuado sin sufrir daños, pérdidas o alteraciones. Esta característica ha hecho que su uso se generalice en sectores altamente exigentes en cuanto eficiencia y seguridad operativa. Por ejemplo, en la industria minera, las correas transportadoras permiten trasladar toneladas de mineral desde los puntos de extracción hasta las plantas de chancado y procesamiento, muchas veces a lo largo de distancias extensas incluso en terrenos irregulares. En la construcción se utilizan para movilizar materiales como cemento, arena, escombros o ladrillos en obras de gran envergadura. En la manufactura facilitan la automatización de líneas de ensamblaje y el movimiento de piezas entre estaciones de trabajo. En la industria alimentaria se emplean para el transporte higiénico y ordenado de productos en cadenas de procesamiento y

envasado. Y en la logística son clave en centro de distribución y bodegas donde contribuyen a la clasificación, empaquetado y envío de mercancías.

Una de las principales ventajas de este sistema es su versatilidad ya que puede adaptarse a distintos tipos de materiales (desde productos livianos y frágiles hasta cargas pesadas y abrasivas), condiciones ambientales (interiores o exteriores, con presencia de polvo, humedad o temperaturas extremas), y configuraciones de espacios (recorridos retos, curvos, inclinados o a diferentes alturas). Gracias a esta adaptabilidad las correas transportadoras no solo mejoran la eficiencia productiva, sino que también contribuyen a la seguridad laboral, al reducir la necesidad de transporte manual de cargas pesadas o repetitivas, disminuyendo así el riesgo de accidentes o lesiones por esfuerzo físico.

Además, las correas transportadoras permiten una operación continua, lo que significa que pueden funcionar por largos periodos sin interrupciones, incrementando el volumen de producción y reduciendo significativamente los tiempos de traslado entre etapas del proceso. Esta continuidad es especialmente valiosa en la industria que operan bajo esquemas de alta demanda o turnos interrumpidos. En términos económicos la implementación de sistema de transporte por correa reduce costos operativos a largo plazo, al disminuir el uso de maquinaria pesada para transporte interno y optimizar el aprovechamiento del tiempo y los recursos humanos.

En conclusión, el sistema de correa transportadora no solo cumple una función mecánica de traslado, sino que constituye un elemento estratégico en la cadena de valor de cualquier industria moderna. Su presencia resulta indispensable en cualquier instalación que busque maximizar su eficiencia, productividad y seguridad, siendo una solución probada confiable y en constante evolución acorde a las necesidades crecientes de la producción industrial global.

Las funciones principales de una correa transportadora son las siguientes:

- **Transporte continuo de materiales:** facilita el movimiento de materiales a granel (minerales, cemento, grano, etc.) o productos empaquetados a lo largo de distancias horizontales, inclinadas o incluso verticales dentro de una planta de producción o distribución.

- **Reducción de tiempos de transporte:** Permite el desplazamiento rápido y constante de productos, optimizando los tiempos de producción y reduciendo costos operativos en comparación con otros métodos de transporte como camiones o grúas.
- **Automatización del proceso de manejo de materiales:** La correa transportadora es una parte esencial en los sistemas automatizados de manejo de materiales, ya que integra una cadena continua de operaciones sin intervención manual.
- **Facilitación del transporte de materiales pesados y voluminosos:** Gracias a la posibilidad de diseñar correas de diferentes longitudes, capacidades de carga y materiales resistentes las correas transportadoras pueden adaptarse para transportar materiales extremadamente pesados o abrasivos.

El funcionamiento de una correa transportadora está basado en la interacción de varios componentes claves, entre los cuales están:

- **Motor Eléctrico:** Generalmente alimentado por un motor de inducción trifásico, que proporciona la potencia necesaria para mover la correa a una velocidad controlada. El motor es responsable de transmitir el movimiento rotatorio al tambor de accionamiento.
- **Rodillos:** Dispositivos que soportan la correa a lo largo de su trayectoria, reduciendo la fricción y permitiendo que la correa se desplace de manera fluida. Los rodillos están ubicados en intervalos regulares a lo largo de la correa para mantener su estabilidad.
- **Tambor de accionamiento:** Componente que recibe el impulso del motor y lo transmite a la correa. El Tambor también está involucrado en el control de la velocidad de la correa transportadora.
- **Correa:** El elemento que efectivamente transporta los materiales. Puede ser de diferentes materiales (como PVC, goma o acero) dependiendo del tipo de material a transportar y las condiciones operativas.

El proceso de operación se basa en el principio de transporte continuo, donde el motor acciona el tambor de la correa, haciendo que esta se desplace sobre los rodillos. La velocidad de la correa puede ser ajustada para optimizar el proceso de transporte dependiendo de la carga y la distancia a recorrer. Cuando el motor gira el tambor, la correa avanza y mueve los materiales de un punto a otro.

Es importante destacar que, al igual que en otros sistemas industriales, el funcionamiento eficiente de una correa transportadora depende de varios factores:

- **La tensión de la correa:** Mantener la tensión adecuada en la correa es crucial para evitar el deslizamiento o desgaste prematuro.
- **La velocidad de operación:** La velocidad de la correa debe ser adecuada al tipo de material transportado y al proceso en el que se encuentra involucrado.
- **El mantenimiento del sistema:** Para asegurar una operación continua y eficiente es fundamental realizar un mantenimiento regular especialmente en los rodillos y en el motor.

El sistema de correa transportadora puede ser alimentado de diferentes maneras dependiendo de las necesidades de cada instalación.

Puntos importantes dentro del sistema de correa transportadora:

- **Punto de alimentación:** Es el lugar donde los materiales son cargados en la correa transportadora. Este punto puede ser alimentado mediante tolvas, conectores o equipos automáticos.
- **Punto de descarga:** Es el lugar donde los materiales son descargados o depositados, que puede estar ubicado en el extremo opuesto al de la alimentación.

El sistema de correa transportadora es esencial para garantizar la eficiencia de los procesos industriales y reducir los costos operativos, ya que permite mover grandes cantidades de materiales de manera rápida, segura y con bajo nivel de intervención humana.

1.2 ECUACIONES DE FUNCIONAMIENTO CORREA TRANSPORTADORA

El análisis de una correa transportadora implica una revisión detallada de los principales factores físicos y energéticos que determinan su rendimiento y comportamiento en operación. Este proceso requiere considerar distintos aspectos clave que influyen directamente en su funcionamiento entre los que se destacan las fuerzas que actúan sobre la correa y la carga transportada, la dinámica del movimiento a lo largo del recorrido, la eficiencia del sistema de accionamiento que impulsa la correa y la cantidad de energía consumida durante la operación. Entender y modelar estos elementos es fundamental para evaluar si el sistema está bien dimensionado, si su consumo energético es razonable y si existen puntos críticos donde podrían presentarse pérdidas o ineficiencias.

En primer lugar, se deben considerar las fuerzas resistentes que el sistema debe vencer para mantener la correa en movimiento. Estas incluyen la fricción entre la correa y los rodillos de soporte, el peso del material transportado, las pendientes o las inclinaciones del recorrido, así como las inercias asociadas a los arranques o frenados. Además, es necesario identificar la fuerza de tracción que debe ejercer el motor para garantizar un desplazamiento constante en la correa sin deslizamientos ni interrupciones.

Finalmente, para poder representar y estudiar estos aspectos de manera cuantitativa, es necesario utilizar una serie de ecuaciones físicas que permitan modelar el sistema con base de principios de la mecánica y la energía. Estas ecuaciones sirven para calcular, por ejemplo, la tensión mínima y máxima de la correa, la potencia mecánica requerida, el torque en el eje del motor y la energía total consumida en función del tipo de carga y las condiciones de operación.

A continuación, se presentan las expresiones fundamentales que permiten describir matemáticamente el comportamiento de un sistema de correa transportadora. Estas fórmulas serán la base para el modelo de simulación, el cual permite analizar distintas situaciones prácticas y obtener conclusiones que contribuyan a la optimización del sistema.

1.2.1 Fuerza Normal

Es una de las fuerzas fundamentales a considerar en el análisis del sistema de correa transportadora. Se trata de la fuerza que ejercen los rodillos de soporte sobre la correa, actuando de forma perpendicular a la superficie de contacto entre ambos elementos. Esta fuerza cumple un rol importante en el equilibrio del sistema, ya que contrarresta el peso que actúa hacia abajo por efecto de gravedad, tanto del propio peso de la correa como del material que está transportando sobre ella.

En estas condiciones ideales donde la superficie es horizontal y sin inclinación, la fuerza normal tiene un valor igual al peso total que soporta el rodillo. Sin embargo, si el sistema se encuentra en un tramo inclinado, esta fuerza puede variar dependiendo del ángulo de inclinación y la distribución de la carga. También puede verse afectada por la dinámica del movimiento, especialmente si hay aceleraciones o frenados, lo que modifica momentáneamente la presión ejercida sobre los rodillos.

La magnitud de esta fuerza es clave para calcular fuerzas asociadas al movimiento, como la fuerza de fricción que depende directamente de la fuerza normal. Una fuerza normal mayor implica una mayor resistencia por fricción, lo cual influye en la potencia que debe generar el motor para mover la correa.

La ecuación que describe esta fuerza se representa de la siguiente forma:

$$F_N = m * g$$

Donde:

- F_N es designada como fuerza normal [N].
- m es la masa total de la correa y el material transportado [Kg].
- g es la aceleración debido a la gravedad [9,81m/s²].

1.2.2 Fuerza de fricción

La fuerza de fricción es una de las fuerzas más relevantes en el análisis del sistema de correa transportadora, ya que representa la resistencia al movimiento que se genera entre la correa y los rodillos sobre los que se apoya. Esta fuerza actúa en dirección opuesta al desplazamiento de la correa y por lo tanto debe ser vencida por el sistema de accionamiento para mantener el movimiento transportado.

La fricción surge debido al contacto entre dos superficies en este caso, la superficie inferior de la correa y los rodillos de soporte y su magnitud depende directamente de los factores principales: el coeficiente de fricción entre ambos materiales y la fuerza normal que actúa perpendicularmente sobre la correa. El coeficiente de fricción representado por la letra μ es una constante que varía según las propiedades físicas de las superficies en contacto (por ejemplo, tipo de material, textura, condiciones de limpieza, presencia de lubricantes o contaminantes, etc.) A mayor coeficiente de fricción o a mayor fuerza normal, mayor será la resistencia al movimiento.

Esta fuerza debe ser cuidadosamente considerada durante el diseño y análisis del sistema, ya que incrementa el esfuerzo que debe realizar el motor para poner en marcha o mantener en movimiento la correa, afectando directamente el consumo energético y la eficiencia del sistema. Además, un exceso de fricción puede provocar desgaste prematuro tanto en la correa como en los rodillos, generando mayores costos de mantenimiento y reduciendo la vida útil del sistema.

La ecuación que describe la fuerza de fricción es:

$$F_f = \mu * F_N$$

Donde:

- F_f es designada como fuerza de fricción [N].
- μ es el coeficiente de fricción [adimensional].
- F_N es designada como fuerza normal [N].

1.2.3 Fuerza del motor

El motor de la correa transportadora cumple una función fundamental dentro del sistema, ya que es el encargado de proporcionar la fuerza necesaria para poner en movimiento la correa y con ella el material transportado. Este motor transmite energía a través del tambor de accionamiento sobre cuya superficie se aplica una fuerza tangencial. Esta fuerza actúa en dirección al movimiento de la correa y es generada como resultado del torque que el motor imprime sobre el eje del tambor.

Para que el sistema funcione correctamente la fuerza total generada por el motor debe ser suficiente no solo para iniciar el movimiento, sino también para mantenerlo de forma constante y eficiente. Esto implica que la fuerza debe superar todas las resistencias presentes en el sistema, siendo la más relevante la fuerza de fricción entre la correa y los componentes mecánicos (rodillos, poleas, estructura de soporte). Además, debe compensar el peso del material transportado, posibles pendientes en el recorrido y cualquier pérdida adicional que surja por condiciones específicas del entorno o el desgaste de los elementos del sistema.

La relación entre el torque del motor y la fuerza tangencial aplicada sobre la correa está dada por una expresión sencilla pero clave en el diseño y análisis del sistema. Esta fuerza puede expresarse como:

$$F_{motor} = \frac{T_m}{r}$$

Donde:

- F_{motor} es denominada la fuerza lineal generada por el motor en el borde de la polea (tambor) (N).
- T_m es denominado el torque del motor [N*m].
- r es denominado el radio de la polea (tambor) [m].

1.2.4 Tensión de la correa

Uno de los aspectos más importantes en el análisis de una correa transportadora es determinar el esfuerzo mecánico que debe soportar la correa durante su funcionamiento, especialmente en los puntos de contacto con los tambores. Este esfuerzo se traduce en términos de tensión y su correcta evaluación es fundamental tanto para garantizar la eficiencia del sistema como para prevenir fallos estructurales o desgastes prematuros en la correa. En particular la diferencia de tensión entre el lado tenso (entrada) y el lado flojo (salida) de la correa, al pasar por el tambor de accionamiento constituye un parámetro crítico del diseño y operación del sistema.

Esta diferencia de tensión conocida comúnmente como delta de tensión está directamente relacionada con la fuerza de fricción entre la correa y el tambor y esta es la que permite que la fuerza generada por el motor se transmita efectivamente a la correa sin que haya deslizamiento. Además, está influida por la carga transportada y las características del recorrido (longitud, inclinación, condiciones de operación). Cuando esta diferencia no es suficiente para vencer la fricción la correa puede patinar sobre el tambor, lo que genera pérdidas de energía y riesgo de daño al sistema.

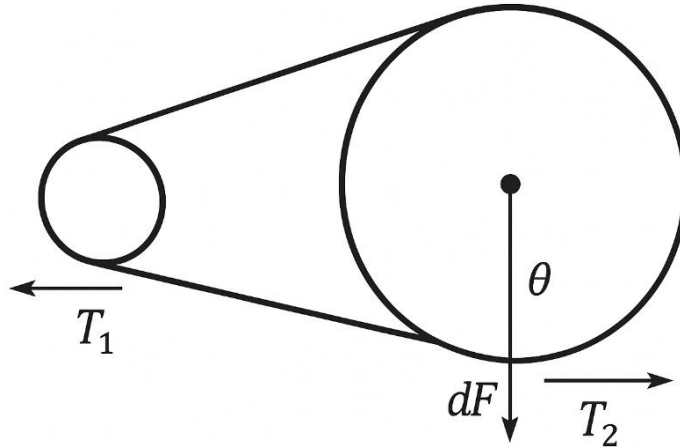
La tensión que la correa debe soportar depende del balance de fuerzas que actúan sobre ella y su análisis permite dimensionar correctamente tanto la correa como el sistema de accionamiento. Para evaluar esta tensión se utiliza una ecuación fundamental que relaciona las tensiones en el punto de entrada y salida del tambor con el coeficiente de fricción y ángulo de contacto entre la correa y el tambor. La ecuación se expresa como:

$$T_1 - T_2 = F_f + F_c$$

Donde:

- T_1 tensión en el tramo de retorno (lado flojo) antes de entrar al tambor.
- T_2 tensión en el tramo de trabajo (lado tenso) al salir del tambor.
- F_c fuerza ejercida por el peso del material transportado.
- F_f fuerza debida a la resistencia por contacto entre correa y tambor.

Se tiene la figura 1-1 como ejemplificación representando un diagrama de cuerpo libre para la interpretación de las tensiones.



Fuente: Elaboración propia, Excel.

Figura 1-1 Ejemplificación tensión.

1.2.5 Torque del motor

El torque del motor representa el esfuerzo rotacional que debe aplicar el motor para superar las resistencias del sistema y lograr el movimiento de la correa transportadora. Este torque es esencial para garantizar que la correa pueda moverse de manera continua y eficiente, especialmente cuando transporta carga. La principal resistencia a vencer es la fuerza de fricción que se genera entre la correa y los elementos mecánicos del sistema como los rodillos y tambores. Además, si la correa transporta materiales se debe considerar también el esfuerzo adicional que implica mover dicha carga a lo largo del recorrido.

Para calcular este torque se utiliza una relación simple pero fundamental, la cual es que el torque sea igual al producto de la fuerza motriz aplicada sobre el tambor y el radio del tambor de accionamiento. En otras palabras, mientras mayor sea la fuerza necesaria para mover la correa o mayor sea el radio del tambor, mayor será el torque que el motor debe generar.

La ecuación que describe esta relación es:

$$T_{motor} = F_{motor} * r_{tambor}$$

Donde:

- T_{motor} es el torque que el motor debe generar [N·m].
- F_{motor} es la fuerza tangencial aplicada al tambor [N]
- r_{tambor} es el radio del tambor de accionamiento [m].

1.2.6 Potencia consumida

La potencia consumida por el motor en un sistema de correa transportadora es una medida fundamental para entender el desempeño energético del sistema, ya que indica cuanta energía se requiere por unidad de tiempo para mantener en movimiento la correa y transportar la carga. Esta potencia depende directamente de dos factores principales: La fuerza generada por el motor en el tambor de accionamiento y la velocidad tangencial con la que se desplaza la correa.

En otras palabras, a mayor fuerza aplicada o mayor velocidad de operación mayor será la potencia requerida. Esta relación permite estimar el consumo energético del sistema y sirve como base para analizar su eficiencia, dimensionar correctamente el motor y prever el consumo eléctrico en condiciones de operación reales.

