



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO  
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE APIZACO



# **INSTITUTO TECNOLÓGICO DE APIZACO**

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

**“ANÁLISIS DE DATOS DE UN MOTOR DE IMANES PERMANENTES USANDO  
UN ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN EVOLUTIVA”**

## **TESIS**

PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN SISTEMAS COMPUTACIONALES**

PRESENTA:

**ING. CARLOS RAÚL SÁNCHEZ BECERRIL**

ASESORES:

**DR. JOSÉ CRISPÍN HERNÁNDEZ HERNÁNDEZ**

**DR. EDMUNDO BONILLA HUERTA**

ASESOR EXTERNO:

**Dr. ENRIQUE MELGOZA VÁZQUEZ**

**APIZACO, TLAXCALA**

**AGOSTO 2018**



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MEXICO

Instituto Tecnológico de Apizaco

Apizaco, Tlax., 03 de Agosto de 2018

ASUNTO: Aprobación del trabajo de Tesis de Maestría.

**DR. JOSÉ FEDERICO CASCO VÁSQUEZ**  
**JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE**  
**POSGRADO E INVESTIGACIÓN.**  
**P R E S E N T E.**

Por este medio se le informa a usted, que los integrantes de la **Comisión Revisora** para el trabajo de tesis de maestría que presenta el **ING. CARLOS RAÚL SÁNCHEZ BECERRIL** con N° de control **M10370749**, candidato al grado de **Maestro en Sistemas Computacionales** y egresado del **Instituto Tecnológico de Apizaco**, cuyo tema es "**ANÁLISIS DE DATOS DE UN MOTOR DE IMANES PERMANENTES USANDO UN ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN EVOLUTIVA**", fue:

**A P R O B A D O**

Lo anterior, al valorar el trabajo profesional presentado por el candidato y constatar que las observaciones que con anterioridad se le marcaron así como correcciones sugeridas para su mejora ya han sido realizadas.

Por lo que se avala se continúe con los trámites pertinentes para su titulación.

Sin otro particular por el momento, le envió un cordial saludo.

LA COMISIÓN REVISORA

  
**DR. JOSÉ CRISPIN HERNÁNDEZ HERNÁNDEZ**

  
**DR. EDMUNDO BONILLA HUERTA**

  
**M.C. EDUARDO SÁNCHEZ LUCERO**

  
**DR. JOSÉ FEDERICO RAMÍREZ CRUZ**

C. p.- Interesado



Carretera Apizaco-Tzompantepec, Esq. con Av. Instituto Tecnológico S/N  
 Conurbado Apizaco-Tzompantepec, Tlaxcala, Méx.  
 C.P. 90300, Apizaco, Tlax. Tels. 01241 4172010, Ext. 146, 246  
 e-mail: [depi@apizaco.tecnm.mx](mailto:depi@apizaco.tecnm.mx), [www.itapizaco.edu.mx](http://www.itapizaco.edu.mx)





TECNOLÓGICO NACIONAL DE MEXICO

Instituto Tecnológico de Apizaco

Apizaco, Tlax., 07 de Agosto de 2018

No. de Oficio: DEPI/287/18

ASUNTO: Se Autoriza Impresión de Tesis de Grado.

**ING. CARLOS RAÚL SÁNCHEZ BECERRIL**  
 CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO  
 EN SISTEMAS COMPUTACIONALES  
 No. de Control: **M10370749**  
 PRESENTE.

Por este medio me permito informar a usted, que por aprobación de la Comisión Revisora asignada para valorar el trabajo, mediante la Opción: I Tesis de Grado por Proyecto de Investigación, de la Maestría en Sistemas Computacionales, que presenta con el tema: "ANÁLISIS DE DATOS DE UN MOTOR DE IMANES PERMANENTES USANDO UN ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN EVOLUTIVA" y conforme a lo establecido en el Procedimiento para la Obtención del Grado de Maestría en el Instituto Tecnológico, la División de Estudios de Posgrado e Investigación a mi cargo le emite la:

#### AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

Debiendo entregar un ejemplar del mismo debidamente encuadernado y seis copias en CD en formato PDF, para presentar su Acto de Recepción Profesional a la brevedad.

Sin otro particular por el momento, le envío un cordial saludo.

**ATENTAMENTE**  
 EXCELENCIA EN EDUCACIÓN TECNOLÓGICA®  
 PENSAR PARA SERVIR, SERVIR PARA TRIUNFAR®

  
**DR. JOSÉ FEDERICO CASCO VÁSQUEZ**  
 JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE  
 POSGRADO E INVESTIGACIÓN.



SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA  
 TECNOLÓGICO NACIONAL  
 DE MÉXICO  
 INSTITUTO TECNOLÓGICO DE APIZACO  
 DIVISIÓN DE ESTUDIO  
 DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

JFCV/MSH\*mebr.

C.p. Expediente.



Carretera Apizaco-Tzompantepec, Esq. con Av. Instituto Tecnológico S/N  
 Conurbado Apizaco-Tzompantepec, Tlaxcala, Méx.  
 C.P. 90300, Apizaco, Tlax. Tels. 01241 4172010, Ext. 146, 246  
 e-mail: [depi@apizaco.tecnm.mx](mailto:depi@apizaco.tecnm.mx), [www.itapizaco.edu.mx](http://www.itapizaco.edu.mx)



---

# Agradecimientos

Agradezco a mi director de tesis el Dr. Crispín Hernández Hernández, por compartir sus conocimientos y consejos para la realización de esta tesis.

A los integrantes de mi comité de tesis, el Dr. Edmundo Bonilla Huerta, el Dr. José Federico Ramírez Cruz y al M.C. Eduardo Sánchez Lucero, quienes con sus comentarios pude concluir este documento.

Al Grupo F3 Ingeniería en Construcción y Computación S.A de C.V, por permitir el uso de sus instalaciones para el desarrollo de este proyecto.

Al mismo tiempo gracias al M.C. José Luis Hernández Corona y al M.I. Fernando González Sánchez, por compartir un poco de su conocimiento durante el período de estancias y en el apoyo brindado para la realización del artículo relacionado con este documento.

A mis amigos y amigas, por los momentos y experiencias compartidas durante estos dos años.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología “CONACYT”, por otorgarme el financiamiento para la continuación de estudios a nivel maestría y poder seguir desarrollándome en el ámbito profesional.

---

# Dedicatoria

A mis padres, por todo el apoyo que siempre me han brindado en los momentos difíciles y que me han guiado para superar cualquier adversidad.

A mi hermana, por su ayuda incondicional y comprensión durante esta maestría.

A mi hermano Marco, por todas las aventuras y experiencias juntos, en donde quiera que estés.

**La Historia no Termina Aquí.....**

---

# Resumen

El presente proyecto de tesis se muestra un análisis del modelo matemático de un motor de corriente directa de imanes permanentes, así también se implementó el algoritmo Optimización por Colonia de Hormigas (ACO).

Las técnicas de optimización inteligente como los algoritmos evolutivos y los algoritmos bioinspirados han tenido una aceptación para resolver diferentes tipos de problemas en el campo de la ingeniería eléctrica, por este motivo la evaluación de parámetros de motores ha sido un tema de gran interés durante varios años.

La obtención de parámetros eléctricos y mecánicos permite realizar propuestas para mejorar su eficiencia, por lo que se aplicaron ecuaciones diferenciales y una comparativa de los entre los datos obtenidos en un ambiente de funcionamiento normal del motor contra las especificaciones del fabricante del motor. Una vez obtenidos los parámetros se desarrolla una simulación de la máquina utilizando el software Simulink una herramienta del programa Matlab con la que se puede observar el comportamiento de la misma.

Las máquinas eléctricas se encuentran en muchas aplicaciones, donde se pueden emplear como generadores de energía eléctrica, y se pueden encontrar en la industria, el hogar, ciudades, entre otros lugares, por lo tanto siempre han sido elemento de estudio e investigación. Los motores de imán permanente tienen la característica de lograr eficiencias altas y con densidades elevadas de potencia y de par, un motor síncrono de imanes permanentes (PMSM), utiliza imanes permanentes en lugar de electroimanes para producir campos magnéticos, por su alta eficiencia y factor de potencia este tipo de motor es muy utilizado en varias aplicaciones industriales.

---

# Abstract

The present thesis project shows an analysis of the mathematical model of a direct current motor of permanent magnets, as well as the implementation of the Ant Colony Optimization (ACO).

Intelligent optimization techniques such as evolutionary algorithms and bioinspired algorithms have been accepted to solve different types of problems in the field of electrical engineering, for this reason the evaluation of motor parameters has been a subject of great interest for several years .

The obtaining of electrical and mechanical parameters allows proposals to improve their efficiency, so differential equations were applied and a comparison of the data obtained in a normal operating environment of the engine against the specifications of the engine manufacturer. Once the parameters are obtained, a simulation of the machine is developed using the Simulink software, a tool of the Matlab program with which the behavior of the same can be observed.

Electrical machines are found in many applications, where they can be used as generators of electrical energy, and can be found in industry, homes, cities, among other places, therefore they have always been an element of study and research. The permanent magnet motors have the characteristic of achieving high efficiencies and with high power and torque densities, a permanent magnet synchronous motor (PMSM), uses permanent magnets instead of electromagnets to produce magnetic fields, due to its high efficiency and of power this type of motor is very used in several industrial applications.

---

# Índice general

Agradecimientos	III
Dedicatoria	IV
Resumen	V
Abstract	VI
Índice de Figuras	XI
Índice de Tablas	XIII
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Planteamiento del Problema . . . . .	3
1.2. Justificación . . . . .	3
1.3. Hipótesis . . . . .	3
1.4. Antecedentes . . . . .	3
1.5. Objetivos . . . . .	4
1.5.1. Objetivo General . . . . .	4
1.5.2. Objetivos Específicos . . . . .	4
1.6. Organización de Tesis . . . . .	5
<b>2. Estado del Arte</b>	<b>6</b>
2.1. Metaheurística Optimización por Colonia de Hormigas (ACO) . . . . .	6
2.2. Optimización Combinatoria utilizando el Algoritmo ACO y sus Va- riantes . . . . .	7

2.3. Motor de Imanes Permanentes . . . . .	8
2.4. Optimización del Motor de Imanes Permanentes Aplicando Metaheurísticas . . . . .	9
<b>3. Marco Teórico</b> . . . . .	<b>11</b>
3.1. Magnetismo . . . . .	11
3.2. Campos Magnéticos . . . . .	13
3.2.1. Flujo Magnético . . . . .	13
3.2.2. Densidad de Flujo Magnético . . . . .	14
3.3. Imanes Permanentes . . . . .	14
3.4. Ley de Coulomb . . . . .	17
3.5. Motor Eléctrico . . . . .	18
3.6. Tipos de Motores . . . . .	19
3.6.1. Motores CD . . . . .	20
3.6.2. Motores CA . . . . .	21
3.6.3. Motores Síncronos y Asíncronos . . . . .	22
3.6.4. Motor Asíncrono o de Inducción . . . . .	23
3.6.5. Brushless DC Motor (BDCM) . . . . .	24
3.6.6. Motor de Reluctancia Conmutado (SRM) . . . . .	25
3.6.7. Motor de Imanes Permanentes . . . . .	26
3.7. Equipo Fluke 41-B . . . . .	29
3.8. Equipo Extech PQ-3350 . . . . .	31
3.9. Equipo Fluke 810 Vibration Tester . . . . .	32
3.10. Matlab . . . . .	33
3.10.1. Simulink . . . . .	36
3.11. Optimización . . . . .	36
3.11.1. Elementos Básicos de Optimización . . . . .	37
3.11.2. Categorías de la Optimización . . . . .	38
3.11.3. Optimización Global . . . . .	40
3.11.4. Optimización Dinámica . . . . .	41
3.11.5. Optimización Discreta . . . . .	41
3.11.6. Métodos Numéricos de Optimización . . . . .	41
3.11.7. Algoritmos Naturales de Optimización . . . . .	43