La ecuación para la potencia consumida es:

$$P_{mec} = F_{motor} * V$$

Donde:

- P_{mec} es la potencia mecánica del sistema [W].
- F_{motor} es la fuerza tangencial aplicada al tambor [N].
- V es la velocidad lineal de la correa [m/s], que se calcula a partir de la velocidad angular del tambor (ω) mediante:

$$V = \omega * r_{tambor}$$

Donde ω es la velocidad angular del tambor en rad/s y r_{tambor} su radio en metros.

Además, se tiene la potencia eléctrica consumida por el motor, la cual se calcula por la fórmula:

$$P_{consumida\ elec} = V_{elec} * I$$

Donde:

- $P_{consumida\ elec}$ es la potencia eléctrica consumida por el motor desde la red [W].
- V_{elec} es la tensión eléctrica del motor [V].
- I es la corriente que circula por el motor [A].

Se tiene una relación directa entre ambas potencias (mecánica y eléctrica), la cual se representa por:

$$P_{consumida\ elec} = \frac{P_{mec}}{\eta}$$

Donde:

- η es la eficiencia del motor.

1.2.7 Energía acumulada

La energía acumulada en el sistema representa la cantidad de energía que la correa transportadora ha almacenado o transferido mientras desplaza la carga. Esta energía se puede calcular a partir de la potencia consumida por el motor y el tiempo de operación:

$$E_{acumulada} = P_{consumida} * t$$

Donde:

- $E_{acumulada}$ es la energía acumulada en el sistema [J].
- t es el tiempo durante el cual el motor está operando.
- $P_{consumida}$ es la potencia consumida por el motor [W].

1.2.8 Eficiencia del motor

La energía del motor es un parámetro fundamental en el análisis del desempeño energético de un sistema de correa transportadora. Este valor indica el porcentaje de la energía eléctrica consumida que se convierte efectivamente en trabajo mecánico útil, es decir en la energía necesaria para mover la correa y transportar la carga. El resto de la energía se pierde en forma de calor, vibraciones, pérdidas por fricción interna o efectos electromagnéticos dentro del motor. Una mayor eficiencia implica un mejor aprovechamiento de la energía disponible, reduciendo el consumo eléctrico y los costos operativos.

Conocer la eficiencia del motor es esencial tanto para el dimensionamiento adecuado del sistema de accionamiento como para evaluar su impacto en el consumo energético total de la instalación. Además, permite comparar diferentes motores o estrategias de control desde un punto de vista energético.

La eficiencia del motor se puede expresar mediante la siguiente fórmula:

$$\eta = \frac{P_{mec}}{P_{consumida\ elec}}$$

Donde:

- $P_{consumida\ elec}$ es la potencia eléctrica consumida por el motor desde la red [W].
- η es la eficiencia del motor.
- P_{mec} es la potencia mecánica del sistema [W].

Esta relación permite cuantificar qué porcentaje de la energía eléctrica consumida se convierte efectivamente en trabajo mecánico, ayudando a identificar pérdidas y optimizar el rendimiento del sistema.

1.2.9 Aceleración

Durante la operación el sistema puede estar sometido a distintas fuerzas, como la fuerza generada por el motor, la fuerza de fricción o cualquier resistencia externa adicional, lo cual genera estas fuerzas una fuerza neta, que determina si el sistema acelera, mantiene su velocidad constante o desacelera. Por lo tanto, la aceleración es fundamental para diseñar perfiles de arranque suaves, evitar esfuerzos excesivos en los componentes mecánicos y garantizar una operación eficiente y segura.

La aceleración se puede calcular mediante la siguiente fórmula:

$$a = \frac{F_{motor} - F_{fricción}}{m}$$

Donde:

- a es la aceleración de la correa [m/s²].
- F_{motor} es la fuerza ejercida por el motor [N].
- $F_{fricción}$ es la fuerza de fricción que se opone al movimiento [N].
- m es la masa total del sistema, incluyendo la correa y la carga transportadora [kg].

Esta ecuación permite dimensionar correctamente el motor y diseñar estrategias de control que aseguren un funcionamiento estable y seguro del sistema.

1.2.10 Velocidad

La velocidad de la correa transportadora es una de las variables más importantes para el análisis y control del sistema ya que determina la rapidez con la que el material es desplazado de un punto a otro dentro del proceso industrial. Esta velocidad afecta directamente el tiempo de transporte, la capacidad de producción y el rendimiento general del sistema. Una velocidad adecuada asegura un flujo constante de materiales sin interrupciones, acumulaciones ni

desperdicios, mientras que una velocidad mal dimensionada puede provocar desbordes, atascos o incluso daños en el equipo.

La velocidad se puede expresar mediante la siguiente fórmula:

$$V = V_0 + a * t$$

Donde:

- V es la velocidad de la correa en el tiempo t [m/s].
- V_0 es la velocidad inicial de la correa [m/s].
- a es la aceleración [m/s²]
- t es el tiempo transcurrido desde el inicio del movimiento [s].

Esta relación permite predecir y controlar la velocidad de la correa a lo largo del tiempo, asegurando un funcionamiento eficiente y seguro del sistema.

1.3 TRANSFORMACIÓN (ABC → DQ)

El análisis y control de máquinas eléctricas trifásicas requiere comprender el comportamiento dinámico de sus variables eléctricas, las cuales, por su naturaleza sinusoidal y su desfase de 120° entre fases, presentan una complejidad significativa en su representación y estudio. Aun cuando el sistema opera en régimen permanente, las magnitudes de tensión y corriente varían continuamente en el tiempo, lo que dificulta la interpretación física y el diseño de estrategias de control precisas.

Para abordar esta problemática, se utilizan transformaciones matemáticas que permiten cambiar el marco de referencia desde el sistema trifásico original (a, b, c) hacia uno giratorio (d, q) que se mueve a la par del campo magnético. Este cambio de perspectiva convierte señales

alternas variables en el tiempo en magnitudes prácticamente constantes, lo que simplifica el modelado, el análisis y la implementación de controles modernos.

En este contexto, la transformación abc–dq adquiere una relevancia fundamental, ya que constituye la base del control vectorial y de los métodos contemporáneos de análisis electromecánico. A través de esta herramienta, se logra separar las componentes de flujo y par, facilitando la comprensión y regulación del comportamiento dinámico del motor.

El contenido que sigue desarrolla los principios de esta transformación, la función de los ejes d y q, el procedimiento conceptual para su obtención y su representación en forma matricial, estableciendo así los fundamentos teóricos necesarios para su aplicación en el control avanzado de máquinas eléctricas.

1.3.1 Idea central y motivación física

En un sistema trifásico, las tensiones, corrientes y flujos se presentan como señales sinusoidales en el tiempo, desfasadas 120° entre sí. Incluso cuando el motor opera en régimen permanente, las magnitudes eléctricas continúan variando continuamente, lo que dificulta tanto el análisis como el diseño de controladores y la interpretación de su comportamiento físico.

La transformada constituye una herramienta matemática que permite cambiar el marco de referencia: de un observador estacionario ligado a las fases a, b y c, a un marco que gira junto con el campo magnético, definido por los ejes d y q. En este sistema de referencia giratorio, las señales sinusoidales dejan de percibirse como oscilaciones y en condiciones de régimen estable, se comportan como valores prácticamente constantes. De este modo un problema originalmente en variables de corriente alterna (AC) se convierte en un problema de variables de corriente continua (DC), lo que facilita considerablemente su modelado y control.

En términos prácticos: la transformada permite separar la señal en una componente de flujo (d) y una componente de par (q). Esa separación es la base del control vectorial y de todos los análisis acoplados eléctricos-mecánicos modernos.

1.3.2 Función de los ejes d y q

El eje d (directo): Se elige normalmente alineado con el vector de flujo magnético de referencia (por ejemplo, el flujo del rotor o del estator según la orientación que se use). Las magnitudes proyectadas sobre d están íntimamente relacionadas con la excitación/flujo del núcleo magnético.

El eje q (cuadratura): Está 90° adelantado o retrasado respecto a d; las magnitudes proyectadas en q están asociadas a la capacidad de producir par. Al trabajar en este marco, uno puede “manejar” la excitación y el par por canales separados (idealmente), lo que facilita regulación y diseño de controladores.

1.3.3 Construcción conceptual para obtener d y q

La Transformada de Clarke es una herramienta matemática que permite convertir un sistema trifásico —formado por tres señales sinusoidales desfasadas entre sí 120 grados— en un sistema equivalente de dos ejes ortogonales denominados α (alfa) y β (beta).

El propósito de esta transformación es representar las tres variables trifásicas en un plano bidimensional sin perder información eléctrica relevante, ya que en un sistema equilibrado la suma de las tres fases es igual a cero. De esta forma, se reduce la complejidad del análisis y se obtiene una representación más sencilla y visual del comportamiento de las corrientes o tensiones.

En otras palabras, la Transformada de Clarke proyecta el sistema trifásico sobre dos ejes fijos en el espacio, permitiendo estudiar las magnitudes eléctricas como un vector giratorio en un plano estacionario. Esta representación resulta muy útil en el análisis de máquinas eléctricas, sistemas de potencia y técnicas de control de motores, ya que facilita la comprensión de cómo las variables trifásicas cambian en el tiempo.

Para obtener d y q se debe realizar dos pasos:

- 1) Reducción a un plano: La transformada se puede entender como dos operaciones conceptuales.

- Convertir las tres fases (a, b, c) en una representación en el plano (α , β). Este primer paso (a veces llamado transformada de Clarke) representa la tríada trifásica como un vector en un plano 2D.
- Rotar ese plano $\alpha\beta$ por un ángulo θ para alinearlo con la referencia deseada (por ejemplo, la dirección del campo magnético). La rotación da las componentes (d, q).

Matemáticamente se combinan en una sola matriz dependiente del ángulo θ , pero conceptualmente es útil pensar en esos dos pasos: proyección \rightarrow rotación.

2) Obtener θ : El ángulo θ define la orientación del marco dq respecto al marco físico. Puede elegirse de diferentes maneras:

- $\theta = \omega_e \cdot t$ (velocidad síncrona): cuadro giratorio en sincronía con la frecuencia de alimentación.
- $\theta =$ ángulo del flujo del rotor: usado en control orientado a flujo (mejor desacoplamiento flujo/torque).
- θ estimado por un seguimiento de fase: usado cuando la referencia debe ser robusta frente a variaciones de red o perturbaciones.
- La elección de θ afecta la interpretación física de d y q y la complejidad de control/estimación.

1.3.4 Forma matricial

Aplicando la convención de invariancia de potencia habitualmente utilizada en control, la transformada puede representarse en forma matricial. En este caso se incluyen únicamente los componentes d y q, considerando un sistema balanceado y despreciando el componente homopolar.

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ -\sin \theta & -\sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}$$

Fuente: Elaboración propia, realizada en MATLAB/Simulink

Figura 1-2 Matriz de componentes d y q

Como se puede ver en la figura 1-2, la matriz depende de θ (el ángulo de referencia). El factor $2/3$ obedece a la convención de potencia invariante (casi siempre la usada en control) que hace que la potencia instantánea en abc sea igual a la potencia representada en dq.

1.3.5 Interpretación física

La Transformada de Park se aplica después de la Transformada de Clarke y su función es trasladar el sistema estacionario (a- β) a un sistema de coordenadas rotatorias denominado d-q, que gira a la misma velocidad angular que el campo magnético o el rotor de la máquina eléctrica.

Esta transformación tiene como principal ventaja que convierte variables alternas (sinusoidales y cambiantes en el tiempo) en variables continuas (constantes en régimen permanente).

Esto simplifica enormemente el análisis y el control de máquinas eléctricas, ya que permite tratar una máquina de corriente alterna como si fuese una de corriente continua, facilitando el diseño de controladores como el Control Orientado al Campo (FOC).

En términos físicos, el eje d (directo) se alinea con el flujo magnético principal del motor, mientras que el eje q (en cuadratura) representa la componente responsable de generar el par electromagnético. Así, la Transformada de Park permite separar y controlar de manera independiente el flujo y el par, lo que resulta esencial en aplicaciones de control vectorial de motores.

Al obtener una tensión equilibrada sin distorsión v_a al aplicar la transformada se obtendrá aproximadamente. $v_d = \text{constante}$ (proporcional a V_m) y $v_q \approx 0$ (o viceversa dependiendo de la fase). Es decir: desde el marco que gira a la misma velocidad, la onda se detiene y se ve como un valor DC. Ese fenómeno es la razón práctica por la que la transformada simplifica las ecuaciones.

1.3.6 Acoplamiento ω

Cuando se transforma variables de un marco fijo a uno giratorio y luego se diferencian en el tiempo, aparece un término adicional debido a la variación de la matriz de rotación.

Donde:

$x_{dq} = T(\theta(t)) x_{abc}$ la transformada. Entonces:

$$\frac{d}{dt} x_{dq} = T(\theta) \frac{d}{dt} x_{abc} + \frac{dT(\theta)}{dt} x_{abc}.$$

Fuente: Libro de máquinas eléctricas de Javier Sanz Feito

Figura 1-3 Variable de acoplamiento

El término de $\frac{dT}{dt}$ incorpora $\theta = \omega$ y produce rotaciones infinitesimales que se producen en componentes en sumas/restas de la forma ω^* (componente en el otro eje).

Físicamente refleja que, aunque desde el marco dq la señal pueda ser DC en régimen, el hecho de que el marco gire añade efectos dinámicos: una variación de corriente en d genera un efecto en q proporcional a la velocidad angular del marco. Esos términos son responsables del acoplamiento dinámico entre ejes y no son artefactos matemáticos: representan la interacción entre rotación y campos magnéticos.

1.3.7 Aplicación e interpretación

- Equilibrio en el sistema: Se debe balancear el sistema donde la versión dq sin componente 0 asume balance perfecto entre fases. Si hay desequilibrio o

componente homopolar (neutro activo), aparecen errores y oscilaciones en dq; en ese caso hay que incluir la componente 0 o usar técnicas avanzadas.

- Control vectorial: la transformada permite controlar i_d e i_q por separado como si fueran dos lazos independientes (uno de flujo, otro de par), lo que da una respuesta dinámica similar a la de un motor ideal.
- Modelado y observadores: modelos de estado, observadores de velocidad o de flujo, y estimadores de par se implementan con sencillez en dq.
- La transformada es más que una fórmula: es un cambio de marco físico que hace visible la estructura funcional del motor, disminuye la complejidad matemática y habilita estrategias de control y análisis que de otra manera serían muy costosas o imprecisas.

En resumen, sin la Transformada de Park, el análisis dinámico del motor de inducción sería mucho más complejo debido a la naturaleza alterna de las señales trifásicas. Su uso convierte el sistema en uno más intuitivo, eficiente y adecuado para simulaciones y diseños de control.

1.4 OBJETIVOS

A continuación, se muestra el objetivo general y los objetivos específicos que se cumplirán en el proyecto. Estos permiten obtener una idea clara y definida de lo que se busca demostrar. Además, serán la principal guía para el desarrollo de este estudio.

1.4.1 Objetivo General

Analizar y modelar el comportamiento dinámico de un sistema de correa transportadora, considerando tanto sus variables mecánicas como eléctricas, para optimizar su operación y control.

1.4.2 Objetivos específicos

- Investigar y revisar el estado del arte de los sistemas de correa transportadora en aplicaciones industriales.
- Identificar y analizar las variables mecánicas y eléctricas que influyen en el desempeño del sistema.
- Desarrollar y simular un modelo dinámico del sistema de correa transportadora para evaluar su comportamiento bajo distintas condiciones de carga.
- Comparar y evaluar diferentes estrategias de control y métodos de alimentación eléctrica para mejorar la eficiencia y estabilidad del sistema.

CAPÍTULO 2: PLANTAMIENTO Y DESAROLLO

2. PLANTEAMIENTO Y DESARROLLO

Para el diseño y análisis de sistemas de accionamiento industrial, es fundamental comprender el funcionamiento de los motores eléctricos que los impulsan. En este sentido, el motor de inducción trifásico destaca por sus características y aplicaciones.

El motor de inducción trifásico es un componente fundamental en aplicaciones industriales debido a su robustez, bajo mantenimiento y capacidad para operar eficientemente bajo distintas condiciones de carga. Su funcionamiento se basa en el principio de inducción electromagnética, en el cual una corriente alterna trifásica aplicada al estator genera un campo magnético rotatorio que induce una corriente en el rotor, produciendo así el torque necesario para el movimiento mecánico.

Para modelar su comportamiento dinámico en entornos de simulación como MATLAB/Simulink se utiliza una transformación de variables a un sistema de referencia rotatorio dq.

Este sistema permite analizar el motor en forma desacoplada, facilitando la implementación de estrategias de control.

En este trabajo de título la correa transportadora se encuentra accionada por un motor de inducción trifásico, el cual se utiliza como referencia el modelo real (Siemens 1LE1003-1DA52-4AA4). Sin embargo, en lugar de trabajar directamente con un bloque predefinido de motor estandarizado en Simulink, se optó por plantear un modelo matemático dinámico basado en las ecuaciones fundamentales que rigen el comportamiento de este tipo de máquinas. Esta elección no responde a un simple criterio de abstracción, sino a la necesidad de contar con un modelo más flexible, personalizable y analíticamente útil para los objetivos del estudio.

El uso de un bloque estandarizado de motor en MATLAB/Simulink restringe el análisis a parámetros predefinidos y una estructura de simulación relativamente rígida, lo que limita la posibilidad de realizar modificaciones profundas o de explorar condiciones de operación no contempladas en la librería del software. En contraposición, el planteamiento de un modelo matemático en coordenadas dq permite representar con mayor nivel de detalle la interacción electromagnética entre el estator y el rotor a través de un conjunto de ecuaciones diferenciales que describen corrientes, flujos magnéticos, tensiones y par electromagnético. Esta formulación

otorga la capacidad de evaluar de manera explícita la influencia de los parámetros eléctricos y mecánicos en la dinámica del motor, y posibilita su ajuste en función de escenarios específicos de operación, como los asociados al transporte de carga en la correa transportadora.

Uno de los principales beneficios de este enfoque es que se pueden introducir variaciones en los parámetros y condiciones de trabajo sin las restricciones que impone un modelo pre configurado. Esto incluye, por ejemplo, estudiar el efecto de cambios en la fricción viscosa, en la masa transportada, en el radio de la polea o incluso en la alimentación de una fuente también modelada y no prefijadas por MATLAB/SIMILINK. De esta manera, el modelo no solo refleja la operación bajo condiciones nominales, sino que también sirve como herramienta de análisis ante fallas, transitorios o escenarios no convencionales que aportan valor a la investigación.

La implementación de un modelo matemático en Simulink se revela como una estrategia clave, ya que permite construir un sistema flexible, configurable y analíticamente robusto. Esta aproximación evita las limitaciones de los motores predefinidos y amplía la gama de simulaciones posibles, proporcionando información más rica y aplicable a entornos industriales.

En la tabla 2-1 se dejará una tabla de referencia del motor.

Tabla 2-1 Modelo Referencia del motor

MODELO DE MOTOR REFERENCIA	
Modelo Sugerido	Siemens 1LE1003-1DA52-4AA4
Potencia Nominal	7.5 kW (10 HP)
Tension Nominal	380 V (Conexion en estrella)
Corriente Nominal	14,6 [A]
Frecuencia Nominal	50 [Hz]
Velocidad Nominal	1475 [RPM]
Torque Nominal	$T = \frac{7500}{2\pi * 1475/60} \approx 48.5 \text{ Nm}$
Tipo de Trabajo	S1 (Servicio Continuo)
Clase de Protección	IP55 (Proteccion contra polvo y agua)
Clase de Aislamiento	F
Eficiencia	IE2 o IE3 (Según configuración)

Fuente: Elaboración propia, realizada en Excel

El siguiente diagrama de la figura 2-1, representa la implementación en entorno MATLAB/Simulink del modelo dinámico de un motor de inducción trifásico, construido a partir del principio de funcionamiento basado en la transformación de variables al sistema de referencia rotatorio d-q. Esta representación gráfica permite visualizar y entender cómo se interrelacionan las diferentes magnitudes eléctricas y mecánicas que definen el comportamiento del motor, haciendo posible analizar tanto el estado transitorio como estacionario del sistema en condiciones variables de operación.

En la parte izquierda del diagrama de la figura 2-1, se encuentran los bloques encargados de calcular la evolución de las corrientes del estator en los ejes directos (d) y en cuadratura (q). Estas corrientes están influenciadas por múltiples variables de entrada: los voltajes aplicados al estator (V_{ds} y V_{qs}), la velocidad eléctrica del sistema (ω_e), así como las corrientes internas tanto del estator como del rotor. Estos valores son organizados a través de bloques de entrada tipo bus, que actúan como agrupadores de señales. Cada conjunto de entradas alimenta una función intermedia que evalúa el cambio instantáneo (derivada) de las corrientes, para luego ser integrada mediante bloques de tipo $1/s$, los cuales representan el proceso físico de acumulación energética que ocurre en las inductancias del sistema. Así se obtiene la corriente resultante para cada eje que luego retroalimenta otros bloques de modelo, generando una interacción dinámica continua.

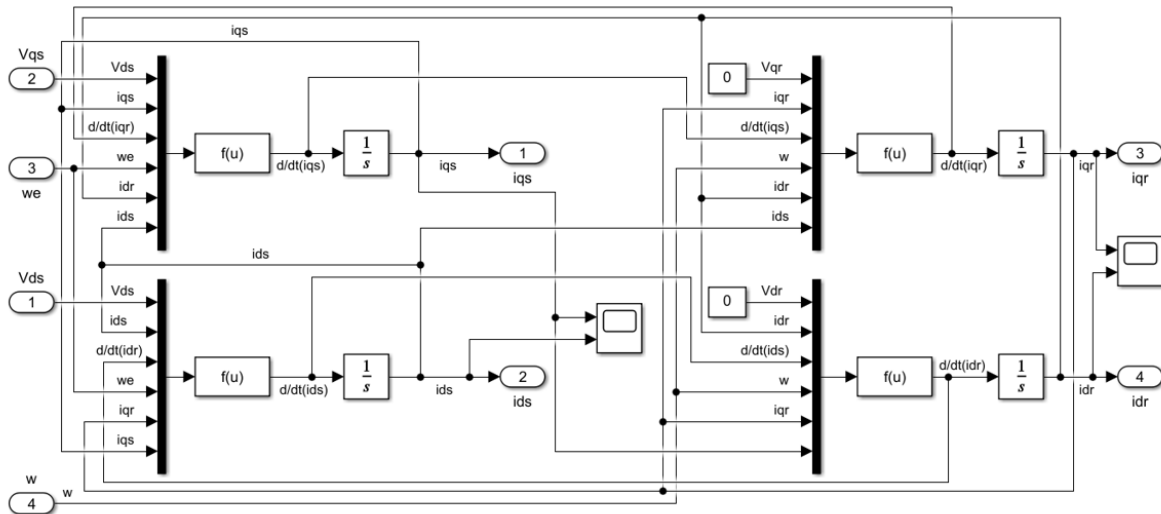
En el lado derecho del modelo se simula el comportamiento del circuito del rotor, el cual a diferencia del estator no está alimentado directamente por una fuente externa. En cambio, las corrientes rotoricas (i_{dr} e i_{qr}) son inducidas a partir del acoplamiento con el campo magnético giratorio generado por el estator. Estas corrientes también son procesadas mediante bloques que calculan su tasa de variación y luego son integradas siguiendo el mismo esquema lógico. Lo importante aquí es la presencia de la velocidad mecánica (ω) del rotor como variable de entrada, la cual modifica la forma en que el rotor responde a la interacción magnética, replicando el fenómeno de deslizamiento lo cual es fundamental para que el motor de inducción desarrolle torque.

Una característica destacada del modelo es la retroalimentación cruzada entre los subsistemas del estator y del rotor. Esta interdependencia refleja con fidelidad como

funcionamiento del motor está determinado por el acoplamiento entre ambas partes. El cambio en cualquier variable ya sea una corriente, voltaje o velocidad influye directamente sobre los demás, logrando una representación dinámica coherente y realista. Además, se puede notar como se reutilizan señales internas del modelo para evitar cálculos duplicados y mantener la integridad de los resultados.

Este tipo de estructura modular permite adaptar el modelo fácilmente a distintos entornos experimentales o escenarios de simulación. Por ejemplo, se pueden conectar bloques externos de control, aplicar distintos tipos de carga, simular perturbaciones o modificar parámetros internos del motor como resistencias, inductancias o pares mecánicos. La gran ventaja de este enfoque es que combina el realismo físico de un modelo basado en ecuaciones diferenciales con la flexibilidad y visualización gráfica que proporciona el entorno de Simulink, permitiendo desarrollar simulaciones detalladas, reproducibles y escalables.

En definitiva, el modelo presentado (figura 2-1), no solo refleja correctamente el comportamiento eléctrico y mecánico del motor de inducción, sino que también permite experimentar de manera visual con las condiciones que afecta su rendimiento. Esto convierte a la simulación en una pedagogía, de validación y de desarrollo en el diseño de estrategias de control, análisis de eficiencia energética y planificación de mantenimiento predictivo en aplicaciones reales.



Fuente: Elaboración propia, realizada en MATLAB/Simulink

Figura 2-1 Especificaciones del motor

2.1 ESPECIFICACIONES DE LA CORREA TRANSPORTADORA

La correa transportadora es un elemento clave en los sistemas de transporte de materiales, encargada de garantizar un flujo continuo y eficiente. En este estudio se describen sus principales especificaciones que están enfocadas en su capacidad de operación y diseño para aplicaciones industriales.

Estos parámetros fueron seleccionados para asegurar un desempeño óptimo y una integración adecuada con los demás componentes del sistema.

En la tabla 2-2 se puede visualizar las especificaciones de la correa transportadora adecuados al sistema.

Tabla 2-2 Especificaciones de la correa transportadora

Parámetro	Valor	Descripción
Ancho de la correa (m)	0,8	Ancho de la correa Transportadora
Velocidad inicial (m/s)	10	Velocidad al inicio de la simulacion
coeficiente de fricción	0,2	Coeficiente de fricción entre la correa y las superficies en contacto.
Aceleración gravitacional (m/s ²)	9,81	Aceleración debida a la gravedad utilizada para calcular la fuerza normal.
Masa (kg)	50, 100, 150, 200	Masas que representan diferentes cargas sobre la correa

Fuente: Elaboración propia, realizada en Excel

2.2 NORMA ISO 14890

La norma ISO 14890 establece los requisitos técnicos y de calidad que deben cumplir las bandas transportadoras con núcleo de tejido, comúnmente utilizadas en el transporte de materiales a granel o productos individuales dentro de entornos industriales. Esta normativa internacional está orientada a garantizar que las bandas utilizadas en sistemas de transporte como el que se estudia en este trabajo presenten un comportamiento confiable, duradero y seguro durante su operación.

La norma aplica específicamente a bandas recubiertas con caucho o materiales plásticos, que son las empleadas en aplicaciones industriales por su resistencia mecánica, flexibilidad y adaptabilidad a distintos entornos de trabajo. Su implementación busca asegurar que estos componentes críticos del sistema de transporte cumplan con estándares internacionales que respalden en uso continuo bajo condiciones exigentes, como cambios de carga, exposición a agentes externos o funcionamiento prolongado.

Entre los principales aspectos que regula la ISO 14890 se encuentran las siguientes:

- Dimensiones y tolerancias geométricas de las bandas, incluyendo el ancho, espesor y longitud.
- Requisitos de resistencia a la tracción, que aseguran que la banda pueda soportar las tensiones generadas durante la operación sin fallar.
- Adherencia entre capas, garantizando que los distintos materiales que componen la banda no se separen con el uso.

- Resistencia al desgaste, para prolongar la vida útil de la banda ante el contacto constante con materiales abrasivos.
- Clasificación por tipo de recubrimiento, ya que sea de caucho o plástico con especificaciones según ambiente y tipo de carga transportada ya que entre los aspectos principales que regula la norma ISO 14890 se incluyen:
- Que características mínimas deben cumplir, como su resistencia al estiramiento, la adherencia entre las capas internas, externas y las tolerancias aceptables en el tamaño (ancho y espesor).
- Como se deben clasificar las bandas, según el tipo de la tela interna, el material del recubrimiento y la resistencia requerida.
- Que pruebas deben realizarse para confirmar que la banda cumple con los requisitos, como pruebas de tracción, de abrasión y de adherencia.

En el desarrollo de este trabajo, se adopta como referencia la norma ISO 14890, la cual establece los requisitos técnicos mínimos para las bandas transportadoras utilizadas en diversas aplicaciones industriales. Esta normativa define criterios clave en cuanto dimensiones, tolerancias, materiales, resistencias mecánicas y condiciones de operación que deben cumplir las correas para ser consideradas seguras, eficientes y compatibles con los entornos industriales reales. Su aplicación garantiza que el diseño del sistema simulado no solo cumpla con criterios teóricos, sino que también sea viable desde un punto de vista práctico e industrial.

Tomar la ISO 14890 como base permite asegurar que la banda transportadora modelada en Simulink represente un sistema realista, es decir uno podría fabricarse y funcionar de manera adecuada en un entorno productivo. Éste da mayor validez al modelo propuesto, ya que se ajusta a los parámetros estandarizados internacionalmente, facilitando la comparación con sistemas reales ya implementados en plantas de producción.

Asimismo, aplicar los criterios establecidos en esta norma refuerza la confiabilidad del modelo computacional, permitiendo simular con mayor precisión aspectos como la capacidad de carga, la durabilidad de los materiales y el comportamiento del sistema ante distintas condiciones operativas. En resumen, el uso de la ISO 14890 en esta investigación no solo mejora la fidelidad

del modelo, sino que también garantiza su aplicabilidad técnica en la industria, sirviendo como puente entre la simulación académica y la implementación en escenarios reales.

Como ejemplo en la figura 2-2 se puede visualizar un tipo de correa transportadora aplicando la norma ISO 14890.



Fuente: Google.

Figura 2-2. Ejemplo de Correa Transportadora

2.3 NORMA ISO 5048

La norma ISO 5048 es un estándar internacional ampliamente utilizado para el cálculo y diseño de sistemas de transporte de correa. Esta norma proporciona un marco técnico que detalla los métodos para determinar las fuerzas, potencias, tensiones y otros parámetros mecánicos involucrados en los diseños y operación de transportadores de banda. Su aplicación asegura que los cálculos se realicen de manera uniforme, precisa y conforme a prácticas reconocidas a nivel mundial, lo cual es esencial para garantizar la eficiencia y seguridad de estos sistemas en entornos industriales.

Su aplicación en ingeniería resulta esencial para garantizar que los cálculos se realicen conforme a criterios estandarizados, lo cual no solo permite mantener la uniformidad y

compatibilidad entre distintos diseños, sino también asegurar que los equipos resultantes funcionen adecuadamente bajo condiciones reales de carga y operación. En este sentido la ISO 5048 actúa como guía normativa que respalda el dimensionamiento correcto de todos los componentes mecánicos involucrados en el sistema, desde el motor hasta los tambores, rodillos, tensores y la propia correa.

La incorporación de la norma ISO 5048 en el desarrollo de este trabajo resulta fundamental, ya que establece los fundamentos técnicos para llevar a cabo un análisis riguroso del sistema de correa transportadora, incluyendo variables como la inclinación de transportador, el peso del material a transportar, el coeficiente de fricción dinámico, las pérdidas por rodadura y otros factores que influyen directamente en el rendimiento energético del sistema. De este modo el cálculo de la potencia necesaria, la evolución de esfuerzos y la predicción de posibles puntos de fallo se realiza bajo una estructura lógica y técnicamente validada.

Además, aplicar los criterios de la ISO 5048 permite vincular estrechamente la simulación desarrollada en MATLAB/ Simulink con las condiciones reales de operación industrial. Al utilizar esta norma como referencia para validar los resultados obtenidos por el modelo computacional, se asegura que las salidas del sistema simulado (como las tensiones, torques, velocidades y potencias) no solo sean coherentes internamente sino también compatibles con estándares reconocidos en ingeniería de transporte de materiales.

Por otro lado, el uso de esta norma también facilita la identificación de variables clave que deben ser controladas o monitorizadas para mantener el sistema en condiciones óptimas de operación, lo que aporta valor en términos de diseño, control y mantenimiento. En consecuencia, la norma ISO 5048 no solo constituye una herramienta para el desarrollo inicial del modelo, sino también una base sólida para el análisis comparativo, la validación del diseño y la implementación práctica del sistema de transporte en un entorno real.

En resumen, su aplicación dentro del marco de este trabajo refuerza tanto la validez técnica como la utilidad práctica del modelo propuesto y posiciona esta tesis como una propuesta alineada con las mejores prácticas internacionales en el ámbito del diseño de sistemas de transporte por correa.

La operación de la norma ISO 5048 en este trabajo no solo aporta un marco técnico riguroso para el diseño y análisis de la correa transportadora, sino que también asegura que el sistema cumpla con los estándares de calidad y seguridad reconocidos en el ámbito industrial. Esto refuerza la validez del modelo propuesto y proporciona una base confiable para su implementación en aplicaciones prácticas.

2.3.1 Diagrama de fuerzas

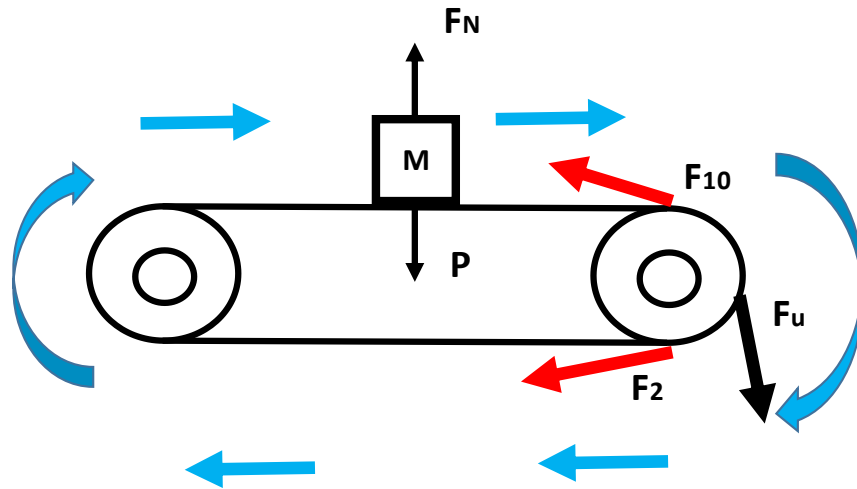
La norma ISO 5048 fue fundamental para el desarrollo del diagrama de fuerzas del sistema de correa transportadora, ya que establece los principios necesarios para identificar y calcular las fuerza que actúan en el sistema. Esta norma proporciona las ecuaciones y directrices que permiten descomponer el sistema en sus componentes básicos, lo que facilita la representación gráfica y detallada de las fuerzas involucradas.