3.11.8. Técnicas de Optimización . . . . .	43
3.12. Metaheurísticas . . . . .	45
3.12.1. Clasificación de las Metaheurísticas . . . . .	45
3.12.2. Metaheurísticas Basadas en Trayectorias . . . . .	46
3.12.3. Metaheurísticas Basadas en Población . . . . .	47
<b>4. Modelo Propuesto</b>	<b>49</b>
4.1. Metaheurística Optimización por Colonia de Hormigas . . . . .	49
4.1.1. Hormiga Artificial . . . . .	50
4.1.2. Características entre Hormigas Reales y Artificiales . . . . .	51
4.2. Algoritmo Optimización por Colonia de Hormigas (ACO) . . . . .	51
4.3. Algoritmos Basados en ACO . . . . .	54
4.3.1. Simple Ant Colony Optimization . . . . .	55
4.3.2. Ant System . . . . .	56
4.3.3. Elitist Ant System . . . . .	57
4.3.4. Rank-Based Ant System . . . . .	58
4.3.5. Ant Colony System . . . . .	58
4.3.6. MAX-MIN Ant System . . . . .	60
4.4. Modelo del Motor de Imanes Permanentes . . . . .	61
4.4.1. Modelo Matemático del Motor de Imanes Permanentes . . . . .	64
4.4.2. Características del Motor seleccionado . . . . .	65
4.5. Obtención de Parámetros . . . . .	66
4.5.1. Resistencia de Armadura ( $R_a$ ) . . . . .	66
4.5.2. Inductancia de la Armadura ( $L_a$ ) . . . . .	67
4.5.3. Constante de Tiempo Eléctrica ( $t_e$ ) . . . . .	68
4.5.4. Constante Contra Electromotriz ( $K_e$ ) . . . . .	68
4.5.5. Constante de Torque ( $K_t$ ) . . . . .	68
4.5.6. Constante de Tiempo Mecánica ( $t_m$ ) . . . . .	69
4.5.7. Momento de Inercia ( $J_m$ ) . . . . .	70
4.5.8. Corriente de Arranque del Motor ( $I_{arr}$ ) . . . . .	70
4.5.9. Coeficiente de Fricción Viscosa ( $B_m$ ) . . . . .	70
4.5.10. Torque de Fricción ( $T_f$ ) . . . . .	71
4.5.11. Constante de Fricción de Coulomb . . . . .	71

4.5.12. Flujo Magnético del Imán . . . . .	71
<b>5. Resultados</b>	<b>73</b>
5.1. Diagrama del Motor . . . . .	73
5.2. Parámetros del Motor en Funcionamiento . . . . .	74
5.3. Gráficas de Salida de la Simulación . . . . .	76
5.4. Gráficas de Resultados del Algoritmo ACO . . . . .	78
<b>6. Conclusiones</b>	<b>83</b>
6.1. Trabajos Futuros . . . . .	84
<b>A. Publicaciones</b>	<b>86</b>
<b>B. Documentos de Estancias</b>	<b>93</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>97</b>

---

# Índice de figuras

3.1. Polos. . . . .	11
3.2. Campo Magnético. . . . .	13
3.3. Flujo Magnético. . . . .	13
3.4. Densidad de Flujo Magnético. . . . .	14
3.5. Tipos de Imanes. . . . .	15
3.6. Esquema Motor Eléctrico. . . . .	18
3.7. Principio del Funcionamiento de Motor Eléctrico. . . . .	19
3.8. Tipos de Maquinas Eléctricas. . . . .	20
3.9. Motor CD. . . . .	21
3.10. Motor CA. . . . .	22
3.11. Motor síncrono. . . . .	22
3.12. Rotor de jaula de Ardilla. . . . .	23
3.13. Motor Brushless. . . . .	24
3.14. Fases del Motor SRM. . . . .	25
3.15. Clasificación de las MSIP. . . . .	27
3.16. MSIP de imanes superficiales y de imanes interiores. . . . .	28
3.17. Equipo Fluke 41-B. . . . .	30
3.18. Conexión de Medición. . . . .	31
3.19. Equipo Extech PQ-3350. . . . .	32
3.20. Equipo Fluke 810 Vibration Tester. . . . .	33
3.21. Logo Matlab. . . . .	34
3.22. Inicio Simulink. . . . .	36
3.23. Categorías de los esquemas de optimización. . . . .	38
3.24. Conjunto Convexo y no Convexo. . . . .	40

---

3.25. Técnicas de Optimización. . . . .	44
3.26. Clasificación de las Metaheurísticas. . . . .	46
4.1. Colonia de Hormigas. . . . .	50
4.2. Rastro de Feromonas. . . . .	50
4.3. Pseudocódigo General ACO. . . . .	52
4.4. Relación entre la exploración y explotación. . . . .	56
4.5. Pseudocódigo Ant System. . . . .	56
4.6. Diagrama del Motor de DC. . . . .	62
4.7. Parte Eléctrica del Motor. . . . .	63
4.8. Parte Mecánica del Motor. . . . .	63
4.9. Datos nominales del Motor. . . . .	65
4.10. Par Motriz. . . . .	69
5.1. Diagrama General del Motor. . . . .	73
5.2. Diagrama General de Corriente. . . . .	74
5.3. Diagrama General de velocidad Angular. . . . .	74
5.4. Introducción de Parámetros. . . . .	75
5.5. Corriente. . . . .	76
5.6. Velocidad Angular. . . . .	77
5.7. Torque. . . . .	77
5.8. R.P.M. . . . .	78
5.9. Inicialización del Algoritmo. . . . .	78
5.10. Parámetros del Algoritmo. . . . .	79
5.11. Función Objetivo. . . . .	79
5.12. Gráfica con 30 Iteraciones. . . . .	80
5.13. Gráfica con 40 Iteraciones. . . . .	80
5.14. Gráfica con 45 Iteraciones. . . . .	81
5.15. Gráfica con 60 Iteraciones. . . . .	81
5.16. Gráfica con 100 Iteraciones. . . . .	82

---

# Índice de tablas

3.1. Comparación de los imanes permanentes. . . . .	17
3.2. Configuración de los Imanes . . . . .	28
3.3. Ventajas e inconvenientes de las Metaheurísticas. . . . .	45
3.4. Nombre y siglas de las Metaheurísticas. . . . .	46
4.1. Descripción de Parámetros. . . . .	52
4.2. Datos Nominales de la Placa del Motor AP7421. . . . .	66
4.3. Parámetros a Medir. . . . .	66
4.4. Medición de Resistencias. . . . .	67
4.5. Medición de Inductancias. . . . .	67
4.6. Constante de Tiempo Mecánica. . . . .	70
5.1. Parámetros del Motor AP7421 en Funcionamiento. . . . .	75

---

# Capítulo 1

## Introducción

Los motores eléctricos desempeñan un papel importante proporcionando potencia para distintos tipos de aplicaciones: domésticas, comerciales e industriales. Su enorme versatilidad y economía de operación hacen que prácticamente el motor eléctrico no pueda ser igualada por ninguna otra forma de potencia para el movimiento. Se estima que los motores eléctricos se emplean en un 60 por ciento de las aplicaciones industriales, considerando las distintas variantes y aplicaciones que existen en la actualidad (Cherta, 1995).

El uso eficiente de la energía, es una opción estratégica para enfrentar los problemas de la industria, ya que permite disminuir costos energéticos, mejorar la productividad y competitividad, sino también, reducir la contaminación atmosférica y las emisiones de gases de efecto invernadero derivadas de su actividad. Lo cual resulta económicamente rentable para quien la adopta, por lo que es indiscutible la importancia económica de la industria en el desarrollo de las naciones. Es por eso que la presencia del motor eléctrico es imprescindible, pues son los más empleados para la transformación de la energía. Además, de que combinan ventajas de la utilización de la energía eléctrica con bajo costo, facilidad de transporte, limpieza, simplicidad de comando y es de construcción simple y de gran versatilidad de adaptación a las cargas más diversas (Londoño-Parra and Ramírez-Echavarría, 2013).

La mitad de la energía eléctrica que se produce a nivel mundial se consume por motores eléctricos, por eso los motores de imanes permanentes tiene un rol importante en las diferentes aplicaciones en las que se ocupa debido a sus ventajas

funcionales y operativas ya que ofrecen ventajas por su alta eficiencia y alta densidad de par.

Actualmente las diferentes configuraciones de los motores de imanes permanentes son una alternativa competitiva a diferencia de los motores de inducción, motores síncronos, motores de corriente continua, en términos de costos, desempeño, eficiencia y rango de potencia constante.

Los motores de imán permanente se pueden dividir en dos tipos:

- Motores síncronos de imanes permanentes exteriores (EPMSM), estos tienen los imanes permanentes frente al entrehierro y el devanado del estátor.
- Motores de imanes permanentes interiores (IPMSM) a diferencia de los anteriores este cuenta con los imanes permanentes ocultos en el rotor.

La computación bio-inspirada se basa en emplear analogías con sistemas naturales o sociales para la resolución de problemas, este tipo de algoritmos simulan el comportamiento de sistemas naturales para el diseño de métodos heurísticos no determinísticos de búsqueda, aprendizaje y comportamiento.(Forbes, 2004)

Las técnicas de optimización por algoritmos evolutivos y bio-inspirados tienen una gran aceptación para resolver diferentes tipos de problemas en el campo de la ingeniería eléctrica.

El algoritmo ACO (Ant Colony Optimization), es una metaheurística que fue presentada por (Dorigo, 1992), la cual se basa en el comportamiento real de las hormigas cuando exploran el área en busca de alimento, mientras se desplazan van depositando una sustancia química llamada feromona, la cual sirve para que las demás hormigas continúen por el camino óptimo.

El presente trabajo de tesis se enfoca en el desarrollo, análisis e implementación de una optimización de un motor síncrono de imanes permanentes proponiendo un algoritmo de colonia de hormigas, también describiendo el modelo del motor en donde se desarrollan las pruebas, la identificación de parámetros eléctricos y mecánicos.

## **1.1. Planteamiento del Problema**

Actualmente en las industrias cuentan con máquinas eléctricas lo que les genera perdida en el consumo de energía eléctrica, por tal razón es necesario implementar nuevas técnicas computacionales para optimizar el funcionamiento de los motores de imanes permanentes para minimizar esta situación.

## **1.2. Justificación**

Los motores de imán permanente son ampliamente utilizados en la industria moderna, ya que se vuelve más común su aplicación en diferentes ramas de la industria las cuales son: líneas de ensamblaje, autos eléctricos, sistemas de trenes de potencia, entre otras.

## **1.3. Hipótesis**

Realmente la aplicación del algoritmo de colonia de hormiga cumpla el objetivo principal en la optimización de un motor de imán permanente.

## **1.4. Antecedentes**

Los motores de imanes permanentes brindan un potencial ahorro de energía, debido a que es el tipo de máquina eléctrica que más alta eficiencia puede alcanzar, la que más densidad de par puede proporcionar, por esta razón se estudia el motor síncrono de imanes permanentes, ya que se puede obtener más conocimiento de su funcionamiento.

El uso de herramientas computacionales para el análisis de máquinas eléctricas está ampliamente extendido en la industria, por lo que con el empleo de programas computacionales se pueden analizar algunas configuraciones del motor, el desempeño del mismo, la optimización del diseño del motor, la especificación del sistema de control y la determinación y reducción de pérdidas.

Las redes eléctricas de corriente alterna fueron diseñadas para operar con ondas senoidales a una frecuencia fundamental de 50 o 60 Hz, las cargas eléctricas fueron diseñadas para operar a dicha frecuencia, pero con la evolución de la electrónica de potencia y del control que se puede ejercer mediante esta, han surgido nuevas aplicaciones que involucran el uso de máquinas eléctricas y electrónica de potencia. Esta combinación ha permitido tener esquemas de control muy precisos en las máquinas eléctricas rotativas, logrando el control de velocidad y manejo de potencia eléctrica para el ahorro de energía.

La operación típica de las máquinas eléctricas rotativas se basan en que las señales eléctricas son de forma sinusoidal, por lo que presentan comportamientos típicos como el par pulsante y vibraciones mecánicas, con esta condición de distorsión en la corriente de la máquina eléctrica, se necesita realizar investigaciones más a detalle debido a que se pueden llegar a presentar procesos de pérdida de eficiencia por la generación de calor, o la presencia de otros componentes de frecuencia en los procesos mecánicos de vibración.

## **1.5. Objetivos**

### **1.5.1. Objetivo General**

Analizar los datos de un motor con imanes permanentes, utilizando el algoritmo colonia de hormiga (ACO), que permita la optimización.