Con base en la ISO 5048 se definieron y calcularon las principales fuerzas que afectan al movimiento de la correa transportadora:

- Fuerza de tracción de la correa: Es la resultante de la tensión necesaria para mover el material transportado y superar las resistencias interna del sistema.
- Fuerza de fricción: Se genera por el contacto entre la correa y los rodillos, así como por el material transportado.
- Fuerza gravitatoria: Es considerada en los sistemas de inclinación, donde el peso del material contribuye o resiste al movimiento.
- Fuerza dinámica: relacionadas con la aceleración o desaceleración del sistema.

Estas fuerzas fueron representadas en un diagrama en la figura 2-3, donde fue estructurado, lo que que permite visualizar claramente su interacción e impacto en el sistema. La norma también ayudo a establecer las relaciones matemáticas entre las fuerzas, garantizando la precisión en los cálculos y su con las condiciones de operación realista. Como se demuestra el diagrama de la figura 2-3, m representa la masa del objeto a transportar, P representa el Peso del

objeto actuando en el plano, F_N representa la fuerza normal actuando en el objeto y F_{10} y F_2 representa la descomposición de la Fuerza F_u actuando en la correa transportadora.



Fuente: Elaboración propia, realizada en Excel

Figura 2-3. Diagrama de Fuerzas

En el contexto del desarrollo de este trabajo, la construcción del diagrama de fuerzas conforme a los lineamientos establecidos en la norma ISO 5048 desempeñó un rol fundamental en la comprensión integral del comportamiento mecánico del sistema de correa transportadora. Este diagrama permitió identificar con claridad la distribución de las diferentes fuerzas que actúan sobre la correa, tales como la fuerza de tracción, la resistencia al movimiento, las fuerzas normales en los rodillos y la fuerza generada por el motor, entre otras. Comprender la interacción entre las fuerzas fue clave para evaluar de forma precisa el equilibrio dinámico del sistema y anticipar posibles puntos de sobrecarga, pérdidas de eficiencia o riesgo de fallo estructural.

La elaboración del diagrama de fuerza no solo permitió visualizar de manera estructurada el funcionamiento físico del sistema, sino que también facilitó la formulación de las ecuaciones que rigen su comportamiento, tales como las relativas al torque, la potencia de aceleración y la tensión en la correa. Estas ecuaciones fueron implementadas dentro del entorno de simulación MATLAB/Simulink donde se integraron con el modelo general del sistema para construir una

representación dinámica completa. Gracias a esta metodología se aseguró que las condiciones físicas simuladas respondieran con fidelidad a la realidad operativa del sistema.

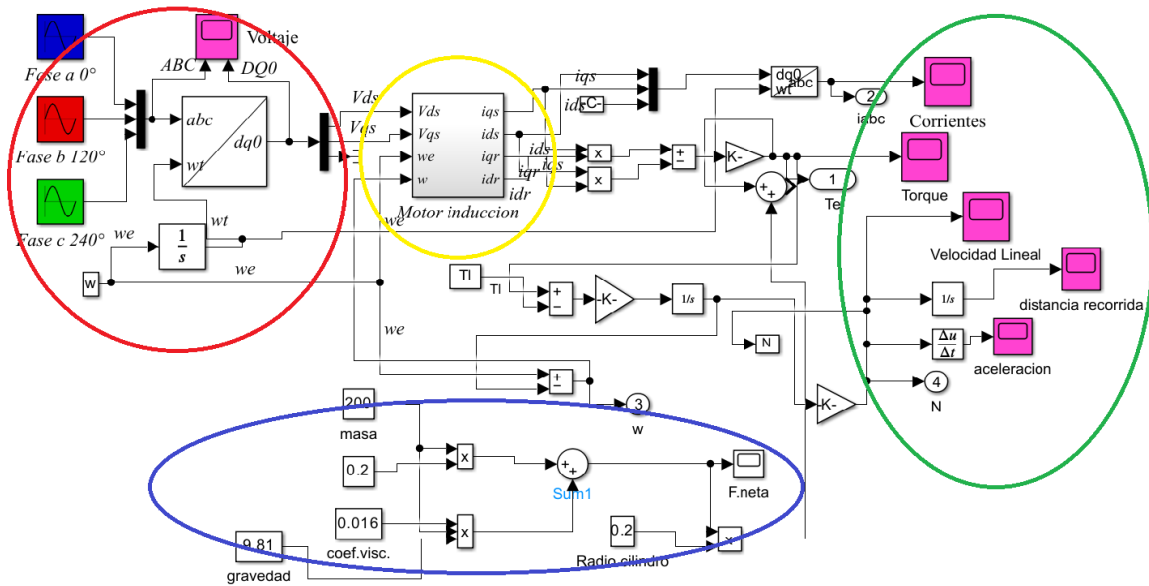
Además, al basarse en la norma ISO 5048 el diagrama desarrollado aporta un marco técnico validado internacionalmente, que permite establecer un lenguaje común con ingenieros y profesionales del área en contextos reales de diseño, implementación y mantenimiento de sistema de transporte. Esto otorga al modelo simulado un respaldo adicional de rigor técnico, al tiempo que refuerza su aplicabilidad en escenarios prácticos y su utilidad como herramienta de formación y análisis.

En definitiva, la inclusión del diagrama de fuerzas conforme a esta normativa no solo enriqueció el análisis mecánico del sistema, sino que también fortaleció la base estructural y mecánica del modelo computacional, asegurando que las simulaciones realizadas reflejen con alta precisión el comportamiento del sistema ante distintas condiciones de carga, velocidad y configuración.

2.4 MODELO SIMULINK

Los diagramas de bloques en Simulink son una herramienta fundamental para modelar, simular y analizar sistemas dinámicos. En este estudio se utilizarán para representar de manera visual y estructurada para el comportamiento del sistema de correa transportadora conectado a un motor eléctrico.

Estos diagramas permiten integrar las ecuaciones mecánicas y eléctricas, facilitando la comprensión del funcionamiento del sistema y la evolución de su desempeño bajo diferentes condiciones operativas.



Fuente: Elaboración propia, realizada en Simulink

Figura 2-4. Modelo Completo de la correa Transportadora

En la figura 2-4 se presenta el modelo completo de la correa transportadora implementado en Simulink. Para facilitar la explicación, el diagrama ha sido dividido en cuatro zonas principales diferenciadas por colores, las cuales representan las distintas etapas de procesamiento del modelo.

2.4.1 Zona roja – Generación y transformación de señales de entrada

En esta sección se generan las tres señales sinusoidales trifásicas correspondientes a las fases A, B y C del sistema eléctrico.

Cada señal se encuentra desfasada 120° respecto a la anterior, formando un sistema equilibrado típico de máquinas eléctricas. El objetivo de esta parte del modelo es emular la tensión de línea que entregaría el variador de frecuencia al motor.

Las tensiones se definen de la forma:

$$v_a(t) = V_m \sin(\omega t)$$

$$v_b(t) = V_m \sin(\omega t - 120^\circ)$$

$$v_c(t) = V_m \sin(\omega t - 240^\circ)$$

Fuente: Libro de máquinas eléctricas de Javier Sanz Feito

Figura 2-5. Ecuaciones señales sinusoidales trifásicas

donde:

- V_m es la amplitud máxima de la tensión.
- ω es la velocidad angular eléctrica.

Posteriormente, se aplica la transformación $abc \rightarrow dq$, En un motor de inducción trifásico, las tensiones, corrientes y flujos en cada fase A, B y C son señales sinusoidales desfasadas 120° entre sí. Esto es natural en sistemas trifásicos, pero trabajar con senos y cosenos en el tiempo complica mucho el análisis y el control, porque:

- Las variables cambian constantemente con el tiempo, incluso en régimen estacionario.
- Las ecuaciones diferenciales acopladas entre fases son más difíciles de resolver.
- Para el control, tener que “seguir” la onda sinusoidal en tiempo real es menos eficiente.

La transformación consiste en un cambio de coordenadas desde el sistema trifásico estacionario abc hacia un sistema rotatorio dq que gira a la misma velocidad angular que el campo magnético del estator.

En el marco abc , las variables son tres ondas sinusoidales que suben y bajan.

En el marco dq , esas mismas variables se “mueven” al mismo ritmo que el campo giratorio, por lo que en régimen permanente parecen constantes

2.4.2 Zona amarilla – Modelo del motor de inducción

En esta parte se implementa el modelo dinámico del motor trifásico en coordenadas dq, que describe la interacción electromagnética entre el estator y el rotor.

Este bloque recibe como entradas las tensiones transformadas (V_{ds} y V_{qs}), la velocidad eléctrica (ω_e) y la velocidad mecánica del rotor [ω_r].

Como salidas, entrega las corrientes de estator en ejes directo y en cuadratura (i_{ds}, i_{qs}), así como las corrientes del rotor (i_{dr}, i_{qr}).

Las ecuaciones diferenciales que gobiernan el comportamiento del motor en este marco de referencia se basan en la teoría de máquinas eléctricas y se expresan como aparecen en la figura 2-6:

$$\frac{di_{ds}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} \left(v_{ds} - R_s i_{ds} + \omega_e \sigma L_s i_{qs} - \frac{L_m}{L_r} \frac{d\psi_{dr}}{dt} \right)$$

$$\frac{di_{qs}}{dt} = \frac{1}{\sigma L_s} \left(v_{qs} - R_s i_{qs} - \omega_e \sigma L_s i_{ds} - \frac{L_m}{L_r} \frac{d\psi_{qr}}{dt} \right)$$

$$\frac{d\psi_{dr}}{dt} = -R_r i_{dr} + (\omega_e - \omega_r) \psi_{qr}$$

$$\frac{d\psi_{qr}}{dt} = -R_r i_{qr} - (\omega_e - \omega_r) \psi_{dr}$$

Fuente: Libro de máquinas eléctricas de Javier Sanz Feito

Figura 2-6. Ecuaciones Diferenciales del comportamiento del motor

donde:

- $R_s, R_r \rightarrow$ resistencias del estator y rotor.
- $L_s, L_r, L_m \rightarrow$ inductancias de estator, rotor y mutua.
- $\sigma \rightarrow$ factor de dispersión.

- $v_{dr}, v_{qr} \rightarrow$ enlaces de flujo en el rotor.

2.4.3 Zona azul – Modelo mecánico de la correa transportadora

En esta parte del modelo se representa el comportamiento físico de la correa transportadora como un sistema mecánico acoplado directamente al motor de inducción. El objetivo es traducir el par electromagnético que genera el motor en un movimiento lineal útil para el transporte de material, considerando que este movimiento está sujeto a las limitaciones y resistencias propias del sistema real.

El modelo mecánico actúa como un eslabón intermedio entre la salida del motor y la velocidad final de la correa. Cuando el motor produce un par, este se transmite a la polea motriz, la cual transforma la rotación en desplazamiento lineal de la banda. Aquí entran en juego diferentes parámetros físicos de la instalación, que representan la masa que debe ser transportada, el tamaño de la polea y las fuerzas que se oponen al avance.

En este esquema, todos esos parámetros no se consideran de manera aislada, sino que se integran en un único bloque que simula el movimiento. El par que entrega el motor se ve afectado por la inercia del sistema, las pérdidas por fricción y el peso de la carga. Esto provoca que la aceleración y la velocidad de la correa no dependan únicamente de la potencia entregada, sino también de la resistencia mecánica total del conjunto.

El vínculo con el motor es directo: cualquier variación en el par desarrollado por el motor se refleja inmediatamente en el comportamiento de la correa, y a su vez, cualquier cambio en la carga que transporta la correa repercute en el esfuerzo que debe realizar el motor. De esta forma, se establece un lazo bidireccional entre el modelo eléctrico y el mecánico, lo que permite analizar de manera realista cómo la máquina reacciona ante diferentes condiciones de operación.

Este enfoque permite que el modelo no solo muestre valores de velocidad o fuerza de manera aislada, sino que reproduzca las dinámicas de arranque, aceleración, régimen y desaceleración de una correa transportadora industrial. Con esto, es posible simular cómo la variación de la carga o de la fricción afecta al consumo energético, la capacidad de transporte y

la estabilidad del sistema, integrando el comportamiento electromecánico en un solo esquema coherente.

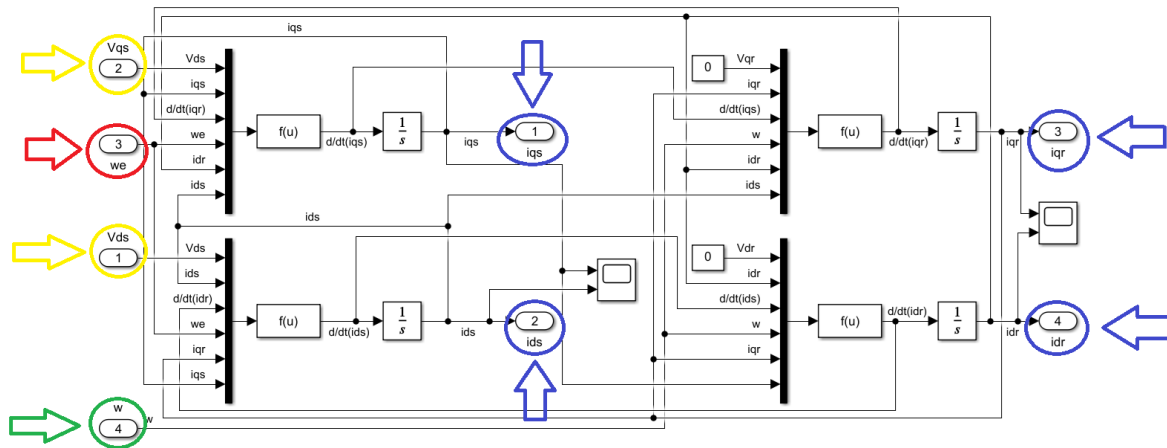
2.4.4 Zona verde – Medición y análisis de resultados

Esta última parte del diagrama concentra todos los elementos dedicados al monitoreo y registro de las variables clave del sistema, actuando como la interfaz entre el modelo y el análisis de resultados. Su función es recopilar, procesar y almacenar la información generada durante la simulación, permitiendo una interpretación precisa del comportamiento tanto del motor como de la correa transportadora bajo distintas condiciones de operación.

Además, este bloque cumple un papel esencial en la validación del modelo, ya que permite contrastar los resultados obtenidos en la simulación con datos experimentales o de operación real. De esta manera, se puede ajustar con precisión algunos parámetros.

2.4.5 Modelo Dinámico Del Motor De Inducción

En el modelo dinámico del motor de inducción utilizado en la simulación, se han identificado y clasificado diferentes variables según su función y relevancia en el comportamiento del sistema. Estas variables se representan en el diagrama mediante códigos de colores, lo que facilita su identificación visual y su relación con los distintos procesos físicos que ocurren en el motor y en la correa transportadora.



Fuente: Elaboración propia, realizada en Simulink

Figura 2-7. Modelo dinámico del motor de inducción

En el modelo dinámico del motor de inducción utilizado en la simulación como aparece en la figura 2-7, se han identificado y clasificado diferentes variables según su función y relevancia en el comportamiento del sistema. Estas variables se representan en el diagrama mediante códigos de colores, lo que facilita su identificación visual y su relación con los distintos procesos físicos que ocurren en el motor y en la correa transportadora.

1. Variables de excitación del estator (Color Amarillo – Entradas 1 y 2: V_{ds}, V_{qs}):

Corresponden a los voltajes aplicados al estator expresados en el sistema de coordenadas dq. Su función principal es actuar como variables de entrada que excitan el sistema, permitiendo resolver las ecuaciones diferenciales que describen el comportamiento electromagnético y mecánico del motor. Estas tensiones determinan la magnitud y forma de las corrientes que circularán por el estator, influyendo directamente en la generación de par y en la dinámica general del sistema.

2. Velocidad angular del campo magnético (Color Rojo – Entrada 3: ω_e):

Representa la velocidad de rotación del campo magnético giratorio dentro del motor. Es un

parámetro clave dentro de las ecuaciones dinámicas acopladas, ya que introduce términos cruzados que vinculan los ejes directo (d) y en cuadratura (q) del estator y del rotor. Esta velocidad define la frecuencia relativa con la que interactúan los campos magnéticos, afectando la inducción de corrientes en el rotor y la eficiencia de conversión electromecánica.

3. Velocidad mecánica del rotor (Color Verde – Entrada 4: ω):

Indica la velocidad de rotación física del rotor y se vincula directamente con el lazo dinámico entre el sistema eléctrico y el mecánico. Al variar esta velocidad, se modifica el deslizamiento entre el campo magnético y el rotor, lo que impacta en las corrientes inducidas, el par electromagnético y, en consecuencia, la potencia entregada a la carga. Es un indicador esencial para evaluar el rendimiento bajo diferentes condiciones de carga.

4. Corrientes dinámicas del estator (Color Azul – Salidas 1 y 2: i_{qs}, i_{ds}):

Son las corrientes que circulan por el estator, calculadas a partir de la solución de las ecuaciones diferenciales que dependen de las tensiones aplicadas, las velocidades de referencia y los parámetros eléctricos del sistema. Estas corrientes son determinantes en la generación del par electromagnético y en la respuesta dinámica del motor, constituyendo una de las salidas más relevantes para el análisis de desempeño.

5. Corrientes inducidas en el rotor (Color Azul – Salidas 3 y 4: i_{qr}, i_{dr}):

Se originan debido al deslizamiento existente entre la velocidad del campo magnético (ω_e) y la velocidad mecánica del rotor (ω). Son calculadas mediante las ecuaciones del sistema y resultan fundamentales para la producción de par electromagnético. El valor y comportamiento de estas corrientes determinan la capacidad del motor para transmitir la potencia mecánica necesaria para mover la carga acoplada, en este caso, la correa transportadora.

CAPÍTULO 3: MODELADO DE PRUEBAS DE CARGA

3 MODELADO DE PRUEBA DE CARGA

Las simulaciones desarrolladas en el entorno MATLAB/Simulink representaron una herramienta central para el estudio y análisis integral del comportamiento dinámico del sistema de correa transportadora bajo diversas condiciones de operación. El modelo empleado fue construido a partir de una integración coherente entre el mundo teórico y el práctico involucrados en la interacción entre el motor de inducción trifásico y la carga transportada, permitiendo una representación fiel de las respuestas del sistema ante distintas condiciones. Este modelo considera tanto las ecuaciones que describen el funcionamiento del motor eléctrico, incluyendo su alimentación como las ecuaciones del movimiento que afectan a la correa transportadora y su interacción con la carga, haciendo posible una simulación realista y representativa del comportamiento físico del sistema.

Con el propósito de evaluar la respuesta del sistema a distintas situaciones de carga, se diseñó una serie de simulaciones variando el valor de la masa transportada, considerando cuatro escenarios claves: 200 kg, 150 kg, 100 kg y 50 kg. Esta diversidad de condiciones permite analizar como se ve afectado el rendimiento del sistema en función de la carga, lo cual es fundamental para dimensionar correctamente los componentes y anticipar su comportamiento en condiciones reales de operación industrial. Para cada una de estas cargas se evaluaron variables críticas tales como la velocidad lineal de la correa, el torque electromagnético desarrollado por el motor, la aceleración del sistema, la distancia recorrida y las corrientes eléctricas en el estator.

Este análisis comparativo no solo permite observar como el sistema responde ante variaciones en los parámetros de entrada, sino también constituye una valiosa herramienta para la validación del modelo, dado que se contrasta el comportamiento simulado con las expectativas físicas basadas en la teoría y en normativas técnicas internacionales, particularmente la norma ISO 5048, que establece los principios del cálculo dinámico de transportadores de banda y la norma ISO 14890, que regula las características técnicas de las bandas transportadoras.

Las gráficas resultantes para cada caso de carga permiten visualizar de manera clara y detallada como se modifican las condiciones de operación del sistema al cambiar el esfuerzo requerido.

Además de aportar evidencia cuantitativa sobre el comportamiento del sistema, las simulaciones también cumplen un rol estratégico en el proceso de diseño predictivo, permitiendo identificar con antelación posibles limitaciones operativas y facilitando así la toma de decisiones orientadas a la mejora continua del diseño. En conjunto este proceso de simulación multivariable constituye una herramienta poderosa para la validación técnica y desarrollo de estrategias de operación más eficientes, seguras y confiables en el contexto de aplicaciones industriales reales.

3.1 ESCENARIO 200 KG

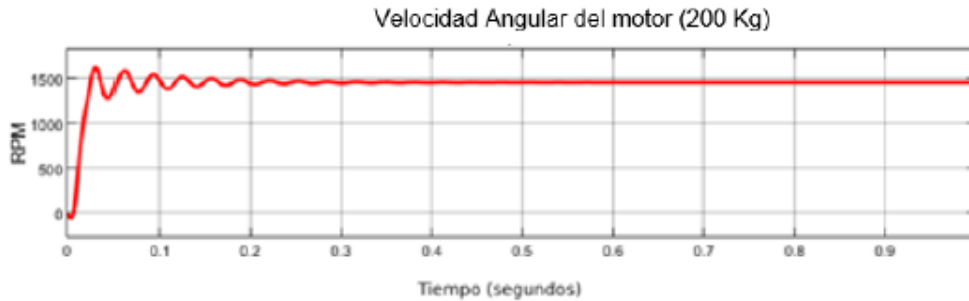
El análisis del comportamiento dinámico del motor trifásico resulta esencial para evaluar la eficiencia y estabilidad operativa del sistema de accionamiento de la correa transportadora. En este contexto, la simulación de la velocidad angular del rotor permite observar la respuesta del motor ante las condiciones de carga y resistencia impuestas por el sistema mecánico, proporcionando una visión detallada del desempeño transitorio y del régimen permanente alcanzado.

A continuación, se presenta la gráfica obtenida mediante simulación en MATLAB/Simulink, la cual muestra la evolución temporal de la velocidad del rotor desde el arranque hasta su estabilización. Este análisis constituye un elemento clave para validar el modelo dinámico implementado y verificar la correcta adaptación del motor a las exigencias operativas de la correa transportadora.

3.1.1 La velocidad del rotor

En esta grafica (figura 3-1) se representa la velocidad angular del rotor del motor trifásico que acciona la correa transportadora, mostrando su comportamiento ante las condiciones de carga y resistencia del sistema. Se observa que la velocidad del rotor aumenta de manera

progresiva durante el arranque del motor, estabilizándose en un régimen cercano al 1.500 [rpm] aproximadamente.



Fuente: Elaboración propia, realizada en Simulink

Figura 3-1. *Gráfica de Simulación Velocidad de Rotor*

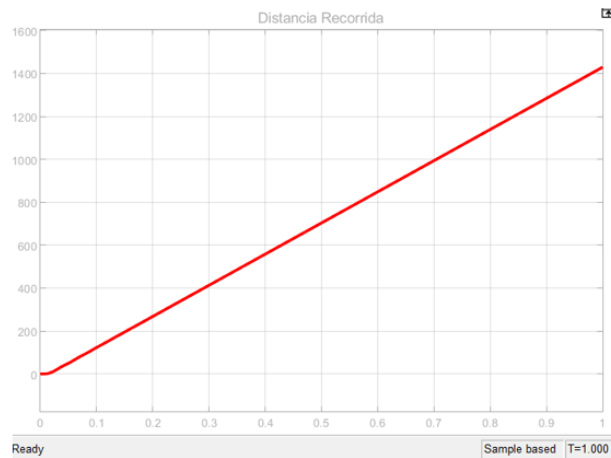
Según la figura 3-1, esta gráfica confirma que el motor responde de manera adecuada a las condiciones de carga, logrando alcanzar y mantener una velocidad estable en un tiempo razonable. Este comportamiento asegura que la correa transportadora opere de forma eficiente y confiable, cumpliendo con los requisitos de desempeño esperados para el sistema.

3.1.2 Distancia recorrida

La distancia recorrida por la correa transportadora es una variable fundamental para evaluar el rendimiento del sistema, ya que refleja directamente el desplazamiento efectivo de la carga a lo largo del tiempo. Este parámetro permite verificar si el sistema es capaz de cumplir con los objetivos de transporte establecidos, especialmente en aplicaciones industriales donde se requiere mover materiales de forma continua y controlada.

El análisis de esta variable entrega información valiosa sobre el comportamiento dinámico del sistema completo. A partir del torque generado por el motor la fuerza resultante aplicada sobre la carga y la fricción presente en la superficie de contacto se puede estimar la distancia total que recorre la correa en función del tiempo de operación y la aceleración obtenida. Este valor es especialmente útil para validar el correcto dimensionamiento del sistema, comprobar el alcance

físico del transporte en el modelo simulado y contrastar los resultados obtenidos con los requerimientos reales de la planta.



Fuente: Elaboración propia, realizada en Simulink.

Figura 3-2. Gráfica "Distancia Recorrida" operando bajo una carga de 200 kg.

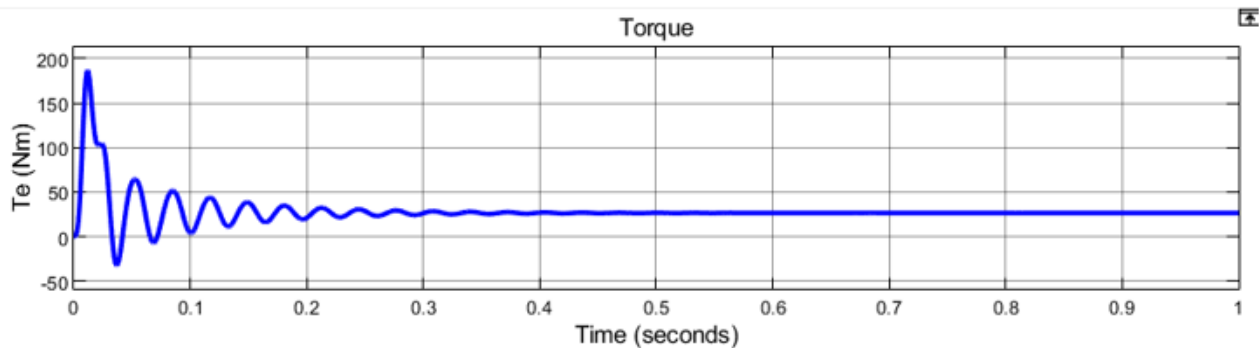
En la figura 3-2 se observa un comportamiento casi lineal creciente lo cual indica que la correa transportadora mantiene una aceleración inicial seguida de una velocidad prácticamente constante. Esto es coherente con el funcionamiento típico de un sistema industrial controlado por un motor de inducción trifásico bajo control donde se busca un arranque suave y una transición rápida a régimen permanente. El leve curvado inicial en el tramo 0-0.05 s, evidencia el momento de arranque del motor donde la velocidad aún se encuentra en fase aumento.

Posteriormente a partir de aproximadamente 0,1 s la pendiente se estabiliza indicando que el sistema alcanza una velocidad estable y eficiente con una fuerza neta constante aplicada sobre la carga. Al finalizar el segundo de simulación la correa ha recorrido aproximadamente 1.450 mm, lo que valida que el sistema está realizando correctamente el desplazamiento lineal esperado bajo la acción del torque desarrollado por el motor. Esta información es clave para verificar el alcance mecánico del modelo y su capacidad para mover las cargas dentro de los márgenes establecidos para la operación industrial.

3.1.3 Torque electromagnético

La gráfica correspondiente al torque electromagnético generado por el motor (figura 3-3), permite visualizar como varia esta magnitud a lo largo del tiempo durante la operación del sistema. El torque es una variable fundamental en el análisis dinámico ya que representa la fuerza de giro que el motor aplica sobre el eje conectado a la correa transportadora y está directamente relacionada con la capacidad del sistema para superar la inercia de la carga, vencer las resistencias mecánicas y generar el movimiento lineal deseado. Este análisis permite comprender como responde el motor ante diferentes condiciones de carga arranque. Generalmente se observa un valor inicial elevado de torque al inicio de la simulación, asociado al impulso necesario para poner en movimiento una carga inercial en reposo. Posteriormente el torque tiende a estabilizarse en un valor constante lo que indica que el sistema ha alcanzado un régimen permanente con velocidad estable.

La evolución del torque también refleja el equilibrio dinámico entre la energía suministrada por el motor y las fuerzas resistentes del sistema, como la fricción viscosa el peso de la carga y las pérdidas mecánicas. Un comportamiento estable del torque sin oscilaciones bruscas ni caídas inesperadas, es indicativo de un sistema bien controlado y eficiente lo que es clave en aplicaciones industriales donde se requiere continuidad y precisión en el transporte de materiales. El monitoreo de esta variable es esencial para validar el desempeño del modelo en Simulink.



Fuente: Elaboración propia, realizada en Simulink.

Figura 3-3. Gráfica del "Torque" operando bajo una carga de 200 kg.

Según la figura 3-3 la gráfica muestra la evolución del torque electromagnético (T_e) generado por el motor de inducción trifásico durante el primer segundo de simulación. En el eje vertical se representa el valor del torque en newton-metro (Nm), mientras que en el eje horizontal se observa el tiempo en segundos.

Inicialmente se representa un pico de torque cercano a los 200 Nm, el cual corresponde al esfuerzo máximo que realiza el motor para superar la inercia de la carga y poner en movimiento la correa transportadora. Esta respuesta es característica de la etapa de arranque del motor donde se requiere un alto torque para vencer tanto el estado de reposo como las fuerzas resistentes iniciales como la fricción estática y el peso de la carga.

Posteriormente se observa un comportamiento oscilatorio amortiguado donde el torque presenta fluctuaciones decrecientes en magnitud. Estas oscilaciones reflejan el proceso transitorio del sistema mientras se ajusta dinámicamente hacia un estado de equilibrio.

Aproximadamente a partir de los 0,4 segundos, el sistema alcanza un régimen estacionario donde el torque se estabiliza en un valor constante cercano a los 40 Nm, este valor representa el torque necesario para mantener la velocidad constante de la correa bajo las condiciones de carga y fricción establecidas en el modelo.

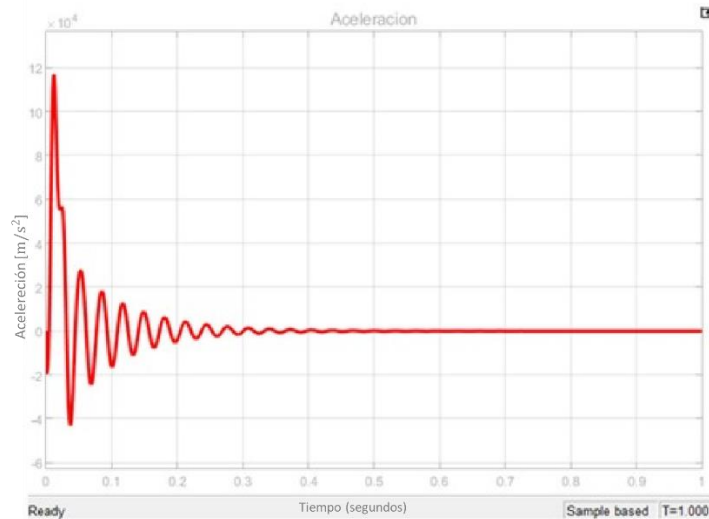
El comportamiento observado en la gráfica es constante con un sistema correctamente dimensionado y controlado en el cual el motor responde eficazmente a las exigencias del arranque y luego mantiene un funcionamiento estable. Esta información es clave para validar el desempeño dinámico del modelo y asegurar que el diseño simulado cumple con los criterios de eficiencia, estabilidad y confiabilidad requeridas en aplicaciones industriales reales.

3.1.4 Aceleración del sistema

La gráfica correspondiente a la aceleración muestra cómo varía la rapidez con la que cambia la velocidad de la correa transportadora durante el arranque y operación del sistema. Esta variable es fundamental para entender el comportamiento dinámico del conjunto motor – carga,

ya que refleja cómo responde el sistema ante la aplicación del torque desarrollado por el motor y la presencia de resistencias mecánicas.

La aceleración es especialmente relevante en la fase inicial de operación donde requiere superar la inercia de la masa transportada y alcanzar una velocidad estable en un tiempo controlado. Una aceleración suave pero efectiva indica que el sistema está correctamente dimensionado y que el control implementado permite una transición eficiente desde el reposo hasta el régimen permanente.



Fuente: Elaboración propia, realizada en Simulink.

Figura 3-4. Gráfica de "Aceleración" operando bajo una carga de 200 kg

La gráfica de la figura 3-4 muestra la evolución de la aceleración de la correa transportadora en función del tiempo durante el primer segundo de simulación.

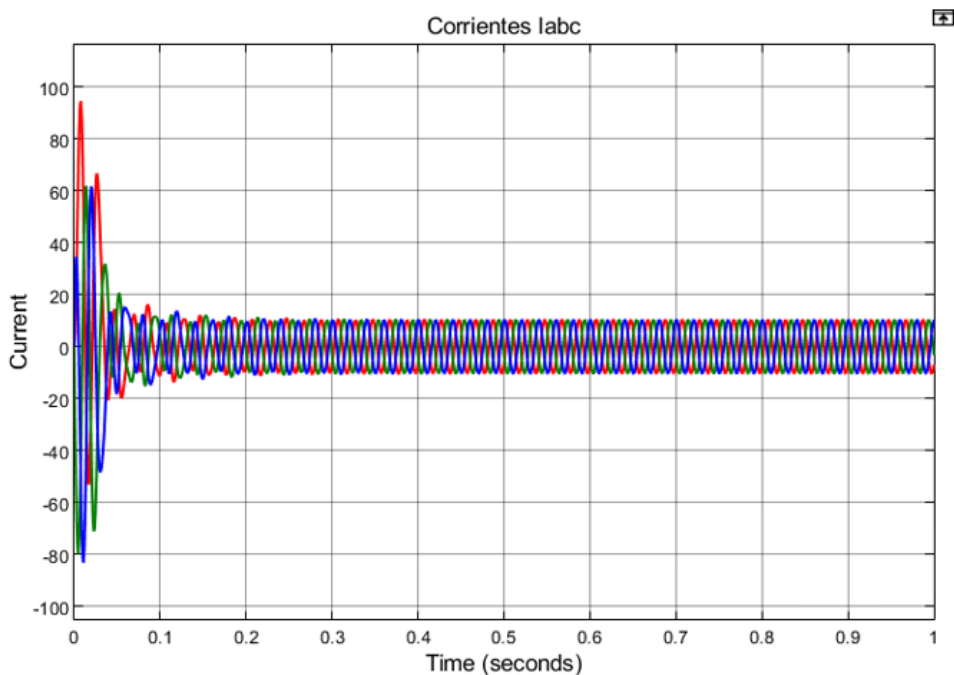
Este comportamiento corresponde al impulso generado por el motor trifásico al momento de arrancar el sistema cuando debe vencer la inercia de la masa de 200 Kg y superar las fuerzas resistentes como la fricción y el peso propio de la carga. Seguidamente se presentan oscilaciones amortiguadas tanto como negativas que reflejan el proceso dinámico del sistema mientras busca alcanzar el equilibrio. Estas variaciones están asociadas a la interacción entre el par motor, la carga mecánica, la fricción viscosa y el control implementado que regula el voltaje y la frecuencia para mantener la estabilidad operativa. A partir de aproximadamente 0.4 segundos la aceleración se estabiliza en torno a cero, lo que indica que el sistema ha alcanzado una velocidad constante.