### **1.5.2. Objetivos Específicos**

- Identificar los parámetros de optimización del motor de imanes permanentes.
- Maximizar la eficiencia del motor de imanes permanentes.
- Minimizar costos y pérdida de flujo de energía.
- Definir apropiadamente el algoritmo ACO y aplicarlo para la resolución del problema.

## 1.6. Organización de Tesis

La presente tesis esta conformada por 6 capítulos, a continuación se presenta una descripción general de cada uno de ellos.

- **Capítulo 1** Se inicia con una introducción al desarrollo de tesis, la descripción de la problemática, su justificación, la hipótesis, los objetivos generales y específicos planteados.
- **Capítulo 2** Se presenta un análisis del estado del arte.
- **Capítulo 3** Se presenta el marco teórico, donde se describen los principios básicos del magnetismo, antecedentes de los imanes permanentes, los tipos de motores que existen en la actualidad y las herramientas para la toma de parámetros del motor.
- **Capítulo 4** Se describe la teoría del algoritmo de optimización por colonia de hormiga y sus variantes, también se presenta el modelo propuesto tanto del algoritmo como el modelo del motor de imanes permanentes.
- **Capítulo 5** Se presentan los resultados de las pruebas realizadas a los parámetros del motor de imanes permanentes.
- **Capítulo 6** Se describen las conclusiones obtenidas durante el desarrollo del trabajo de tesis y una breve descripción sobre trabajos futuros.

---

# Capítulo 2

## Estado del Arte

### 2.1. Metaheurística Optimización por Colonia de Hormigas (ACO)

Una metaheurística es un grupo de conceptos que se pueden usar para definir métodos heurísticos aplicados a un conjunto de problemas, en (Dorigo, 1992) se describe el algoritmo de Ant Colony Optimization (ACO) como una metaheurística denominada como inteligencia de enjambres de insectos los cuales utilizan un conjunto de técnicas de optimización inspiradas en el comportamiento colectivo de las hormigas, en la simulación del algoritmo es mediante hormigas artificiales que son capaces de aprender un espacio de búsqueda durante su ejecución, así obtienen experiencia para construir mejores soluciones.

Recientemente el algoritmo de optimización por colonia de hormigas (ACO), es bastante eficiente para resolver problemas combinatorios, pero a partir de su desarrollo se han generado varias propuestas para mejorar la eficiencia o el rendimiento del algoritmo original, el algoritmo ACO ha sido utilizado para resolver problemas de optimización tales como problemas de programación de trabajos, problemas del vendedor ambulante (TSP), enrutamiento de la red y problemas de enrutamiento de vehículos.

En (Ratanavilisagul, 2017) se propuso el algoritmo ACO mejorado por una mutación que se aplica a las feromonas de las hormigas cuando se obtiene el óptimo local, el cual tiene como ventaja que descubre mejores soluciones más rápido, pero

también contiene desventajas las cuales son que los intervalos de operación sean mas prolongados por lo tanto obtiene solo el óptimo local, para superar estas desventajas se aumentan la diversidad de búsqueda en ACO mediante la aplicación de las técnicas de mutación en el proceso y desarrollo del algoritmo.

## 2.2. Optimización Combinatoria utilizando el Algoritmo ACO y sus Variantes

La optimización de parámetros se estudia para mejorar la velocidad del desarrollo computacional en el algoritmo de optimización por colonia de hormigas, ya que tarda mucho tiempo y realiza una búsqueda muy lenta, en (Wei et al., 2014) se proponen reglas de optimización de parámetros en el Algoritmo de Optimización de Colonia de Hormigas (ACO). Las cuales mejoran el algoritmo básico de colonias de hormigas en las reglas de selección de parámetros de  $\alpha \beta \rho$ , al mejorar la colonia de hormigas evita con eficacia caer en el óptimo local, acelerar la convergencia y mejorar la eficiencia de la búsqueda, en sus resultados muestran que la optimización de parámetros mejora de manera efectiva el rendimiento del algoritmo, los trabajos son factibles y beneficiosos para la aplicación y el desarrollo del algoritmo de colonia de hormigas.

En (Zhang and Zou, 2017) la optimización de colonia de hormigas (ACO) es un tipo de algoritmo de optimización biónica inteligente distribuida, que se ha utilizado ampliamente para resolver una variedad de problemas de optimización, especialmente problemas de optimización combinatoria, pero se propone un algoritmo de ACO novedoso llamado optimización simple de colonias de hormigas (SACO), en el cual se usan límites constantes de feromonas y la cantidad de actualización y la inicialización de las feromonas también se establecen como constantes, uno de los beneficios que presenta esta variación del algoritmo base es reducir el acoplamiento de parámetros como la configuración sobre el valor inicial de la feromona y la tasa de evaporación.

Aunque el algoritmo ACO sea utilizado ampliamente para resolver problemas combinatorios de optimización, la mayoría de las aplicaciones en el mundo real están relacionadas con problemas de optimización multi-objetivo, por lo que en (Ariyasingha and Fernando, 2016) se implementa el algoritmo de optimización de colonias de hormigas de fuerza de Pareto (PSACO), que utiliza los conceptos de optimalidad

de Pareto y también el concepto de dominación, esta variación ha demostrado ser muy eficaz para optimizar cualquier cantidad de objetivos simultáneamente.

Este algoritmo se basa en el método del peso aleatorio como una mejora, así logra un mejor rendimiento que el algoritmo original de ACO tanto para los problemas de optimización combinatoria como para los frentes de Pareto bien distribuidos.

Por otro lado, en (Mavrovouniotis et al., 2017) los algoritmos de optimización de colonia de hormigas (ACO) han demostrado ser métodos potentes para abordar estos problemas debido a sus capacidades de adaptación, también se ha demostrado que la integración de los operadores de búsqueda locales puede mejorar significativamente el rendimiento de ACO, por lo cual el autor propone un algoritmo de ACO mimético para encontrar la mejor solución donde un operador de búsqueda local se integra en ACO.

Así mismo se han aplicado diversas técnicas y variaciones del Algoritmo optimización por colonia de hormigas (ACO) para mejorar el rendimiento y eficiencia del mismo, por lo cual en (Olivas et al., 2014) se implementa un sistema fuzzy para adaptar dinámicamente los parámetros de ACO, el parámetro que propone modificar es alfa ya que afecta la diversidad de la colonia de hormigas, por lo tanto con este parámetro se puede controlar la capacidad de exploración y explotación de la colonia.

## 2.3. Motor de Imanes Permanentes

En (Yadav and Verma, 2016) un motor síncrono de imanes permanentes (PMSM), utiliza imanes permanentes en lugar de usar electroimanes para producir campos magnéticos del entrehierro. Debido a sus importantes ventajas, estos motores se utilizan en muchas aplicaciones industriales, los PMSM recientemente desarrollados se controlan adecuadamente con materiales de imán permanente de alta energía, proporcionan en particular una dinámica rápida, un funcionamiento eficiente y una buena compatibilidad con sus aplicaciones.

El principal problema en los sistemas de accionamiento de motor síncrono magnético permanente (PMSM) es su comportamiento no lineal que se deriva principalmente de la dinámica del motor y las características de carga.

## 2.4. Optimización del Motor de Imanes Permanentes Aplicando Metaheurísticas

El motor síncrono de imán permanente es ampliamente utilizado por su alta eficiencia y alto factor de potencia el motor síncrono permanente de inicio de línea no solo puede ser accionado por el inversor, sino que también puede iniciarse directamente, para implementar el diseño de optimización de un motor tradicional generalmente usa algoritmos de escalada, por lo que en (Xie et al., 2014) se aplica un nuevo tipo de Algoritmo de colonia de hormigas binarias para optimizar los parámetros de la estructura del motor los cuales incluyen el ancho de la ranura del rotor, la longitud del núcleo, el número de conductores por ranura y el tamaño del cable, el algoritmo binario se introduce en la optimización de colonias de hormigas.

Para la optimización de un solo objetivo, se debe satisfacer el requisito de diseño, mientras que para la optimización multi-objetivo, tiene que cubrir varios objetivos de diseño y que se deben cumplir simultáneamente, en (Zhu et al., 2018) la optimización multi-objetivo es preferible y esencial para el diseño orientado a aplicaciones en motores de imán permanente y algunos requisitos de diseño populares, como par de salida, par de engranaje, eficiencia, fluctuación de par, costo de PM y peso del motor se seleccionan para los objetivos deseados al mismo tiempo, también los problemas de optimización del motor de PM se pueden resolver mediante el método de elementos finitos (FEM) con algoritmos de optimización inteligente.

Para el análisis y optimización de un motor de imanes permanentes (PMSM) se utilizan varias técnicas como (Jin et al., 2017b) en el cual se emplea un método de aprendizaje profundo para reducir el tiempo necesario en el análisis del rendimiento del motor síncrono de imanes permanentes (PMSM). El aprendizaje profundo es una rama del aprendizaje automático, que pertenece al nuevo campo de la inteligencia artificial. La esencia del aprendizaje profundo es la extracción de características, mediante la combinación de características de bajo nivel para formar una representación de alto nivel más abstracta, para lograr el mejor propósito, el análisis de la velocidad, el par y la eficiencia electromagnética del PMSM se realiza con el método de elementos finitos (FEM) para obtener los parámetros estructurales que tienen una gran influencia en la eficiencia máxima, el método numérico del cálculo de elementos fini-

tos tiene una alta precisión, y la unidad de cada enlace conduce a la estandarización de los procedimientos.

Para la optimización de los motores de imán permanente existe un método de diseño de baja eficiencia del motor tradicional por lo que necesita mucho tiempo por este motivo en (Jin et al., 2017a) se emplea el Cloud Computing para reducir el consumo de tiempo y se utiliza para acortar el tiempo de las muestras obtenidas, el cómputo simultáneo síncrono se ejecuta en el clúster de la nube, para obtener muestras de varios grupos del PMSM. La computación en la nube tiene muchas características, como virtualización conveniente, alta confiabilidad, escalabilidad y servicios bajo demanda, por lo que ha sido ampliamente utilizada.

Por otro lado, se han desarrollado más investigaciones donde se busca la optimización de las máquinas eléctricas como en (Lassaad et al., 2017) se propone en los parámetros geométricos de un motor con imanes permanentes en la rueda con un rotor externo y devanados concentrados, en el cual se aplicaron tres algoritmos de optimización multi-objetivo basados en la optimización de Enjambre de Partículas (PSO): optimizador multi-objetivo de enjambre de partículas (OMOPSO), PSO multi-destino con limitación de velocidad (SMPSO) y PSO dual multi-objetivo (DMOPSO). Con los cuales se pretende el aumento de la eficiencia de la máquina y minimizan del peso de la máquina.

---

# Capítulo 3

## Marco Teórico

### 3.1. Magnetismo

Los fenómenos magnéticos fueron observados por primera vez hace 2500 años, con fragmentos de mineral de hierro magnetizado cerca de la antigua ciudad de Magnesia. Estos trozos se llaman imanes permanentes. Los imanes permanentes ejercen fuerza uno sobre otro y sobre trozos de hierro que no estaba magnetizado. Se descubrió que cuando una varilla de hierro estaba en contacto con un imán natural, aquella también se magnetizaba y si la varilla flotaba en agua o se suspendía de un hilo por su parte central, tiende alinearse con la dirección norte-sur (Vázquez Leal, ).

Si un imán permanente tiene libertad de girar, uno de sus extremos señala al norte, llamado polo norte y el otro extremo polo sur. Los polos opuestos se atraen y los polos iguales se rechazan, como se observa en la figura (3.1).

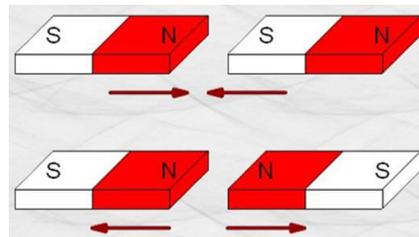


Figura 3.1. Polos.