En este punto ya no se requiere aplicar una aceleración significativa y el movimiento de la correa se mantiene uniforme, cumpliendo así con los requerimientos de operación continua en un entorno industrial. Este comportamiento demuestra que el sistema logra una transición efectiva desde el reposo hasta el régimen permanente sin presentar inestabilidades críticas.

La interpretación de esta gráfica permite validar el diseño del modelo, asegurar la adecuada respuesta dinámica y confirma que el motor proporciona el impulso necesario de manera controlada y eficiente.

3.1.5 Corrientes Estatóricas

La gráfica presentada (figura 3-5) ilustra las corrientes que fluyen a través del estator del motor trifásico, reflejando su comportamiento en respuesta a las demandas de torque y carga del sistema de transporte. Estas corrientes son fundamentales para el desempeño del motor, ya que determinan la potencia eléctrica requerida para generar el movimiento de la correa transportadora.



Fuente: Elaboración propia, realizada en Simulink

Figura 3-5. Gráfica “Corrientes Estatoricas” operando bajo una carga de 200 kg.

En la gráfica de la figura 3-5, se observa un pico inicial de corriente durante el arranque del motor, lo cual es esperado ya que debido al esfuerzo necesario para superar la inercia del sistema y las resistencias mecánicas presentes. A medida que el motor estabiliza su operación y alcanza un régimen constante, las corrientes disminuyen gradualmente y se mantienen en un nivel estable, indicando que el sistema opera de manera eficiente bajo las condiciones de carga establecidas.

Este análisis es esencial para evaluar el comportamiento eléctrico del motor, asegurando que las corrientes se mantengan dentro de los valores previstos para evitar sobrecargas y garantizar una operación confiable. Además, proporciona información útil para validar el diseño del modelo y su capacidad para simular correctamente la interacción entre el motor y la correa transportadora.

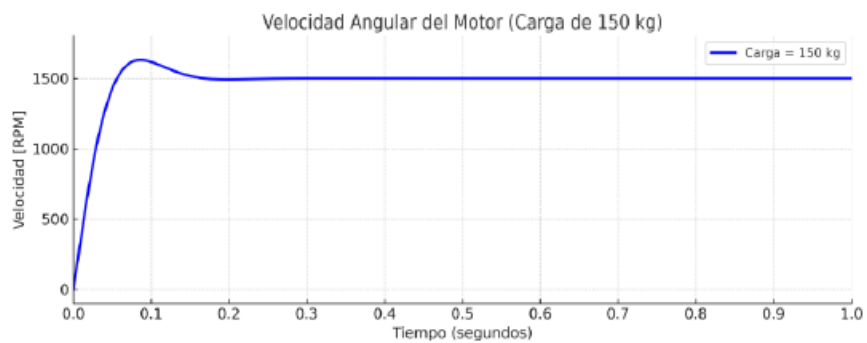
3.2 ESCENARIO 150 KG

El estudio del comportamiento del motor trifásico frente a diferentes condiciones de carga constituye un aspecto fundamental para validar su desempeño en aplicaciones industriales. En particular, la evaluación de la velocidad angular del rotor bajo una carga específica permite determinar la capacidad del sistema para mantener la estabilidad operativa y responder adecuadamente a las demandas mecánicas impuestas por la correa transportadora.

La siguiente simulación, desarrollada en MATLAB/Simulink, muestra la respuesta dinámica del motor cuando la correa transportadora opera con una carga de 150 kg, valor representativo de una condición intermedia de funcionamiento. Este análisis resulta esencial para comprobar la efectividad del modelo propuesto y su correspondencia con el comportamiento esperado de un motor de inducción trabajando en régimen nominal.

3.2.1 La velocidad del rotor

En la siguiente grafica (figura 3-6) se presenta el comportamiento de la velocidad angular del rotor, del motor trifásico cuando el sistema de correa transportadora opera con una carga de 150 kg. Esta representación permite visualizar con claridad la respuesta dinámica del motor ante una carga intermedia, correspondiente a condiciones de operación realistas en contextos industriales.



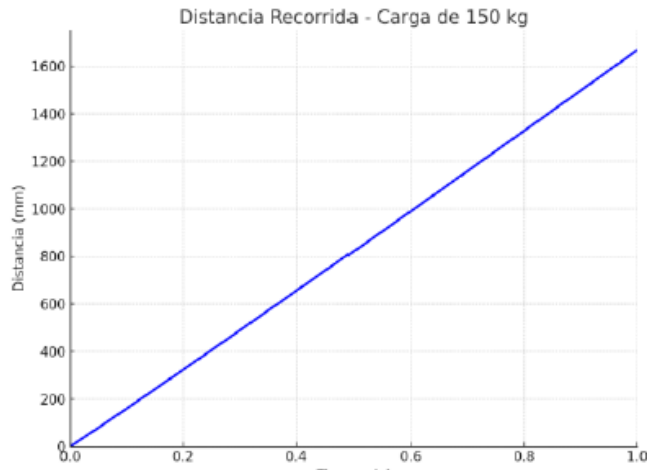
Fuente: Elaboración propia, realizada en Simulink

Figura 3-6. Gráfica “Velocidad de Rotor” operando con una carga de 150 kg.

Según la figura 3-6 durante la fase inicial de arranque, se aprecia un incremento progresivo de la velocidad angular, producto del par electromagnético que comienza a superar la inercia del sistema. A medida que transcurre el tiempo, el sistema alcanza un estado estable donde la velocidad del rotor se aproxima a un régimen constante cercano al 1.500 rpm, valor típico para motores de inducción alimentados a 50 Hz en condiciones nominales.

3.2.2 Distancia recorrida

La distancia recorrida por la correa transportadora constituye una variable clave para evaluar el desempeño global del sistema, ya que representa de forma directa el avance efectivo de la carga en función del tiempo. En el caso particular de una carga de 150 kg.



Fuente: Elaboración propia, realizada en Simulink.

Figura 3-7. Gráfica “Distancia Recorrida” operando bajo una carga de 150 kg.

Se observa en la figura 3-7, un comportamiento dinámico que mantiene la tendencia casi lineal creciente, lo cual indica que, tras una breve aceleración inicial, el sistema alcanza rápidamente un estado de velocidad constante. Este comportamiento es característico de sistemas accionados por motores de inducción trifásicos, donde se busca optimizar la eficiencia energética mediante arranques progresivos y una transición controlada al régimen permanente. Durante los primeros milisegundos de la simulación, específicamente entre 0 y 0.05 segundos, la curva muestra una leve curvatura asociada a la fase de aceleración inicial, momento en el cual el par electromagnético comienza a vencer la inercia del sistema.

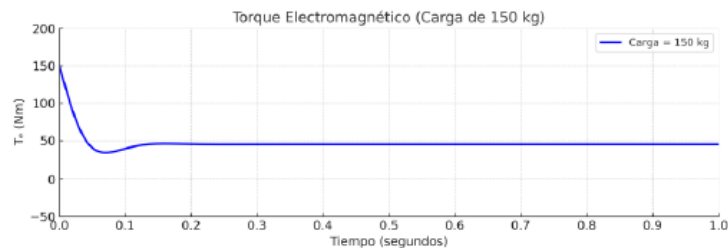
A partir de aproximadamente 0.1 segundos, la pendiente de la gráfica se estabiliza, indicando que la correa ha alcanzado una velocidad constante, manteniendo un movimiento uniforme y sostenido de la carga a lo largo del trayecto.

Al concluir el primer segundo de simulación, se constata que la correa transportadora ha recorrido aproximadamente 1.600 centímetros, lo que demuestra un rendimiento eficiente y adecuado del sistema para el transporte de una carga intermedia como la de 150 kg.

3.2.3 Torque electromagnético

La grafica muestra la evolución del torque electromagnético (T_e) generado por el motor de inducción trifásico durante el primer segundo de simulación, cuando el sistema opera bajo carga de 150 kg.

En el eje vertical se representa el torque en Newton – metro (Nm), mientras que en el eje horizontal se indica el tiempo en segundos.



Fuente: Elaboración propia, realizada en Simulink.

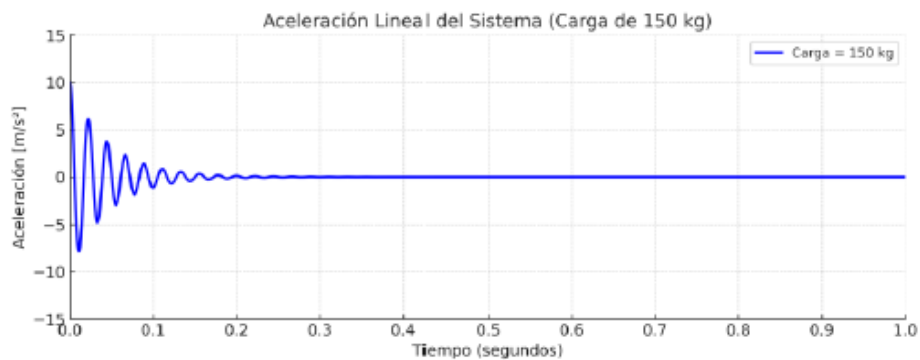
Figura 3-8. Gráfica del "Torque "operando bajo una carga de 150 kg.

Durante los primeros instantes del arranque, se observa en la figura 3-8, un pico de torque de aproximadamente 150 Nm, correspondiente al esfuerzo máximo necesario para vencer la inercia inicial del sistema y movilizar la carga. Este comportamiento es característico del régimen transitorio del motor, en el cual se requiere un alto nivel de torque para superar el estado de reposo, la fricción estática y las fuerzas resistentes asociadas al peso de la carga.

Posteriormente, la gráfica evidencia un comportamiento oscilatorio amortiguado, donde el torque presenta fluctuaciones decrecientes en magnitud a medida que el sistema se ajusta dinámicamente hacia un estado de equilibrio. Estas oscilaciones son consecuencias naturales del proceso de estabilización de un sistema.

3.2.4 Aceleración del Sistema

La aceleración del sistema es una variable crítica durante la fase de arranque, ya que determina como se supera la inercia de la masa transportada y como se transfiere el esfuerzo del motor de la correa de forma eficiente y controlada. Una aceleración progresiva, sin picos abruptos ni oscilaciones inestables, indica que el sistema ha sido correctamente dimensionado.



Fuente: Elaboración propia, realizada en Simulink.

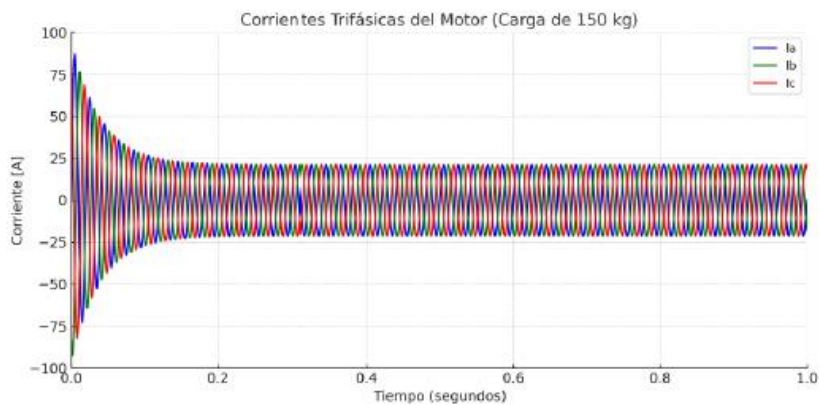
Figura 3-9. Gráfica del "Aceleración" operando bajo una carga de 150 kg.

Según la figura 3-9, muestra la evolución de la aceleración de la correa transportadora en función del tiempo durante el primer segundo de simulación, con una carga de 150 kg. Al inicio se observa un impulso inicial positivo correspondiente al esfuerzo que realiza el motor trifásico para vencer la inercia de una carga considerable y superar fuerzas resistentes tales como la fricción estática, la fricción viscosa y el peso de la carga. Posteriormente aparecen oscilaciones amortiguadas de menor magnitud respecto al caso de 200 kg, tanto positivas como negativas que reflejan el proceso dinámico natural del sistema en búsqueda de un estado de equilibrio.

3.2.5 Corrientes estáticas

Las corrientes del estator en un motor de inducción trifásico representan una variable eléctrica fundamental para evaluar el comportamiento energético del sistema bajo distintas

condiciones de carga. Estas corrientes reflejan la cantidad de energía que deben suministrarse al motor para generar el torque necesario y vencer las resistencias mecánicas del sistema del transporte. Su análisis permite verificar tanto la eficiencia del motor como la adecuación del control aplicado, ya que un sistema correctamente dimensionado y bien controlado debería presentar picos de corrientes breves durante el arranque, seguidos de una estabilización en valores nominales razonables.



Fuente: Elaboración propia, realizada en Simulink

Figura 3-10. Gráfica “Corrientes Estatóricas” operando bajo una carga de 150 kg.

La figura 3-10 correspondiente a la gráfica de la simulación con 150 kg de carga muestra un pico de corrientes estáticas pronunciado durante los primeros instantes, lo cual es consistente con la demanda energética necesaria para iniciar el movimiento de la correa transportadora. Este pico representa el momento en el que el motor debe generar el torque máximo para superar la inercia y las resistencias iniciales, como la fricción estática y el peso de la carga. La magnitud de este pico es inferior al observado en la condición de 200 kg. Pero superior al de la carga más ligera, lo cual es coherente con el nivel intermedio de esfuerzo requerido.

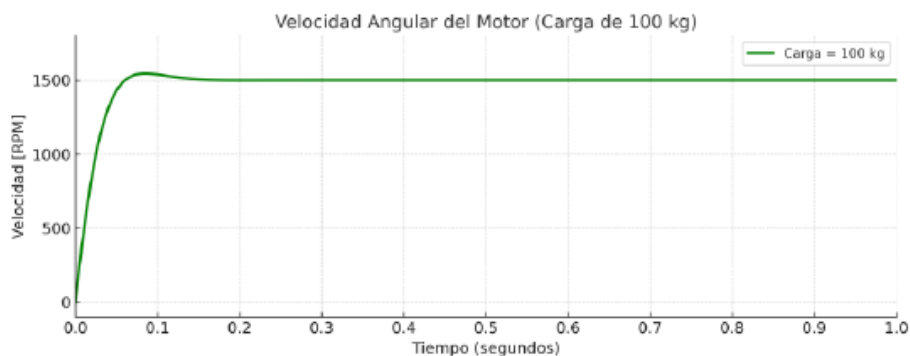
3.3 ESCENARIO 100 KG

La evaluación del desempeño del motor trifásico bajo diferentes niveles de carga permite comprender su comportamiento dinámico y la estabilidad de su régimen operativo. En esta sección se presenta la simulación correspondiente a una carga de 100 kg, con el objetivo de analizar la respuesta del sistema de accionamiento de la correa transportadora ante una condición de trabajo moderada.

La gráfica obtenida mediante MATLAB/Simulink ilustra la evolución temporal de la velocidad angular del rotor, evidenciando el proceso de aceleración durante el arranque y la posterior estabilización en régimen permanente. Este resultado permite verificar que, ante cargas de magnitud media, el motor mantiene una operación eficiente y estable, garantizando un desempeño confiable dentro de los parámetros de diseño establecidos.

3.3.1 Velocidad del rotor

En la siguiente gráfica (figura 3-11) se presenta el comportamiento de la velocidad angular del rotor del motor trifásico cuando el sistema de correa transportadora opera con una carga de 100 kg.



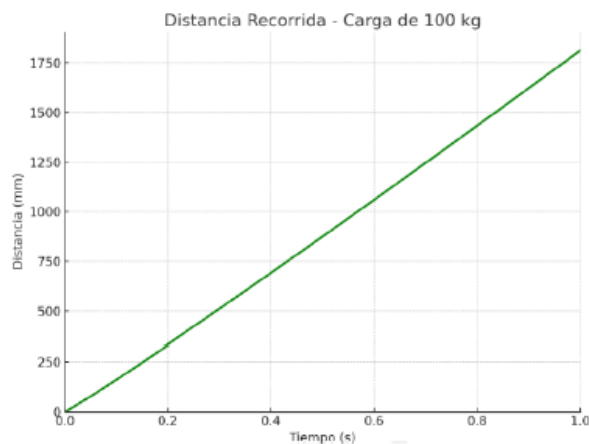
Fuente: Elaboración propia, realizada en Simulink

Figura 3-11. Gráfica “Velocidad de Rotor” operando con una carga de 100 kg.

En la figura 3-11, se puede observar con claridad la respuesta dinámica del sistema ante una carga reducida, lo cual se traduce en una aceleración más rápida del rotor durante la etapa de arranque. Al disminuir la masa transportadora, la inercia del sistema también disminuye permitiendo que el motor alcance el régimen permanente de velocidad de forma más eficiente. La curva evidencia como el rotor incrementa su velocidad progresivamente hasta estabilizarse en torno a los 1.500 rpm.

3.3.2 Distancia Recorrida

La distancia recorrida por la correa transportadora al operar con una carga de 100 kg constituye un indicador fundamental para analizar el comportamiento del sistema ante condiciones de carga moderada. Esta variable permite validar si el sistema conserva su eficiencia y control al reducir su masa transportada, lo cual es especialmente relevante en aplicaciones industriales donde se requiere versatilidad para adaptarse a distintas condiciones operativas.



Fuente: Elaboración propia, realizada en Simulink.

Figura 3-12. Gráfica “Distancia Recorrida” operando bajo una carga de 100 kg.