El elemento fundamental del magnetismo es el dipolo magnético, un dipolo magnético tiene un momento dipolar magnético  $m(Am^2)$ . La magnetización es medida por

el momento dipolar magnético neto por unidad de volumen.

$$M = \lim_{\nabla V \rightarrow 0} \frac{\sum im_i}{\nabla V} \quad (3.1)$$

Si un dipolo magnético es expuesto a un campo magnético externo  $\mathbf{B}$ , este adquiere energía  $\mathbf{E}$  y experimenta un torque  $\mathbf{T}$  como se muestra en las ecuaciones (3.2) (3.3).

$$E = -m * B \quad (3.2)$$

$$T = m * B \quad (3.3)$$

El campo magnético  $B$  esta dado por la relación

$$B = \mu_0(H + M) \quad (3.4)$$

Donde  $\mu_0$  es la permisividad en el espacio con unidades  $T m/A$ , también se puede describir  $\mathbf{B}$  como:

$$B = \mu_0 H + J \quad (3.5)$$

Donde  $\mathbf{J}$  es la polarización magnética y se mide en Teslas, por lo tanto  $\mathbf{M}$   $\mathbf{B}$  se pueden calcular así:

$$M = X_m H \quad (3.6)$$

$$B = \mu H \quad (3.7)$$

Donde  $\mu$   $X_m$  es la permeabilidad y susceptibilidad magnética del material (Cullity and Graham, 2011).

## 3.2. Campos Magnéticos

Los cuerpos cargados eléctricamente tienden a modificar las propiedades del espacio que los rodea, este tipo de fenómeno se conoce como campo magnético como se muestra en la figura (3.2). Esta cualidad puede ser comprobada cuando se acercan dos cuerpos cargados ya que sus campos magnéticos generan fuerzas que atraen o repelen al otro dependiendo el sentido de sus cargas (Vázquez Leal, ).

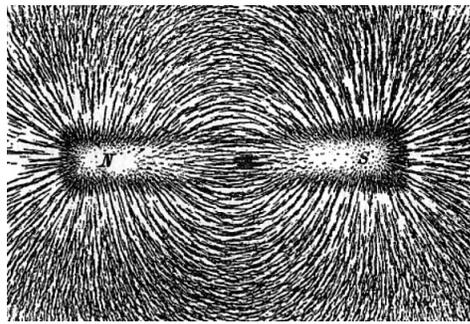


Figura 3.2. Campo Magnético.

### 3.2.1. Flujo Magnético

En todo campo magnético existen líneas de fuerza que se denominan flujo magnético, si hay tres líneas de flujo, se dice que la cantidad de flujo magnético es tres Maxwell (Mx), mientras más grande sea el número de líneas de flujo, más fuerte será el campo magnético (Vázquez Leal, ), como se muestra en la figura(3.3).

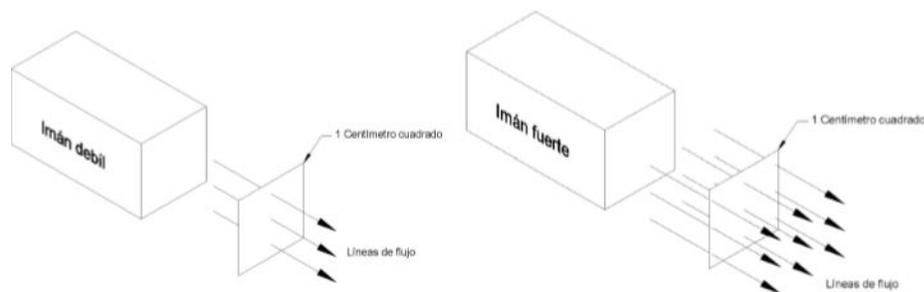


Figura 3.3. Flujo Magnético.

### 3.2.2. Densidad de Flujo Magnético

Si una línea de flujo magnético pasa perpendicularmente a través de una superficie de un centímetro cuadrado, existirá una cierta cantidad de fuerza de campo magnético. Si dos líneas de flujo pasan a través del mismo centímetro cuadrado la fuerza del campo será el doble del flujo correspondiente cuando se tenía solamente una línea y así sucesivamente (Vázquez Leal, ).

En la figura (3.4) se ilustra la densidad de flujo correspondiente a un centímetro cuadrado.

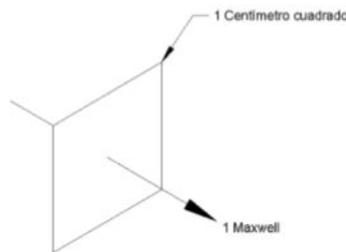


Figura 3.4. Densidad de Flujo Magnético.

### 3.3. Imanes Permanentes

Un imán es capaz de producir un campo magnético propio, de forma que atraiga al hierro, el cobalto y el níquel, los imanes se clasifican en naturales y artificiales como se muestra en la figura (3.5).

Los imanes naturales se refieren a los minerales naturales que tienen la propiedad de atraer elementos como el hierro, níquel, entre otros. La magnetita está compuesto por óxido ferroso férrico, cuya particularidad principal consiste en atraer fragmentos de hierro natural.



Figura 3.5. Tipos de Imanes.

Los imanes artificiales son aquellos cuerpos magnéticos que pueden adquirir propiedades magnéticas.

Los imanes permanentes se caracterizan por tener un campo magnético dependiente de su magnetización, el campo remanente  $B_r$  determina la densidad de flujo que permanece después de remover el campo que magnetiza al material para convertirlo en permanente (Buschow et al., 2003).

Existe una gran variedad de imanes pero los compuestos más notables de imanes permanentes son:

- **Imanes de acero al carbono.** Los aceros de medio y alto carbono poseen la propiedad de magnetizarse por medios mecánicos o físicos y de retener en cierta medida este magnetismo. Con el avance de la metalurgia del acero se exploró el efecto de diversos elementos aleantes, lo que permitió descubrir que la adición de cromo, tungsteno, se modificaban las propiedades mecánicas, pero también se modificaban su capacidad de retener la magnetización (Muñoz, 2008).
- **Imanes de alnico.** Alnico, es el nombre genérico de una familia de imanes permanentes que comenzaron a desarrollarse en la década de 1930 y que recibió esta denominación porque generalmente estos imanes contienen aluminio, níquel y cobalto como elementos de aleación. Estos imanes constituyeron un importante avance respecto a los de acero al carbono, ya que presentan algunas propiedades que los hacen actualmente insustituibles en ciertos usos particulares (Muñoz, 2008).
- **Imanes de ferrite.** Las ferritas o ferrites deben su nombre a la denominación en inglés de compuesto químico del que están hechas (Brium Ferrite). Presentan un color gris oscuro, son frágiles e inmunes a la corrosión, estos compuestos

superaron ampliamente la coercitividad del Alnico y aun costo menor. Desarrolladas a partir de 1950, son actualmente insustituibles para gran número de aplicaciones en las cuales el costo es una variable importante, pero el volumen y peso son muy limitantes (Muñoz, 2008).

- **Imanes de tierras raras.** Con los imanes de tierras raras la tecnología logra condensar en un solo compuesto las mejores prestaciones de las generaciones anteriores de imanes, obteniendo imanes de lata remanencia y alta coercitividad. Los primeros imanes de tierras raras que se desarrollaron fueron los de Samario-Cobalto, que presentaban propiedades magnéticas superlativas en relación a los imanes de Alnico y Ferritas, pero que tenían el inconveniente de ser muy costosos. Sus propiedades magnéticas les permitían reemplazar a las viejas generaciones con un peso mucho menor, lo que los hizo particularmente aptos en aquellas utilidades donde la disminución de peso o la miniaturización son de tal importancia que justifican el incremento del precio (Muñoz, 2008).
- **Imanes de Neodimio-Hierro-Boro.** En 1984 aparece comercialmente un nuevo compuesto basado en una tierra rara, llamado Neodimio-Hierro-Boro, que supera las propiedades magnéticas del Samario-Cobalto, aunque con una temperatura máxima de operación menor. El compuesto básico del Neodimio-Hierro-Boro ( $Nd_2Fe_{14}B$ ) presenta algunas limitaciones para su uso práctico que se fueron mejorando mediante ajustes de la composición y otros recursos (Muñoz, 2008).

El tipo de imán Neodimio-hierro-boro, es uno de los mas potentes imanes permanentes en la actualidad, pero comienza a perder su magnetismo a temperaturas mayores a los 80 grados centígrados, además de ser susceptibles a la corrosión. a pesar de esto, el costo de los imanes es relativamente bajo, por lo que tienen buena resistencia a la desmagnetización por campos externos.

El material de un imán de Neodimio es duro y frágil, puede ser sometido a diferentes procesos de mecanizado y posee propiedades magnéticas de gran alcance, por lo que este tipo de imanes son muy usados en la fabricación de motores electromagnéticos.

Ha diferencia de los demás imanes permanentes, los imanes de neodimio tiene un valor  $\mathbf{Br}$  y una coercitividad  $\mathbf{Hc}$  muy elevada, como se muestra en la tabla (3.1), esto hace que se elección para pequeñas máquinas y la electrónica sean los imanes permanentes más utilizados.

Tabla 3.1. Comparación de los imanes permanentes.

Tipo de Imán	Br(T)	Hc(KA/m)
NdFeB	1,2	850
Alnico	1,3	60
$Sm_2CO_{17}$	1,05	750
Ferritas	0,4	200

El rendimiento de un imán es usualmente especificado por su producto de energía, definido como un producto de la densidad de flujo  $\mathbf{B}$  y su correspondiente campo  $\mathbf{H}$ . La forma del proceso de desmagnetización está dado por la rotación de los momentos magnéticos en partículas esféricas y la coercitividad está dada por la ecuación (3.8).

$$H_c = \frac{2K_1}{M_s} - (N_{||} - N_{\perp})M_s \quad (3.8)$$

Los motores que operan con imanes permanentes son aplicados en aparatos electrónicos como servomotores y otros equipos industriales. El diseño de los motores CD incorpora imanes permanentes y electroimanes, lo que un imán permanente en el estator crea el campo que hace mover el rotor y una conmutación electrónica o mecánica la cual magnetiza y desmagnetiza al electroimán hace mover al rotor dándole un torque apoyado del campo de los imanes permanentes del estator (Buschow et al., 2003).

### 3.4. Ley de Coulomb

En (Vázquez Leal, ), se establece que las fuerzas de atracción y repulsión entre dos polos magnéticos son inversamente proporcionales al cuadrado de la distancia

entre los polos y directamente proporcionales al producto de las intensidades de los polos, en la ecuación (3.9), se define matemáticamente esta ley:

$$F = \frac{M_1 M_2}{d^2} \quad (3.9)$$

Donde:

$F$  = Fuerza entre los polos.

$M_1$  = Intensidad del primer polo.

$M_2$  = Intensidad del segundo polo.

$d$  = Distancia entre polos.

### 3.5. Motor Eléctrico

Un motor eléctrico puede convertir energía eléctrica en energía mecánica, utilizando campos magnéticos.

Los motores eléctricos se encuentran en la vida cotidiana moderna. En el hogar, los motores eléctricos hacen funcionar diferentes aparatos como lavadoras, refrigeradores, aspiradoras entre otros. En el taller, son el primer suministro de fuerza motriz para las herramientas. En la industria tienen una amplia variedad de aplicaciones. Las maquinas eléctricas se caracterizan por tener circuitos eléctricos y magnéticos entrelazados (Harper, 1987).

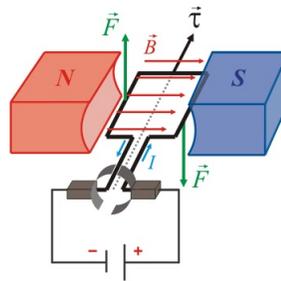


Figura 3.6. Esquema Motor Eléctrico.

Un motor eléctrico debe estar formado con polos alternados, con un sistema de rotor y de estátor, ya que su funcionamiento es por las fuerzas de atracción y repulsión generadas por los polos magnéticos, para aprovechar el movimiento de rotación que se genera en la figura (3.6) se muestra el esquema de un motor eléctrico.

El principio de funcionamiento, establece que si un conductor por el que circula una corriente eléctrica se encuentra dentro de la acción de un campo magnético, éste tiende a desplazarse perpendicularmente a las líneas de acción del campo magnético. El conductor tiende a funcionar como un electroimán debido a la corriente eléctrica que circula por el mismo adquiriendo de esta manera propiedades magnéticas, que provocan el movimiento circular que se observa en el rotor del motor.

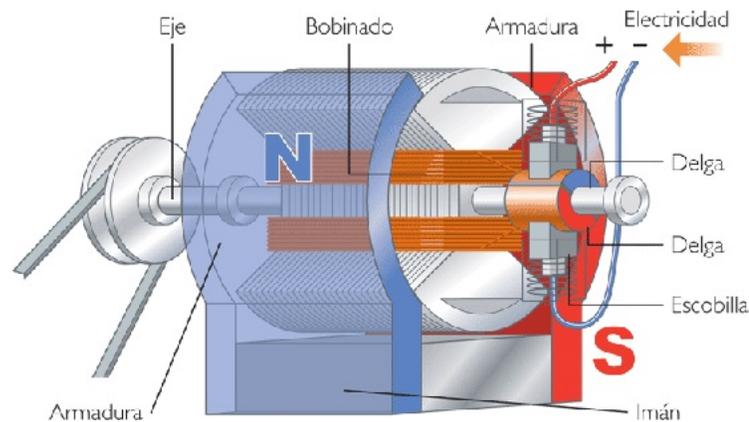


Figura 3.7. Principio del Funcionamiento de Motor Eléctrico.

Cuando pasa corriente por un conductor produce un campo magnético y si se coloca dentro de la acción de un campo magnético potente, el producto de la interacción de ambos campos magnéticos hace que el conductor tienda a desplazarse, produciendo así la energía mecánica como se muestra en la figura (3.7).

### 3.6. Tipos de Motores

Como se menciono antes los motores eléctricos son maquinas que transforman energía eléctrica a energía mecánica (Kosow, 1993).

Los motores eléctricos se clasifican en dos tipos:

- Motores CD
- Motores CA

Para la mayoría de las aplicaciones prefieren maquinas sin escobillas ya que presentan ventajas las cuales son su robustez, altos torques y amplio rango de velocidad.

En la figura (3.8), se muestran los tipos de máquinas eléctricas.

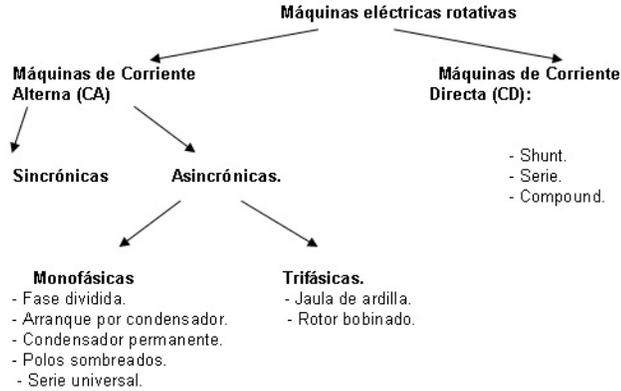


Figura 3.8. Tipos de Maquinas Eléctricas.

### 3.6.1. Motores CD

La estructura de este motor es similar a la de una máquina síncrona pero invertida, con el devanado inductor montado sobre los polos salientes en el estátor y el devanado inducido alojado en las ranuras de un rotor cilíndrico, con las espiras conectadas en serie y los extremos de cada bobina elemental van conectados a unas piezas llamadas delgas, las que constituyen el colector, en la figura (3.9) se muestra el motor de CD.

Este tipo de motores se utilizan en casos en los que es importante regular continuamente la velocidad del motor y también en donde es imprescindible utilizar corriente directa (Harper, 1987).

Los motores de corriente directa(CD) pueden ser de 4 tipos:

- De excitación independiente
- De excitación serie
- De excitación o derivación
- De excitación compuesta

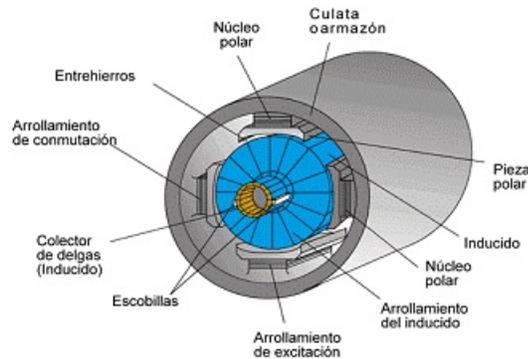


Figura 3.9. Motor CD.

### 3.6.2. Motores CA

Los dos componentes básicos de todo motor eléctrico son el rotor y el estátor. El rotor es una pieza giratoria con varios salientes laterales que llevan cada uno a su alrededor un bobinado por el que pasa la corriente eléctrica.

Los motores de corriente alterna (CA) son los más utilizados en la industria, ya que tienen una aplicación más general gracias a su facilidad de utilización, poco mantenimiento y bajo costo de fabricación (Harper, 1987). Este tipo de motores según su sistema de funcionamiento, se clasifican en:

- Motores síncronos
- Motores asíncronos
- Motores de inducción
- Motores de colector

En la figura (3.10) se describe el motor CA.

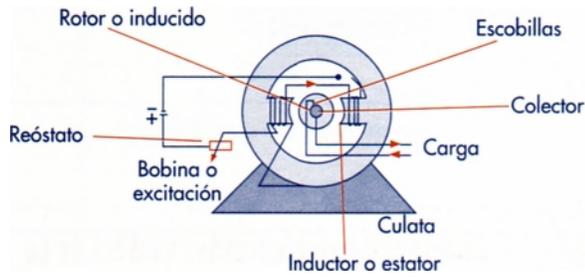


Figura 3.10. Motor CA.

### 3.6.3. Motores Síncronos y Asíncronos

El motor síncrono cuenta con un estator en forma de un cilindro, con ranuras paralelas a las generatrices del cilindro, en donde se encuentran los conductores del devanado (Harper, 1987). Existen 2 tipos de rotor:

- Rotor de polos salientes.
- Rotor liso

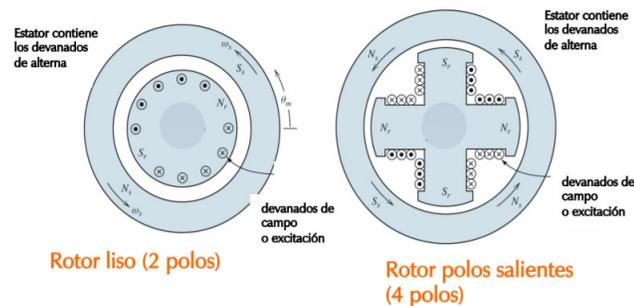


Figura 3.11. Motor síncrono.

El rotor de polos salientes cuenta con espiras de devanado que abrazan el cuerpo de cada polo. Mientras que el rotor liso, el devanado se aloja en ranuras situadas en la superficie lateral del cilindro, como se observa en la figura (3.11).

El motor Asíncrono cuenta con un rotor y estátor de forma cilíndrica y disponen de ranuras espaciadas y paralelas a las generatrices de los cilindros, están situadas

en el interior del estátor y en el exterior del rotor, la forma de los devanados del estátor son idénticos a los del motor síncrono.

En este tipo de motores sólo existe una alimentación por el estator, las corrientes que circulan por el devanado del rotor son inducidas por el campo magnético creado por el devanado del estator (Harper, 1987).

### 3.6.4. Motor Asíncrono o de Inducción

La mayoría de las máquinas eléctricas en la industria son motores trifásicos de inducción, estos se construyen básicamente en dos tipos según el tipo de rotor:

- De jaula de ardilla.
- De rotor devanado

Los motores de inducción de jaula de ardilla, son llamados así por su forma constructiva del rotor, que es un cilindro montado en un eje (Cherta, 1995).

Internamente contiene barras conductoras longitudinales de aluminio o de cobre con surcos y conectados juntos en ambos extremos poniendo en corto circuito los anillos que forman la jaula como se muestra en la figura (3.12).

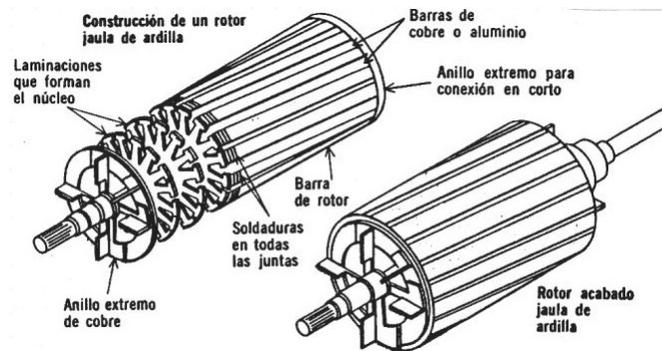


Figura 3.12. Rotor de jaula de Ardilla.

Las características básicas de los motores de inducción para las aplicaciones de tracción eléctrica, son su robustez, así como su bajo costo de mano de obra debido a su simplicidad constructiva. Otras características de su comportamiento es su buena

respuesta a las sobrecargas, así como un buen margen de velocidades y un bajo mantenimiento.

Por lo tanto, la principal desventaja del motor de inducción son sus pérdidas en el cobre rotóricas, ya que estas pérdidas son más difíciles de eliminar que las pérdidas del estátor. Además que la eficiencia y el factor de potencia de estos motores de inducción disminuyen cuanta más pequeña es la maquina.

### 3.6.5. Brushless DC Motor (BDCM)

El motor BDCM se muestra en la figura (3.13), es una variante del motor de corriente continua con escobillas, ya que este motor elimina las escobillas y con ellos las limitaciones que daban el conjunto colector de delgas y escobillas. Al no usar escobillas estos motores han podido mejorar su rendimiento ya que estas daban perdidas por fregamiento y generaban ruido. La función de las escobillas en los motores de corriente continua era la de realizar la conmutación de sentido de giro en el rotor y determinar cual era la bobina que independientemente de la posición y velocidad del rotor, debía conmutar en cada momento. Estos motores deben disponer de una electrónica de conmutación unida a un sensor de posición, el cual hace que conduzca la fase correcta en cada momento.

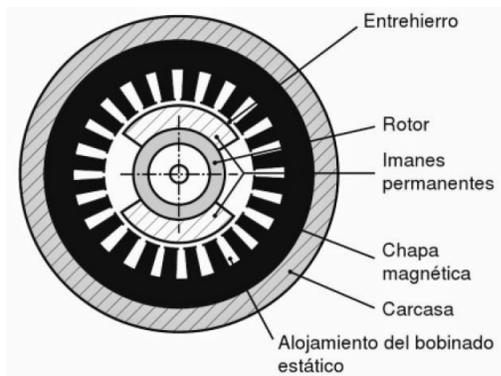


Figura 3.13. Motor Brushless.

Los BDCM son motores que disponen de una gran densidad de potencia así como un elevado rendimiento y no requieren un gran mantenimiento. Su principal problema es su margen de velocidad, así como también el par y el rizado de este.

### 3.6.6. Motor de Reluctancia Conmutado (SRM)

El motor de reluctancia conmutado, es un derivado del motor paso a paso, en el cual los impulsos de la corriente son eliminados en relación a la posición del rotor, para así poder lograr una rotación continua.

Para hacer esto posible el motor necesita un sensor de posición en el eje. Con esta forma de control se consigue que el motor SRM no sea un motor paso a paso ya que es capaz de proporcionar un par continuo a cualquier velocidad y posición del rotor.

El funcionamiento del SRM es parecido al BDCM, pero este no requiere escobillas ni imanes en la figura (3.14) se muestran las fases del motor SRM.

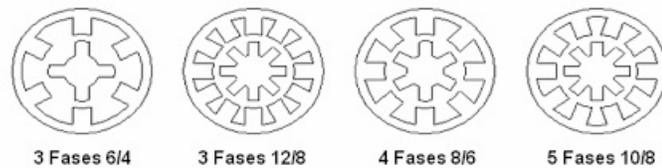


Figura 3.14. Fases del Motor SRM.

Las principales características de los SRM son su simplicidad y la robustez en la estructura de su rotor, ya que al no tener imanes o enrollamientos hace que pueda trabajar a altas velocidades, no tendrá pérdidas en el rotor relacionadas con el cobre o los imanes, pero puede tener pérdidas relacionadas con el hierro. El precio de fabricación es bajo, pero las tolerancias de fabricación son elevadas ya que requieren tener un entrehierro muy pequeño. Debido a su alta velocidad, los márgenes de velocidad a los que puede trabajar son elevados. Disponer de un sensor de posición en el rotor hace que pueda trabajar con gran precisión, este tipo de motores son muy utilizados en automatización.