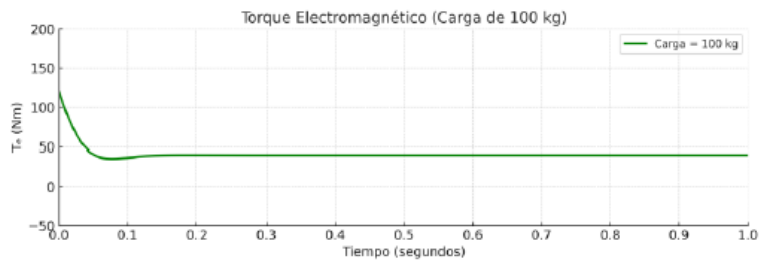
En esta simulación se observa en la figura 3-12, un patrón de crecimiento prácticamente lineal, lo que indica una rápida transición desde el arranque hacia un estado de velocidad constante.

Durante los primeros instantes específicamente entre 0 y 0.005 segundos, la gráfica presenta una leve curvatura ascendente, propia de la fase inicial de la aceleración, donde el motor comienza a superar la inercia de la carga. No obstante, debido a la menor masa esta etapa es más leve y eficiente que en cargas superiores. A partir aproximadamente en 0.08 segundos la pendiente se estabiliza visiblemente, lo que refleja que el sistema ha alcanzado un régimen de velocidad constante, manteniendo un desplazamiento uniforme de la carga con un esfuerzo mecánico sostenido y controlado.

Al término del primer segundo de simulación la correa ha recorrido aproximadamente 1.800 centímetros, lo que representa una mejora en el rendimiento de transporte respecto a cargas mayores, sin comprender la estabilidad del sistema.

3.3.3 Torque Electromagnético

El torque electromagnético (T_e) es una de las variables más relevante en el análisis del comportamiento dinámico de sistemas de tracción eléctrica, como lo es una correa transportadora accionada por un motor de inducción trifásico. Esta magnitud representa la fuerza rotacional que el motor es capaz de generar para superar la inercia de la carga y mantener su desplazamiento a lo largo del tiempo. Su estudio permite comprender como responde el sistema frente a distintas exigencias mecánicas y evaluar si el diseño del motor y su control resultan adecuados para las condiciones operativas definidas como aparece en la figura 3-13.

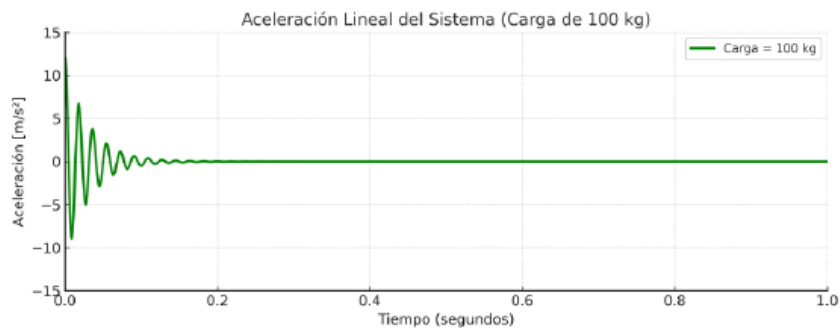


Fuente: Elaboración propia, realizada en Simulink.

Figura 3-13. Gráfica del “Torque “operando bajo una carga de 100 kg

3.3.4 Aceleración del sistema

En los sistemas electromagnéticos de transporte, como una correa transportadora accionada por un motor de inducción trifásico, la aceleración es una variable clave durante la fase de arranque, ya que está directamente relacionada con la capacidad del sistema para vencer la inercia de la carga y alcanzar una velocidad operativa estable en un tiempo eficiente. Un perfil de aceleración suave progresivo y sin oscilaciones abruptas es indicativo de un diseño mecánico y eléctrico equilibrado, así como de una estrategia de control eficaz, capaz de gestionar los transitorios sin comprometer la estabilidad del sistema.



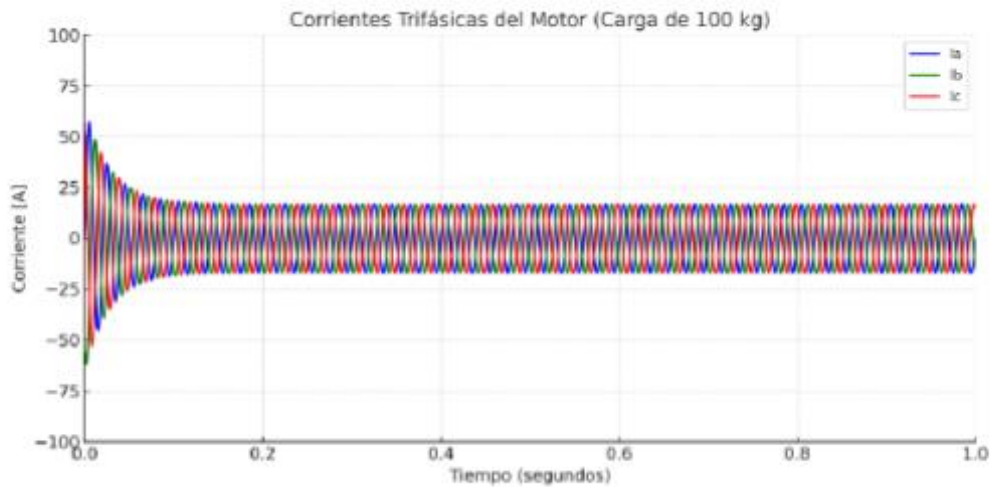
Fuente: Elaboración propia, realizada en Simulink.

Figura 3-14. Gráfica del “Aceleración “operando bajo una carga de 100 kg.

La figura 3-14 correspondiente a la gráfica de la simulación de la carga de 100 kg muestra un impulso inicial de aceleración positiva, que genera en el instante en que el motor comienza a superar la inercia del sistema. Este impulso es menos pronunciado que en cargas superiores y se desarrolla durante un tiempo corto, lo que refleja una respuesta más rápida y controlada del sistema, Aproximadamente a partir de los 0.3 segundos, la curva tiende a estabilizarse a torno cero, indicando que la aceleración ha disminuido hasta valores insignificantes y por lo tanto el sistema ha alcanzado una velocidad constante. Desde este punto el movimiento es uniforme y sostenido, sin requerir un esfuerzo adicional por parte del motor. Este comportamiento confirma que el sistema no solo está bien dimensionado, sino que también está controlado de manera eficaz, permitiendo una transición eficiente del arranque hasta el régimen permanente sin pérdida de estabilidad.

3.3.5 Aceleración del sistema

La corriente del estator en un motor de inducción trifásico constituye a un parámetro eléctrico clave para evaluar el consumo energético y la eficiencia del sistema ante distintas condiciones de carga. Estas corrientes representan la cantidad de energía eléctrica que el motor transforma en el torque mecánico para movilizar la correa transportadora, y están directamente por la masa transportada, la fricción presente y la estrategia de control utilizada. Como se puede observar en la figura 3-15.



Fuente: Elaboración propia, realizada en Simulink

Figura 3-15. Gráfica “Corrientes Estatoricas” operando bajo una carga de 100 kg.

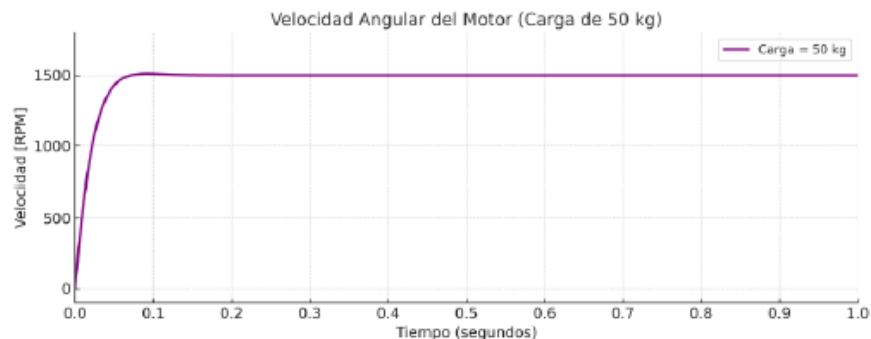
3.4 ESCENARIO 50 KG

El análisis del comportamiento del motor trifásico bajo cargas reducidas permite evaluar su capacidad de respuesta y eficiencia en condiciones de operación ligera. En esta simulación se presenta el desempeño del sistema cuando la correa transportadora trabaja con una carga de 50 kg, representando un escenario de baja exigencia mecánica.

La gráfica obtenida mediante MATLAB/Simulink muestra la evolución de la velocidad angular del rotor desde el arranque hasta su estabilización, evidenciando una rápida aceleración y la pronta convergencia hacia el régimen permanente cercano a 1.500 rpm. Este comportamiento confirma que el motor responde de forma estable y eficiente ante cargas menores, manteniendo la regularidad de operación y cumpliendo con los parámetros esperados de desempeño dinámico.

3.4.1 Velocidad del rotor

En la siguiente gráfica (figura 3-16) se presenta el comportamiento de la velocidad angular del rotor del motor trifásico cuando el sistema de correa transportadora opera con una carga de 50 kg.



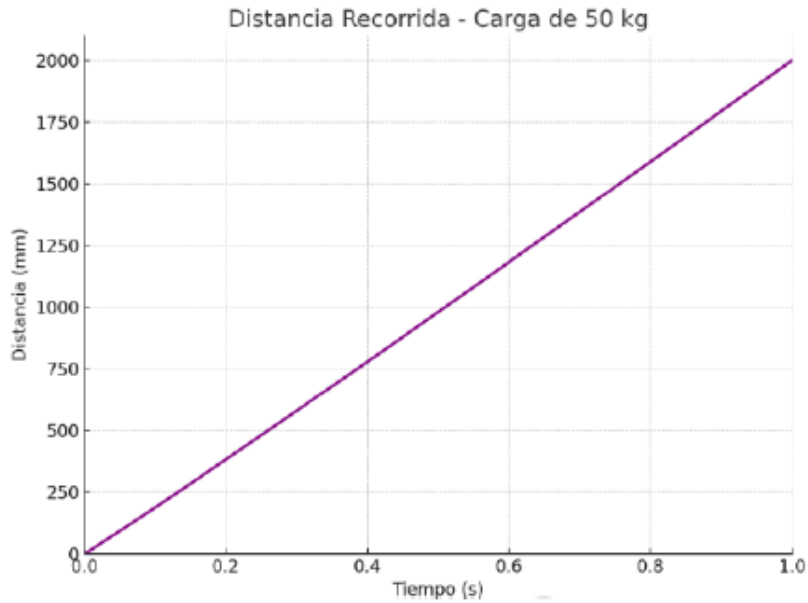
Fuente: Elaboración propia, realizada en Simulink

Figura 3-16. Gráfica “Velocidad de Rotor” operando con una carga de 50 kg.

Esta representación en la figura 3-16, permite observar con claridad la respuesta dinámica del sistema ante una carga significativamente reducida, lo que se traduce en una aceleración aún más rápida del rotor durante la etapa de arranque. Al tratarse de una masa menor, la inercia que el motor debe vencer disminuye considerablemente, facilitando que el sistema alcance con mayor rapidez el régimen permanente de velocidad. La curva evidencia como el rotor incrementa la velocidad de forma progresiva hasta estabilizarse en un entorno a los 1.500 rpm.

3.4.2 Distancia recorrida

La distancia recorrida por la correa transportadora con una carga de 50 kg refleja el comportamiento del sistema ante una condición de carga mínima, lo cual permite evaluar su capacidad para operar de manera eficiente en escenarios de baja exigencia mecánica. Esta variable es esencial para verificar si el sistema puede mantener un transporte fluido y continuo, incluso cuando la masa a desplazar es reducida.



Fuente: Elaboración propia, realizada en Simulink.

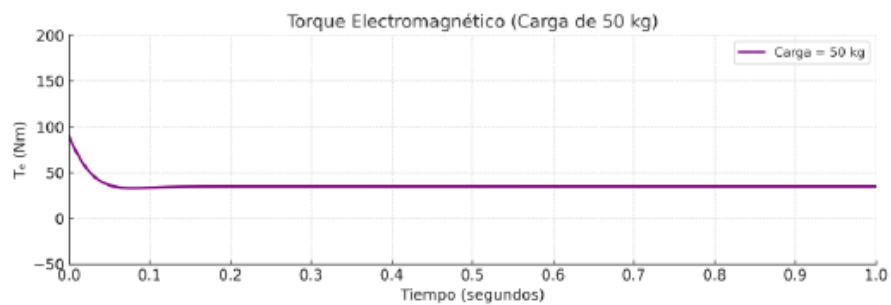
Figura 3-17. Gráfica “Distancia Recorrida” operando bajo una carga de 50 kg.

En la figura 3-17, se observa una curva creciente de forma casi perfectamente lineal, con una pendiente visiblemente más pronunciada que en los casos de cargas mayores, lo que evidencia una aceleración inicial más rápida y una transición temprana hacia el régimen permanente.

En este tramo inicial, correspondiente a los primeros 0.03 a 0.05 segundos, se aprecia una ligera curvatura ascendente producto del arranque del motor, donde se genera el par necesario para iniciar el movimiento de carga. Esta etapa es notoriamente más breve y menos exigente gracias a la menor inercia asociada a los 50 kg. Posteriormente a partir de aproximadamente 0,07 segundos, la pendiente se estabiliza indicando que el sistema ha alcanzado una velocidad angular constante, lo que permite un desplazamiento uniforme y sostenido de la carga con un consumo energético optimizado.

3.4.3 Torque electromagnético

El análisis del torque electromagnético (T_e) es esencial para evaluar la capacidad del motor de inducción trifásico de responder adecuadamente frente a distintas condiciones de carga de sistema. Este torque representa la fuerza rotacional que el motor aplica para iniciar el movimiento de la carga y mantenerla en desplazamiento constante, siendo una variable directamente afectada por la masa transportada. En el caso de una carga reducida, como 50 kg, se espera que la demanda de torque sea considerablemente menor, tanto en la fase de arranque como en el régimen estacionario.



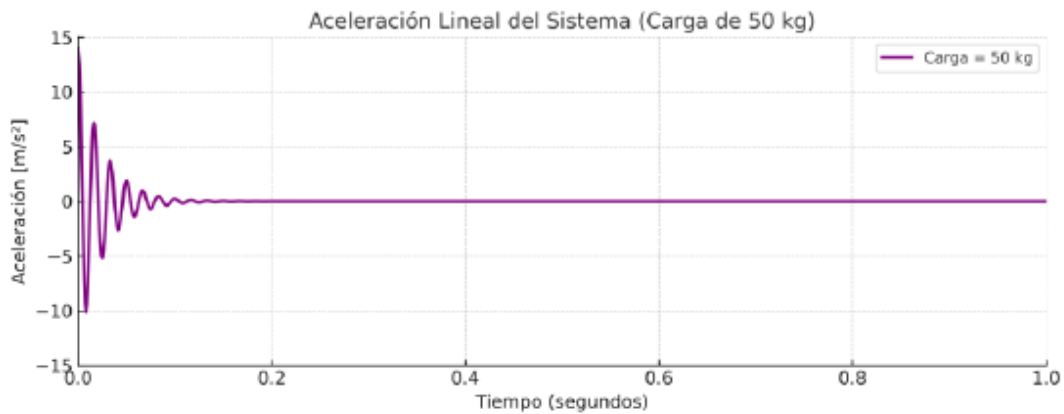
Fuente: Elaboración propia, realizada en Simulink.

Figura 3-18. Grafica del "Torque "operando bajo una carga de 50 kg.

La grafica corresponde a la figura 3-18 es la simulación con una carga de 50 kg muestra que el torque electromagnético alcanza un pico inicial cercano a los 110 Nm, lo que representa el esfuerzo mínimo necesario para vencer la inercia y poner en movimiento la correa transportadora. En comparación con los escenarios de mayor carga, este pico es más bajo y se presenta en un periodo más corto, lo que refleja un arranque más rápido y menos exigente por el motor.

3.4.4 Aceleración del sistema

En sistemas de transporte industrial, como una correa transportadora accionada por un motor de inducción trifásico, la aceleración representa un indicador fundamental para evaluar el rendimiento dinámico en la fase de arranque. Su análisis permite identificar como se transfiere la energía desde el motor de carga y como el sistema responde ante las variaciones de resistencia mecánica.



Fuente: Elaboración propia, realizada en Simulink

Figura 3-19. Gráfica “Aceleración” operando bajo una carga de 50 kg.

La figura 3-19 es la gráfica correspondiente a la carga de 50 kg muestra un perfil de aceleración que comienza con un impulso inicial moderado, pero claramente definido, correspondiente al momento en que el motor inicia el movimiento de la carga. Debido a la baja masa, el pico de aceleración es más breve y de menor magnitud que en los casos anteriores y el sistema responde de forma inmediata al par aplicado por el motor. Esta rápida aceleración inicial indica que el sistema enfrenta muy poca oposición mecánica, por lo que se alcanza con facilidad la velocidad deseada.