Como en los motores asíncronos los SRM tienen el mismo problema, tienen un rendimiento y una densidad de potencia inferior a los motores con imanes permanente. Otros inconvenientes son el ruido acústico que genera, la vibración y el rizado del par suele ser alto.

### 3.6.7. Motor de Imanes Permanentes

La principal característica de este tipo de motor es que no posee bobinas de excitación en el rotor, las que son reemplazadas por imanes permanentes. Su primera ventaja es que no requiere anillos ni escobillas que implican una necesidad de mantención periódica y limitan las velocidades de giro del rotor. Otra importante característica es que este tipo de máquina es menos susceptible a sufrir recalentamientos ya que los enrollados se encuentran solo en la parte externa del motor (es decir en el estátor). Por esto es más simple su refrigeración y en general los motores de potencias bajas pueden ser enfriados simplemente por aire.

Los máquinas con imanes permanentes son comúnmente seleccionadas debido a su alta eficiencia, la cual se debe a que no existen pérdidas de potencia asociadas con la excitación de la máquina. Los motores con imanes permanentes también tienen una alta relación de peso/potencia cuando se comparan con otras máquinas eléctricas.

Sin embargo, existen desventajas cuando se utilizan motores con imanes permanentes como:

- Si la magnitud de los campos dentro del imán permanente excede la resistencia del material a ser saturado magnéticamente, el material se desmagnetiza.
- Los materiales empleados en la construcción de imanes con alta calidad para el manejo de energía, pueden ser caros en aplicación de alta potencia.
- Los motores con imanes permanentes con hierro en el estátor experimentan en un torque cero, pérdidas electromagnéticas por deslizamiento debidas a la excitación constante de los campos generada por los imanes permanentes.
- Los motores con imanes permanentes requiere de un rotor con estructura que soporte los imanes contra las grandes fuerzas centrifugas experimentadas durante su operación en alta velocidad. Esto restringe un poco el diseño para los rotores que operan a mayores velocidades y potencias.

La combinación adecuada de las ventajas y desventajas en una máquina con imanes permanentes producen particularmente un reto interesante para el diseño de un motor o alternador de bajo costo y alta confiabilidad, la clasificación de las MSIP

esta bifurcada de acuerdo con dos criterios como se muestra en la figura (3.15); el primero es la disposición física de los imanes permanentes en el rotor de máquina, y el segundo es la orientación del flujo magnético de excitación con respecto a la alineación del eje de su rotor (Almonacid, 2008).

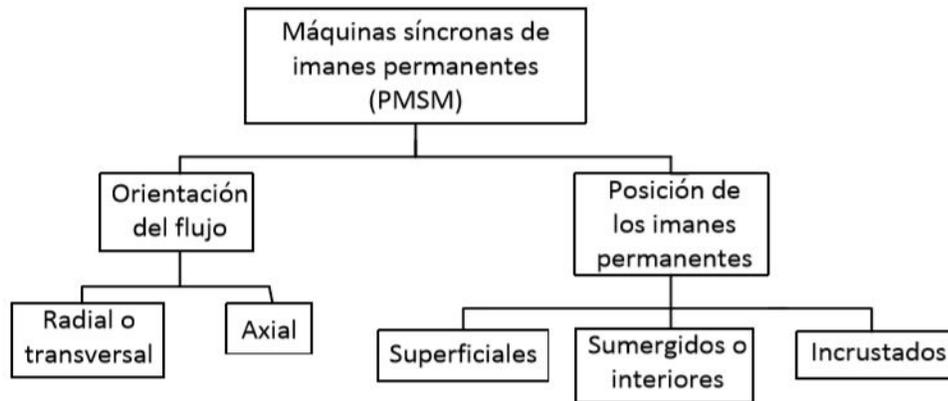


Figura 3.15. Clasificación de las MSIP.

Los motores de imanes permanentes de flujo radial son las más comunes, aunque las de flujo axial están siendo cada vez más empleadas en aplicaciones de alto desempeño debido a su densidad de potencia y aceleración.

Otra clasificación puede realizarse según la forma en que se ubican los imanes en el rotor, ya que éstos pueden ubicarse sobre la superficie del rotor o en su interior, como se muestra en la figura (3.16), las máquinas de imanes superficiales presentan una mayor densidad de potencia, debido a que el flujo en el entrehierro es mayor, pero tienen como desventaja una menor integridad estructural y menor robustez mecánica, por ello no se utilizan para aplicaciones de alta velocidad, a diferencia de las máquinas de imanes interiores presentan una superficie de rotor cilíndrica y son mecánicamente más robustas que las de imanes superficiales, debido a esto son más convenientes para aplicaciones de alta velocidad.

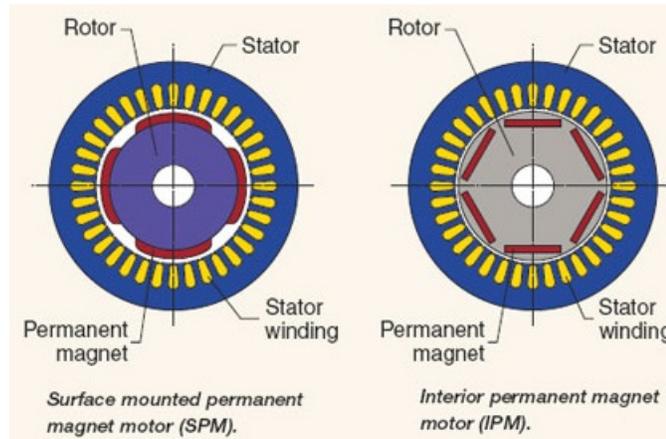


Figura 3.16. MSIP de imanes superficiales y de imanes interiores.

En la tabla (3.2) se muestran las características principales de los dos tipos de montajes de imanes en PMSM.

Tabla 3.2. Configuración de los Imanes

PMSM con Imanes Superficiales	PMSM con Imanes Interiores
Imanes superficiales colocados sobre el rotor.	Imanes interiores asociados con piezas polares.
Constitución mecánica simple.	Constitución mecánica compleja.
$B_r > B_\sigma$ no es posible la concentración de flujo	$B_\sigma > B_r$ es posible la concentración de flujo.
La inductancia es independiente de la posición del rotor.	La inductancia depende de la posición del rotor.
Par de reluctancia negligible.	Importante par de reluctancia.
Máquina mal adaptada para trabajar a potencia constante	Buen funcionamiento a potencia constante a elevadas velocidades.

Sus principales características son que tiene una gran densidad de potencia, esto hace que comparado con el motor de inducción, a igualdad de potencia, el PMSM sea una máquina más pequeña. Otro factor importante a diferencia del motor de inducción, es que al disponer de imanes en el rotor hace que no tenga pérdidas este, su rendimiento es elevado, dispone de un amplio rango de velocidades, una gran

capacidad de sobrecarga, un muy buen par, una buena relación par-inercia y un elevado rendimiento.

Así mismo, el principal inconveniente de este tipo de motor es su fabricación, ya que al poseer imanes y estos poder ser montados tanto en el interior del rotor como en el exterior, hacen que este diseño tenga una fabricación más difícil que los demás motores.

Por último, los PMSM también pueden clasificarse según la forma de onda de su fem inducida en:

- **PMSM Sinusoidales.** Estos motores se caracterizan por tener una forma de onda de fem sinusoidal y se conocen normalmente como Máquinas Síncronas de Imanes Permanentes (Permanent Magnet Synchronous Machines). Para ello se requiere que las bobinas del estator estén distribuidas sinusoidalmente sobre el entrehierro y que la densidad de flujo magnético generada por los imanes con magnetización paralela, los rotores de estos motores pueden diseñarse usando imanes montados superficialmente o interiormente (Jahns and Soong, 1996).
- **PMSM Trapezoidales.** A este tipo de motores se les conoce como Máquinas de Corriente Continua sin Escobillas (Brushless DC Machines), presentan diferencias con respecto a los anteriores, ya que están diseñadas para desarrollar una fem inducida con forma de onda trapezoidal, en estos motores se usan los rotores con imanes superficiales con magnetización preferentemente radial y bobinas de estator concentradas (Jahns and Soong, 1996).

### 3.7. Equipo Fluke 41-B

Los equipos en calidad de energía, desarrollan análisis de armónicos en tiempo real, en redes de alimentación trifásica, bifásica, y monofásica, el equipo Fluke 41-B permite observar una distorsión de la corriente total, que circula en las líneas de alimentación.

Con el equipo Fluke 41-B se pueden hacer pruebas, identificando las líneas, L1, L2 y L3, depende de la conexión requerida en la prueba, en la figura (3.17), se muestra algunos accesorios como son:

- Analizador de armónicas modelo 41B
- Punta para corriente alterna 80i-500s
- Sondas de prueba TL-24
- Puntas de prueba TP-20
- Pinzas de prueba AC-20
- Cable serie RS-232



Figura 3.17. Equipo Fluke 41-B.

La precisión de las lecturas de potencia y de corriente dependen del uso correcto de la Punta de corriente 80i-500s. Las especificaciones de precisión en este manual suponen el uso correcto de la Punta de corriente (Flu, 1995).

- Siempre cierre la mordaza de la Punta de corriente 80i-500s con la flecha apuntando hacia la carga (contraria a la fuente) para mediciones de fase, o apuntando hacia la fuente para mediciones un neutro.
- Siempre cierre la mordaza de la Punta de corriente alrededor de un conductor individual o de conductores paralelos que llevan corriente de la misma fase.

- Siempre ponga a centro el conductor con las marcas de alineación de la Punta de corriente.

En la figura (3.18), se muestra una correcta conexión para empezar una medición.

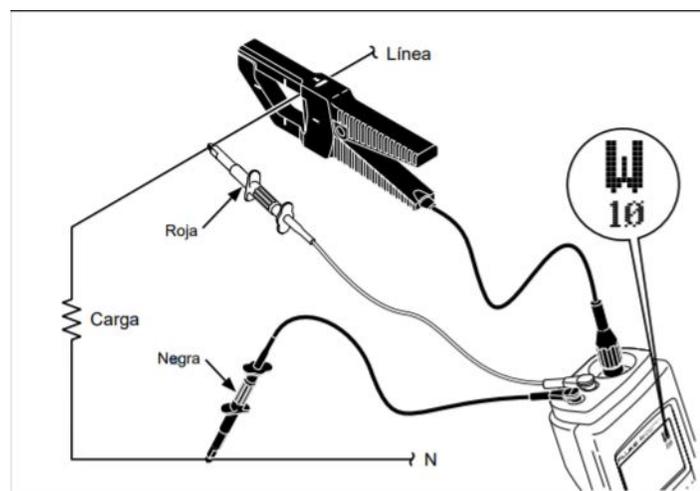


Figura 3.18. Conexión de Medición.

### 3.8. Equipo Extech PQ-3350

El equipo Extech PQ-3350 es utilizado en los sistemas de potencia de las compañías industriales, una de sus aplicaciones consiste en medir los armónicos eléctricos, e incluso las perturbaciones que generan los motores de inducción y todo aquel equipo con carga no léneal, conectado a la red, para obtener las variables de tensión y de corriente (EXT, 2013).



Figura 3.19. Equipo Extech PQ-3350.

En la figura (3.19), se muestran los accesorios del equipo Extech PQ-3350 que son:

- Conectores de tensión
- Tres donas de corriente
- Tres puntas o caimanes para los conectores de tensión
- Comunicación USB
- Cargador del equipo

El equipo Extech PQ-3350 soporta hasta 100 armónicos al hacer una medición de los armónicos eléctricos en instalaciones industriales, a diferencia del equipo Fluke 41-B soporta hasta 32 armónicos de corriente, de tensión, y de potencia (EXT, 2013).

### 3.9. Equipo Fluke 810 Vibration Tester

El equipo Fluke 810 Vibration Tester con tecnología de diagnóstico, ayuda a identificar y priorizar problemas mecánicos, y es utilizado principalmente para solucionar

problemas de equipos, el Tester también se puede usar para estudiar equipos antes o después del mantenimiento planificado.



Figura 3.20. Equipo Fluke 810 Vibration Tester.

Los accesorios con los que cuenta el equipo Fluke 810 Vibrator Tester se muestran en la figura (3.20) son los siguientes:

- Vibrator Tester
- Cargador y adaptadores
- Tacómetro
- Sensor

Sus principales características son el diagnóstico y localización de los fallos mecánicos estándar más comunes como cojinetes, holguras, desalineamientos, desequilibrios entre otros, aplica una escala de gravedad de las averías en cuatro niveles, ligera, moderada, seria y extrema (Vib, 2010).

### 3.10. Matlab

Matlab (Matrix Laboratory), es un software de carácter científico, específicamente para el área de la ingeniería, pero también es ampliamente utilizado en el ámbito

académico. Fue creado en el año de 1984 por el matemático Cleve Moler y surgió con la idea de emplear paquetes de subrutinas escritas en Fortran para los cursos de álgebra lineal y análisis numérico. Su lenguaje de programación se creó para facilitar el acceso al software de matrices Linpack y Eispack sin utilizar Fortran. Nace como una solución a la necesidad de mejores herramientas de cálculo, para resolver problemas complejos, problemas lineales y no lineales entre otros experimentos de forma numérica, ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con su propio lenguaje de programación (Part-Enander et al., 1996).

En la figura (3.21), se muestra el logo del software Matlab.

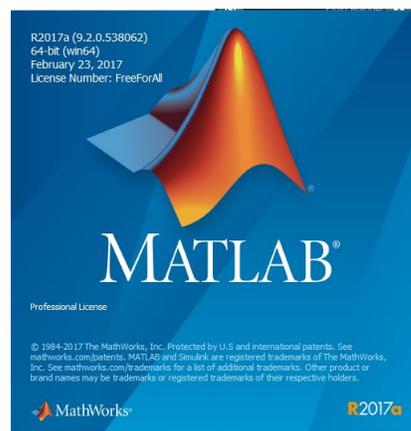


Figura 3.21. Logo Matlab.

En el ámbito académico es una herramienta de enseñanza estándar para la introducción a cursos de álgebra lineal aplicada y en áreas como matemáticas, ingeniería y ciencia. En el ámbito industrial se utiliza para desarrollar investigaciones y resolver problemas de ingeniería y matemática.

Las características básicas son:

- Realizar cálculos aritméticos.
- Realizar cálculo simbólico y exacto.
- Programar en un lenguaje no compilado (script).
- Realizar gráficos en dos y tres dimensiones.

- La representación de datos y funciones.
- La implementación de algoritmos.
- La creación de interfaces de usuario (GUI).
- La comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos hardware.

También cuenta con soluciones específicas llamadas Toolboxes, las cuales son un conjunto de funciones para resolver problemas en particular como:

- Matemáticas y Optimización.
- Estadística y Análisis de datos.
- Diseño de Sistemas de Control y análisis.
- Simulación de Sistemas Dinámicos.
- Procesado de señales y Comunicaciones.
- Procesado de Imagen, Pruebas y Medidas.
- Biología Computacional.
- Redes Neuronales Artificiales.
- Modelado y Análisis Financiero.
- Desarrollo de Aplicaciones o Informes.
- Conexión a Bases de Datos.

Por lo que matlab es un lenguaje de computación de alto nivel con un entorno interactivo para el desarrollo de algoritmos, visualización y análisis de datos y cálculo numérico lo que permite comprobar múltiples alternativas para obtener las mejores soluciones.

### 3.10.1. Simulink

Simulink es un programa de simulación con interfaz gráfico que implementa Matlab, el cual contiene paquetes de aplicaciones específicas que proveen un conjunto de módulos o plantillas predefinidas para la simulación. Esta herramienta permite construir y simular modelos de sistemas físicos y sistemas de control mediante diagramas de bloques, el comportamiento de los sistemas se define mediante funciones de transferencia, operaciones matemáticas, elementos de matlab y señales predefinidas, para la definición de un modelo en simulink se realiza a través de la interfaz gráfica de usuario (GUI) y la librería de bloques de funciones que se usan comúnmente en descripciones matemáticas de sistemas dinámicos (Part-Enander et al., 1996).

En la figura (3.22), se observa la interfaz inicial de Simulink.

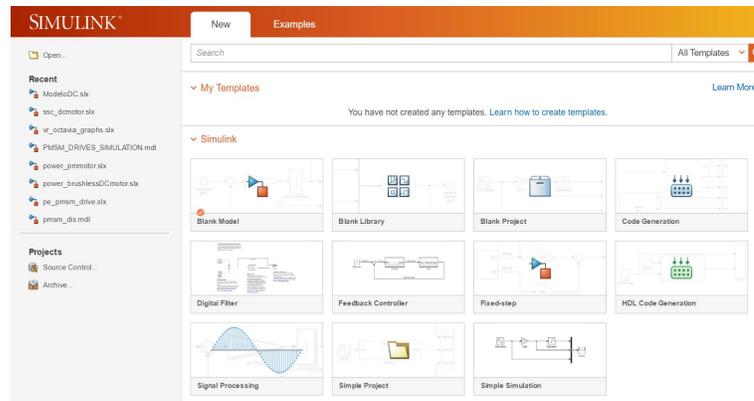


Figura 3.22. Inicio Simulink.

## 3.11. Optimización

La optimización es el proceso de obtener la mejor solución a un problema, en donde las características y requerimientos del problema determinan si la mejor solución de todas puede ser encontrada, se deben ajustar las entradas del sistema o modelo matemático para encontrar el valor máximo o mínimo de la salida como resultado, la entrada consiste en variables, el proceso se denomina función objetivo. Los problemas de optimización global a través de espacios continuos, son una tarea que consiste en encontrar el mínimo o máximo de ciertas propiedades de un sistema eligiendo un

conjunto de parámetros que comúnmente es representado como un vector (Chong and Zak, 2013).

La forma en que se atacan estos problemas normalmente consta de una función objetivo que permite modelar el problema mientras se le incorporan restricciones.

Los algoritmos de optimización son métodos de búsqueda, donde el objetivo es encontrar la solución a un problema de optimización que esta sujeta a un conjunto de restricciones. Esta definición contiene varios problemas complejos que se involucran en el proceso de optimización (Engelbrecht, 2006) por ejemplo:

- Combinación de diferentes tipos de datos.
- Restricciones no lineales del espacio de búsqueda.
- Las características del problema están en función del tiempo.
- Las cantidades a optimizar.
- Optimización multi-objetivo.

### 3.11.1. Elementos Básicos de Optimización

Cada problema de optimización cuenta con al menos tres elementos a considerar:

- **Función Objetivo.** Representa la cantidad a optimizar, ya sea maximizar o minimizar. Algunos problemas no definen la función objetivo, sino que pretende encontrar una solución que satisfaga a todo el conjunto de restricciones.
- **Conjunto de Variables.** Las cuales afectan el valor de la función objetivo.
- **Conjunto de Restricciones.** Limitan o restringen los valores a los que se pueden asignarse las variables. Las restricciones pueden llegar a ser más complejas, esto puede excluir soluciones que son candidatas para ser consideradas óptimas.

### 3.11.2. Categorías de la Optimización

Los esquemas de optimización (Engelbrecht, 2006), pueden dividirse en nueve categorías como se muestra en la figura (3.23) las cuales son:

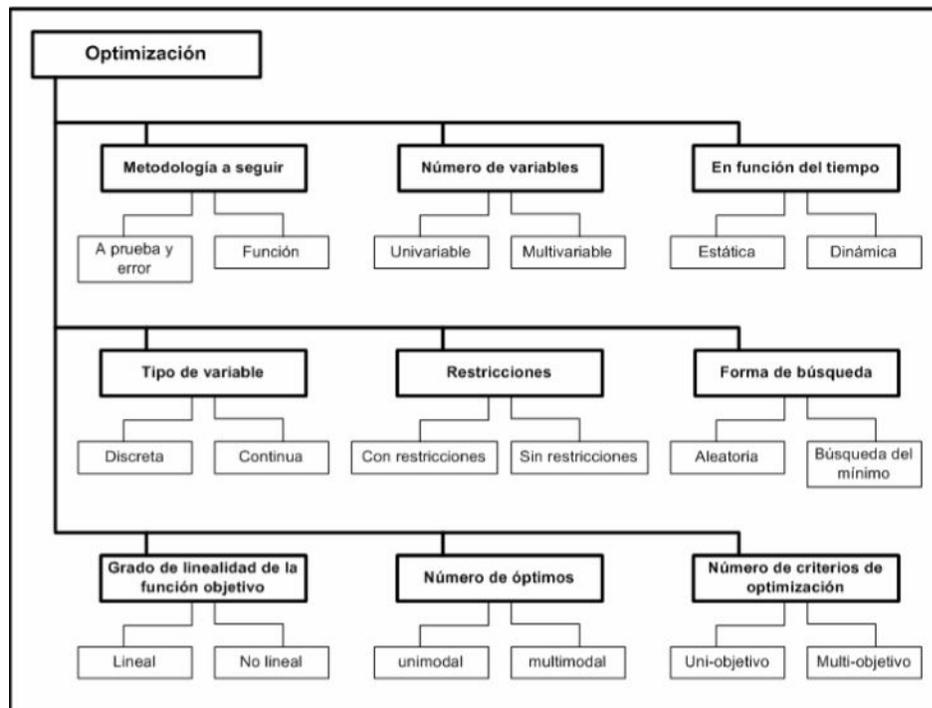


Figura 3.23. Categorías de los esquemas de optimización.

La descripción de las categorías.

- **Metodología a seguir.** La optimización a prueba y error se refiere al proceso de ir ajustando las variables que afectan la salida del sistema sin tener mayor conocimiento del proceso que la genera, la optimización a realizar se basa en un modelo matemático que describe la función objetivo.
- **Número de variables.** Un problema es univariable o de una dimensión cuando sólo se ejerce influencia en la función objetivo una variable, de lo contrario es multivariable o de varias dimensiones. Entre más dimensiones, mas complejo es el proceso de optimización, por lo que muchos acercamientos de optimización multivariable abordan una serie de problemas univariable.

- **En función del tiempo.** La optimización dinámica es cuando la salida es en función del tiempo, mientras que la estática es independiente al tiempo. Si el problema estático es ya por naturaleza difícil de resolver, la dimensión del tiempo añadida incrementa el nivel del reto a vencer con la optimización dinámica.
- **Tipo de variable.** Otro problema al momento de optimizar radica en la distinción del mapa de búsqueda discreto o continuo. Las variables discretas tienen un número finito de posibles valores, mientras que las de las variables continuas es infinito. A la optimización discreta también se le conoce como optimización combinatoria, ya que el óptimo consiste en una combinación de valores del dominio finito de posibilidades.
- **Número de restricciones.** Generalmente, las variables tienen límites o restricciones, la optimización con restricciones incorpora igualdades y desigualdades dentro de la función objetivo. La optimización sin restricciones permite a las variables tomar cualquier valor, así es posible hacer una transformación de variables para convertir un problema con restricciones a uno sin restricciones.
- **Forma de búsqueda.** Algunos algoritmos intentan minimizar la función objetivo comenzando por un conjunto inicial de las variables. Comúnmente estos métodos de búsqueda del mínimo tienden a estancarse fácilmente en mínimos locales a costa de ser eficaces. Estos son los algoritmos tradicionales de optimización y están basados en métodos de cálculo, también los métodos aleatorios utilizan cálculos probabilísticos para encontrar conjuntos de variables, por lo que tienen mayor éxito en la búsqueda del mínimo global.
- **Grado de linealidad de la función objetivo.** Los problemas lineales tienen a una función objetivo lineal, así como los problemas cuadráticos tienen funciones cuadráticas, un problema se considera no lineal si la función objetivo es no lineal.
- **Número de óptimos.** Un problema es unimodal si claramente existe una sola solución para éste. La optimización podría ser fácilmente realizada mediante

el método conveniente para el tipo de problema, dado que el mínimo local es también el mínimo global.

- **Número de criterios de optimización.** Un problema es uni-objetivo si la cantidad a optimizar es expresada utilizando únicamente una función objetivo, si se trata de problemas multi-objetivo todos deben ser optimizados simultáneamente. La optimización multi-objetivo como vectorial, suele demorarse ya que se optimiza un vector de objetivos en vez de uno solo.