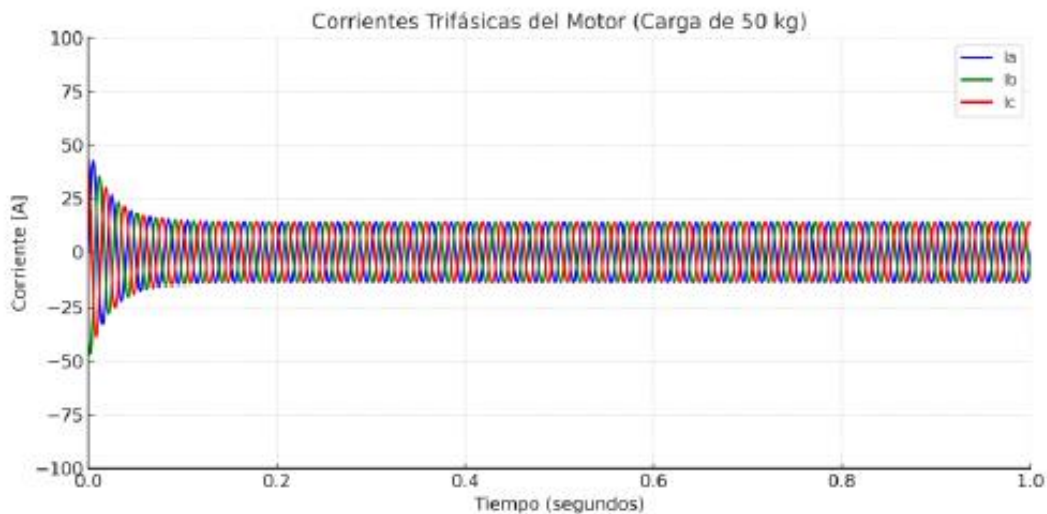
A continuación, se evidencian pequeñas oscilaciones amortiguadas que reflejan el corto régimen transitorio del sistema. Estas fluctuaciones tanto positivas como negativas, decrecen

rápidamente mostrando que el sistema se ajusta dinámicamente con la eficiencia. A partir de los 0.25 segundos la curva de aceleración se estabiliza en torno a cero, lo cual señala que el sistema ha alcanzado un régimen de velocidad constante y ya no requiere aplicar aceleración inicial.

Este comportamiento confirma que el modelo simulado está correctamente calibrado para cargas livianas y que tanto como el control implementada permiten una transición rápida, fluida y son inestabilidades.

3.4.5 Corriente estáticas

Las corrientes que circulan por el estator del motor trifásico representan una de las variables más relevantes para evaluar el comportamiento eléctrico del sistema frente a distintas condiciones de carga. Estas corrientes están directamente relacionadas con el torque que el motor debe generar y por lo tanto, con el esfuerzo eléctrico necesario para poner en movimiento de la carga y mantenerla en desplazamiento uniforme. En entornos industriales, donde la eficiencia energética y la confiabilidad operativa es fundamental para analizar el perfil de estas corrientes que permiten verificar si el sistema está funcionando dentro de los márgenes seguros.



Fuente: Elaboración propia, realizada en Simulink

Figura 3-20. Gráfica “Corrientes Estatoricas” operando bajo una carga de 50 kg.

La figura 3-20 es la gráfica correspondiente a la simulación de 50 kg de carga muestra un pico inicial de corriente relativamente bajo en comparación a los escenarios de mayor masa. Este impulso eléctrico se produce en los primeros instantes de arranque, cuando el motor debe generar el par suficiente para superar la inercia inicial y poner en movimiento la correa. Gracias a la reducida masa, el esfuerzo requerido es mínimo y por lo tanto el consumo de corriente también es considerablemente menor.

Tras este breve pico, las corrientes experimentan una rápida estabilización alcanzando un valor constante de forma casi inmediata. A lo largo del resto de la simulación, se observa un comportamiento eléctrico estable sin oscilaciones ni sobre corrientes, lo que refleja un excelente control de sistema y una demanda energética optimizada. Este comportamiento confirma que el modelo está correctamente diseñado y que el sistema de control mantiene una operación altamente eficiente y segura en condiciones de carga baja. En términos prácticos esto garantiza un desempeño confiable del motor en contextos variables donde la masa transportada puede variar sin afectar negativamente la estabilidad del sistema.

3.5 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

El análisis comparativo realizado constituye una herramienta clave para visualizar y comprender como varían las principales magnitudes dinámicas del sistema de correa transportadora en función de la carga transportada. Se evaluaron cuatro escenarios de operación, correspondientes a cargas de 200 kg, 150 kg, 100 kg y 50 kg y se estudiaron cinco variables críticas: aceleración, velocidad, torque, electromagnético, corrientes estáticas y distancia recorrida. Los resultados obtenidos mediante simulaciones en Simulink evidencian tendencias claras y comportamientos característicos de un sistema electromecánico real bajo diferentes condiciones de exigencia.

En cuanto a la aceleración se observó que en 200 kg el sistema responde de forma lenta con una curva de aceleración baja y oscilaciones prolongadas antes de alcanzar la estabilización.

Al disminuir la carga, la respuesta se vuelve más rápida y estable; con la carga de 150 kg la aceleración mejora con oscilaciones moderadas; con la carga de 100 kg es más alta y presenta oscilaciones breves y con la carga de 50 kg se alcanza la aceleración máxima casi inmediato, con un comportamiento muy estable. Esta evolución refleja claramente la relación entre la masa transportada y la resistencia dinámica inicial del sistema.

La variable de la velocidad mostro un comportamiento igualmente progresivo. Con la carga máxima, la velocidad tarda más en alcanzar su valor nominal, incluyendo un leve sobrepaso antes de estabilizarse. Al reducir la carga, el tiempo de estabilización mejora considerablemente: con la carga de 150 kg y 100 kg se alcanza el régimen deseado con menor sobre oscilación y con la carga de 50 kg el sistema logra una respuesta prácticamente instantánea y precisa. Esto demuestra como el motor adapta su entrega de energía en función de la demanda real, manteniendo un control dinámico eficiente.

Respecto al torque electromagnético se identificaron diferencias significativas entre los distintos escenarios. Con la mayor carga, el sistema presenta un pico inicial elevado y oscilaciones prolongadas antes de estabilizarse. Al reducir el peso estos picos se suavizan y la estabilización ocurre más rápidamente. Con cargas medias y bajas, el torque alcanza valores moderados con curvas más amortiguadas. Esta adaptación evidencia la capacidad del motor para regular su esfuerzo mecánico según la necesidad operativa, evitando consumos excesivos de energía cuando no son requeridos.

Las corrientes estatóricas mostraron un comportamiento directamente proporcional a la carga transportada. A mayor peso, mayor fue el pico de corriente registrado durante el arranque y más lento fue el proceso de estabilización. Con cargas más livianas, los picos disminuyen y la respuesta se vuelve más rápida, lo cual representa no solo una mejora en eficiencia energética, sino también una mayor sostenibilidad operativa del sistema.

La distancia recorrida durante un segundo de simulación ofreció una medida clara del rendimiento del sistema bajo diferentes condiciones. A medida que la carga disminuye, la distancia aumento de forma progresiva, indicando una aceleración más eficiente y una mejor capacidad de traslado en el mismo intervalo de tiempo. Este parámetro se relaciona directamente

con los anteriores y sirve como indicador del comportamiento global del sistema bajo carga dinámica.

Desde una perspectiva técnica los análisis de estos parámetros permiten comprender como cada uno refleja una dimensión específica del comportamiento del sistema y como se interrelacionan para formar una respuesta integral ante distintas condiciones de operación. La aceleración indica la capacidad del sistema para superar la inercia inicial, mientras que la velocidad sintetiza el éxito del arranque. El torque electromagnético refleja la eficiencia del motor en su adaptación mecánica y las corrientes estatóricas aportan una visión energética del proceso. Finalmente, la distancia recorrida actúa como una consecuencia lógica del desempeño de las demás variables, permitiendo validar no solo la fidelidad del modelo sino también su coherencia interna y su potencial de mejora.

En conjunto este estudio de simulación no solo permitió observar el sistema en acción, sino que abrió la puerta a un entendimiento profundo del mismo revelando oportunidades reales de optimización para su aplicación de entornos industriales.

CONCLUSIÓN

El desarrollo de este trabajo ha representado una experiencia académica y personal de profundo valor formativo, que trascendió ampliamente el marco de la programación de bloques o la obtención de resultados numéricos. Desde las primeras etapas de formulación del modelo hasta el análisis de los resultados obtenidos, este trabajo se ha convertido en una oportunidad para explorar con rigurosidad técnica del comportamiento de un sistema de transporte industrial complejo, representado mediante herramientas digitales de alto nivel como MATLAB y Simulink. Estas plataformas no solo permitieron construir un modelo robusto sino también visualizar de forma estructurada y detallada las interacciones entre los diferentes subsistemas eléctricos, mecánicos y dinámicos de una correa transportadora accionada por un motor de inducción trifásico.

Uno de los elementos más enriquecedores de este estudio fue la posibilidad de comparar el comportamiento del sistema bajo distintos escenarios de carga, específicamente con masas de 200, 150, 100 y 50 kg. Esta comparativa no solo permitió validar el funcionamiento del modelo ante distintas exigencias operativas, sino también evaluar de manera objetiva como varían las principales variables del sistema en función de la carga aplicada. A través de gráficos generados desde la simulación fue posible observar con claridad el efecto directo que tiene la masa transportada sobre el rendimiento del sistema, tanto en su fase de arranque como en su estado de régimen permanente.

Por ejemplo, al comparar las curvas de aceleración del sistema, se evidencio que a menor carga la aceleración inicial es más pronunciada y el tiempo necesario para estabilizarse en la velocidad final reduce notablemente. Este comportamiento es coherente con los principios físicos del movimiento rotacional, lineal y valida que el modelo representa adecuadamente la influencia de la inercia y la fuerza neta sobre el sistema. En este caso de 50 kg, el sistema alcanzo rápidamente un estado estable, mientras que con 200 kg se apreció un arranque más progresivo, lo cual es deseable para evitar tensiones mecánicas excesivas.

En cuanto a la velocidad angular del rotor, las gráficas mostraron una tendencia muy clara en todos los casos, el sistema logro estabilizarse en torno a las 1.490 – 1.500 rpm, típicos de motores de inducción trifásicos alimentados a 50 Hz. Sin embargo, la diferencia residió en la duración y suavidad del proceso de estabilización. Con mayor carga la curva presento oscilaciones más prolongadas antes de alcanzar el valor final. Este comportamiento es fundamental para evaluar la robustez del sistema y su capacidad de mantener un régimen constante frente a variaciones de esfuerzo.

Las gráficas de torque electromagnético resultaron particularmente ilustrativas. En los escenarios con mayor carga como el de los 200 kg, se evidenciaron picos de torque más altos al inicio, que luego descendieron y se estabilizaron conforme al sistema alcanzaba su velocidad nominal. A medida que la carga disminuye también lo hace el esfuerzo requerido del motor, generando curvas de toque más suaves con picos menos pronunciados. Esta observación permitió verificar que el motor está correctamente dimensionado para la gama de cargas dimensionadas y que responde adecuadamente ante diferentes niveles de exigencia mecánica.

Otro aspecto destacado fue la evaluación de las corrientes del estator, las cuales reflejaron el comportamiento energético del motor en función de la carga. Se observó que, en los casos de mayor masa transportada, la corriente inicial era más alta, lo cual es esperable debido al esfuerzo necesario para vencer la inercia. A medida que se reduce la carga, las corrientes iniciales disminuyen lo que sugieren una operación más eficiente desde el punto de vista energético. Esta variable también evidencio un comportamiento estable en régimen permanente, validando el buen desempeño del sistema eléctrico.

En lo que respecta a la distancia recorrida en el intervalo de simulación, las gráficas permitieron verificar que una vez alcanzado el régimen estable, la correa transportadora mantiene una velocidad constante, resultando en una progresión lineal de la distancia en el tiempo. Esto se repitió en los cuatro escenarios, lo cual demuestra que el sistema cumple correctamente con su función principal de trasladar materiales de forma continua, predecible y segura.

Cabe destacar que la posibilidad de comparar todas estas variables de forma gráfica y simultánea, gracias al entorno de simulación digital, permitió una visión holística del sistema. Se pudo observar como pequeñas variaciones en una variable influyen a las demás y como el sistema en su conjunto se adapta frente a diferentes exigencias. Esta capacidad de análisis integral no solo permite diagnosticar comportamientos anómalos, sino también anticiparse a fallas, dimensionar correctamente los componentes y plantear estrategias de mejora fundamentadas.

El análisis comparativo de las gráficas obtenidas para las distintas cargas aplicadas al sistema de correa transportadora (200, 150, 100 y 50 kg) permitió comprender en profundidad como varía el comportamiento dinámico del sistema según el nivel de esfuerzo requerido. Esta comparación fue esencial para validar el modelo desarrollado en Simulink y evaluar su respuesta bajo condiciones realistas y progresivamente exigentes.

En primer lugar, las gráficas de velocidad mostraron una tendencia consistente en todos los escenarios: una vez superada la fase de aceleración, la velocidad lineal de la correa se estabiliza de manera uniforme. Sin embargo, a mayor carga, el sistema requirió un mayor tiempo de estabilización y presentó una pendiente de incremento más suave. En contraste

Con cargas más ligeras, la velocidad final alcanzó más rápidamente, evidenciando una menor resistencia inicial al movimiento.

La aceleración del sistema, estrechamente ligada a la masa transportada, reveló una evolución suave en todos los casos, pero con diferencias marcadas en su magnitud y duración. A menor carga, la aceleración inicial fue más elevada y de menor duración, lo que indica una respuesta más ágil del sistema. En caso de 200 kg, la curva mostró una aceleración más baja y sostenida por un tiempo mayor, reflejando el esfuerzo adicional requerido para poner en movimiento la carga.

Las corrientes estáticas por su parte, demostraron ser un excelente indicador del esfuerzo eléctrico del motor. En los escenarios de mayor carga, se observaron picos de corrientes más altos durante la fase de arranque, seguidos por una estabilización en niveles proporcionalmente más elevados que en los casos de carga ligera. Este comportamiento es

coherente con la mayor demanda de potencia para mover masas pesadas y valida el desempeño eléctrico del sistema en función de su carga mecánica.

La distancia recorrida a lo largo del tiempo mostro un patrón lineal una vez alcanzado el régimen permanente, lo que confirma la regularidad del sistema de transporte tras el arranque. Sin embargo, en cargas más altas, el tiempo inicial necesario para alcanzar esa linealidad fue mayor, dado que la velocidad se estabilizaba más lentamente. En cambio, con cargas menores la pendiente de la curva fue más constante desde los primeros segundos de la simulación.

Finalmente, las gráficas del torque electromagnético fueron particularmente reveladoras. Se registraron picos iniciales considerables para las cargas de 200 y 150 kg, que luego disminuyeron y se estabilizaron, reflejando el proceso de adaptación del motor a la carga. En condiciones de menor masa, el torque requerido fue significadamente inferior, tanto en el pico como en el estado estable, lo que confirma la correcta relación entre el esfuerzo mecánico y la demanda energética del motor.

En conjunto, esta comparativa gráfica evidencio que el sistema responde de forma coherente a los principios físicos del movimiento, el electromagnetismo y la dinámica de sistemas. Además, proporciono una validación práctica del modelo, mostrando que es capaz de simular con precisión distintos estados de operación. Esta capacidad de análisis permite no solo anticipar comportamientos reales del sistema ante distintas cargas, sino también ajustar parámetros de diseño y operación con miras a mejorar la eficiencia, estabilidad y rendimiento global del sistema de transporte.

Con base en el análisis detallado y comparativo de las gráficas obtenidas, es posible afirmar que en este trabajo no solo permitió modelar un sistema de correa transportadora con un alto grado de realismo técnico, sino que también abrió un espacio profundo de comprensión sobre como pequeños cambios en las condiciones operativas pueden generar impactos significativos en el comportamiento del sistema. Ver reflejadas en cada curva las consecuencias directas de aumentar o disminuir la carga en la aceleración, en torque, en las corrientes eléctricas o en la distancia recorrida fue una experiencia formativa invaluable. Más allá de los datos este proceso significo conectar teoría con práctica, lógica matemática con funcionamiento físico y simulación digital con realidad industrial. Cada grafico represento mucho más que una salida de

software: fue el reflejo del esfuerzo por entender, modelar y mejorar y mejorar un sistema complejo. Esta experiencia reafirma el enorme potencial de las herramientas digitales en la ingeniería moderna y deja una huella profesional y personal en mi camino como ingeniero, motivándome a seguir explorando, cuestionando y aportando con pasión y compromiso al desarrollo tecnológico.

Bibliografía

- Alexander, C. K. (2003). *Circuits, fundamentals of electric*. McGraw-Hill College.
- Applied Technology Council (ATC). (1995). *Earthquake damage evaluation data for California* (Technical Report). Seismic Safety Commission.
- Fraile Mora, J. (2016). *Máquinas eléctricas* (8va ed.). Garceta Grupo Editorial.
- López Roa, A. (2002). *Cintas transportadoras*. Cie dossat.
- Organización Internacional de Medidas. (2015, 2 de enero). *El Sistema Internacional de Unidades SI*. [Archivo PDF].
http://www2.cem.es:8081/cem/es_ES/documentacion/generales/SIU8edes.pdf
- Sanz, J. (2002). *Máquinas eléctricas*. Pearson Educación.
- Shell, M. (2007). *Preparation of papers for IEE TRANSACTION and JOURNALS*. [Documento no publicado o Incompleto].
- Tsipkin, A. G. (1998). *Fórmulas matemáticas: Álgebra, Geometría, Análisis Matemático*. Mir.
- van Weert, T. J., & Munro, R. K. (2003). Informatics and the digital society: Social, ethical and cognitive issues. En *Open Conference on Social, Ethical and Cognitive Issues of Informatics and ICT*. Dortmund, Germany.
- Wigner, E. P. (1965). Theory of traveling wave optical laser. *Physical Review*, 134, A635–A646.