### 3.11.3. Optimización Global

Las condiciones especificadas garantizan la existencia de un mínimo global si éstas son satisfechas, pero no niegan la presencia de una solución global si las condiciones no se cumplen, en la actualidad no existe un método que identifique si existe un óptimo para toda clase de problemas.

Los problemas convexos continuos garantizan tener una solución global, pero es un minúsculo grupo de problemas de aplicación, ya que la mayoría de los problemas reales de optimización no representan convexidad en la figura (3.24) se muestra un conjunto convexo y no convexo.

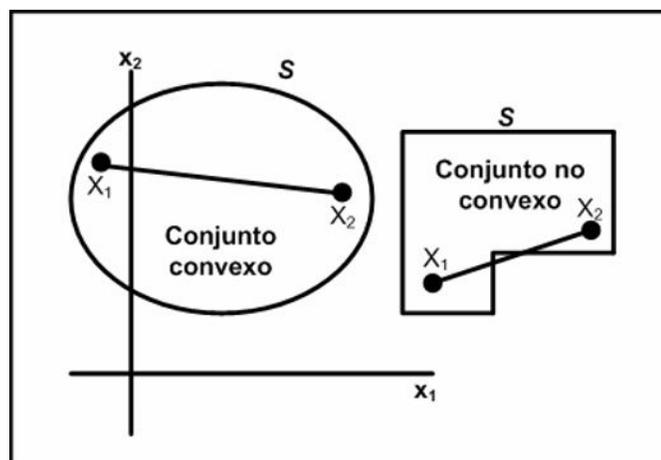


Figura 3.24. Conjunto Convexo y no Convexo.

### 3.11.4. Optimización Dinámica

La optimización dinámica (Engelbrecht, 2006), tiene funciones de aptitud que cambian con el tiempo, por lo que provocan que la posición del óptimo cambie, así como las características del espacio de búsqueda. Un problema de optimización dinámico se define formalmente como:

$$\begin{aligned} & \text{Minimizar } f(x, \omega(t)), x = (x_1, \dots, x_n), \omega(t) = (\omega_1(t), \dots, \omega_n) & (3.10) \\ & \text{suje } to = \begin{cases} g_m(x) \leq 0, m = 1, \dots, n_g \\ h_m(x) = 0, m = n_g + 1, \dots, n_g + n_h \end{cases} \end{aligned}$$

Donde  $\omega(t)$  es un vector de parámetros de control de la función objetivo dependiente del tiempo;  $g_m$  es la función que representa la restricción de desigualdad  $m$ , y  $h_m$  la función de restricción de igualdad.

### 3.11.5. Optimización Discreta

La optimización discreta (Engelbrecht, 2006), involucra problemas diversos combinatorios y computacionalmente más complejos que los correspondientes problemas continuos, un problema de optimización discreta se define formalmente como:

$$\begin{aligned} & \text{Minimizar } f(X, Y), [X]_n; [Y]_n & (3.11) \\ & \text{suje } to = \begin{cases} h(X, Y) = [0]; [h]_l \\ g(X, Y) \leq [0]; [g]_m \\ x_i^l \leq x_i^i = 1, 2, \dots, n_c \\ y_i \in Y_d; [Y_d]_p; i = 1, 2, \dots, n_d \end{cases} \end{aligned}$$

Donde  $X$  representa el conjunto de  $n_c$  variables continuas y  $Y$  representa el conjunto de  $n_d$  de variables discretas,  $h$  es el conjunto de  $l$  restricciones de igualdad y  $g$  el conjunto de  $m$  restricciones de desigualdad. Cada variable discreta  $y_i$  debe pertenecer a un conjunto preestablecido de  $p_i$  valores discretos.

### 3.11.6. Métodos Numéricos de Optimización

Los métodos de optimización propuestos en (Haupt et al., 1998) se clasifican en dos grupos los cuales son:

- **Métodos Directos.** En este método la función objetivo y las restricciones son utilizadas para guiar la estrategia de búsqueda. Los métodos directos son más lentos, ya que no utilizan la información otorgadas por las derivadas.
- **Métodos Basados en Gradiente.** En este se utilizan la primera o segunda derivada de la función objetivo así como las restricciones para el proceso de búsqueda. Los métodos basados en gradiente convergen más rápido a la cercanía de la solución óptima, pero no son eficientes en problemas discontinuos o no diferenciales.

La mayoría de las técnicas numéricas están diseñadas para converger en soluciones que se encuentran cerca del punto de inicio de las iteraciones del algoritmo, los métodos numéricos de optimización más aplicados a problemas unidimensionales son:

- **Newton-Raphson.** Esta técnica se basa en derivadas para encontrar la raíz de una ecuación no lineal, en la cual utiliza las aproximaciones de Taylor de primer y segundo orden, es iterativo y presenta convergencia cuadrática.
- **Caminata Aleatoria.** En este método la dirección de búsqueda es aleatoria en cada iteración.
- **Paso Descendiente.** Este método se basa en gradiente, donde se elige un tamaño de paso  $\sigma_k$  para alcanzar el máximo decremento en la función objetivo como se muestra en la ecuación (3.12).

$$\sigma_k = \operatorname{argmin}_f(X_k - \sigma \nabla f(X_k)) \quad (3.12)$$

El gradiente de una función en un punto determinado es la dirección de crecimiento en el valor de la función en ese punto.

Los métodos convencionales de optimización (Engelbrecht, 2006) presentan algunas dificultades como:

- La convergencia a una solución óptima depende de la solución inicial seleccionada.

- Un algoritmo eficiente para resolver un determinado problema de optimización puede que no sea eficiente para otro.
- Los algoritmos no son eficientes para manejar problemas donde el espacio de búsqueda es discreto.
- Los algoritmos no pueden ser utilizados eficientemente en una máquina de procesamiento paralelo.
- Muchos algoritmos tienden a estancarse en mínimos locales.

Los algoritmos naturales de optimización superan varias desventajas de los métodos clásicos por lo que los están reemplazando para resolver problemas prácticos.

### 3.11.7. Algoritmos Naturales de Optimización

Los métodos naturales de optimización hacen uso de la vida artificial para obtener soluciones a distintos problemas en diversas situaciones.

En (Wolpert and Macready, 1997) se propone el teorema de No Free Lunch (NFL), donde todos los algoritmos que buscan un extremo de una función de costo se ejecutan de la misma manera, cuando se han promediado todas las funciones de costo posibles. El teorema NFL un único algoritmo no puede ser la herramienta perfecta de optimización y que las pruebas experimentales no proporcionan información que pueda extrapolarse a otros dominios de problemas, por lo que es necesario adaptar el método natural de optimización al problema de interés.

### 3.11.8. Técnicas de Optimización

Los problemas de optimización se relacionan con los problemas NP-hard. Estos problemas pueden ser resueltos por unos métodos en función del tamaño de la instancia, las diferentes técnicas de resolución de un problema NP-hard se muestran en la figura (3.25).

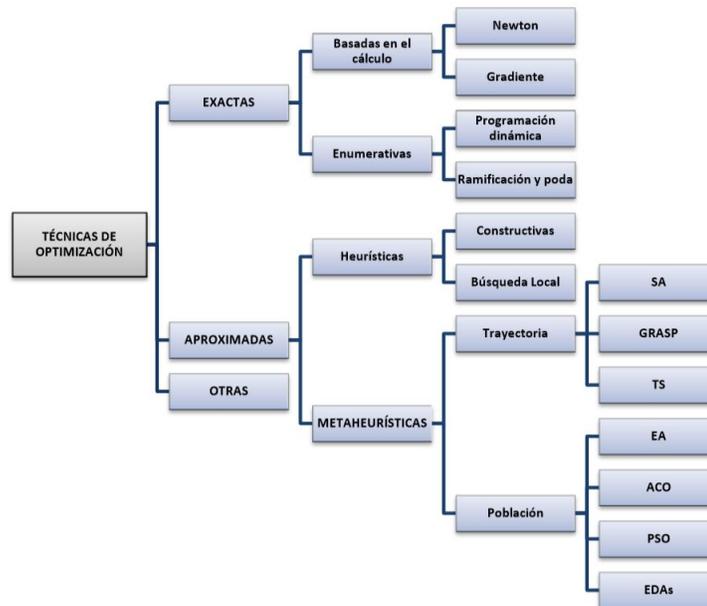


Figura 3.25. Técnicas de Optimización.

- **Métodos exactos.** Los métodos exactos no garantizan encontrar una solución óptima para cualquier problema de optimización, con un tiempo de ejecución aceptable (Dorigo and Stützle, 2003), ya que este tipo de métodos necesitan un tiempo exponencial para encontrar el óptimo. En los últimos años el método se ha mejorado para algunos problemas específicos, pero para otros no es satisfactoria, ya que la aplicación de este método sufre un aumento en el tiempo de computación cuando el tamaño del problema incrementa y con frecuencia su uso llega a ser ineficiente.
- **Métodos de aproximación o Algoritmos de aproximación.** Los métodos de aproximación también son conocidos como métodos heurísticos, estos métodos buscan obtener soluciones cercanas o muy próximas al óptimo, sin infringir en una mala calidad de la solución encontrada (Dorigo and Stützle, 2003).
- **Otros.** Dentro de este grupo se agrupan todas las técnicas de optimización que son intermedias entre las anteriores, como son las metaheurísticas y las de memoria a largo plazo, las primeras se conforman de subproblemas, a partir

de las soluciones obtenidas se construye la solución del problema original; En cuanto a la segunda, son capaces de utilizar información obtenida de su propio procedimiento (Santana et al., 2004).

## 3.12. Metaheurísticas

El término metaheurística fue introducido por Glover, lo empleó para designar a todos los métodos que de diversas formas, implementación, procedimientos y estrategias entregan un alto nivel para la mejora local de soluciones, evitar el estancamiento en los óptimos locales y realizar búsquedas eficientes en el espacio de soluciones de los problemas (Glover, 1977).

Una metaheurística es un conjunto de conceptos algorítmicos que pueden ser usados por métodos heurísticos aplicados a un conjunto de diferentes problemas.

En la tabla (3.3) se muestran las ventajas e inconvenientes de las metaheurísticas, por lo que las metaheurísticas se pueden utilizar cuando no existe un método exacto de resolución o se necesita mucho tiempo de cálculo.

Tabla 3.3. Ventajas e inconvenientes de las Metaheurísticas.

Ventajas	Inconvenientes
Algoritmos de propósito general	Son algoritmos aproximados no exactos
Rapidez en la ejecución de los programas	Son altamente probabilísticos
Son fácilmente implementarlos	Presentan poca base teórica

### 3.12.1. Clasificación de las Metaheurísticas

Las metaheurísticas se pueden clasificar en las que son basadas en trayectorias y las basadas en población, las primeras manipulan un solo elemento del espacio de búsqueda, mientras que las otras trabajan con un conjunto de poblaciones.

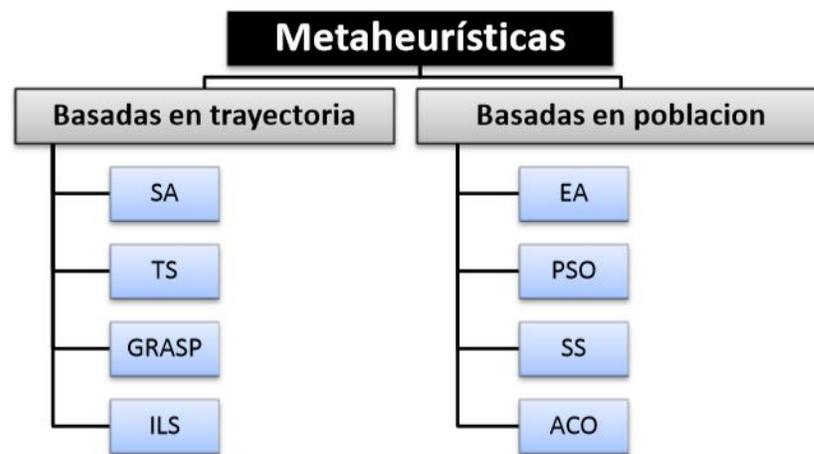


Figura 3.26. Clasificación de las Metaheurísticas.

En la tabla (3.4) se describen las nomenclaturas de las principales técnicas de las metaheurísticas como se muestra en la figura (3.26).

Tabla 3.4. Nombre y siglas de las Metaheurísticas.

Siglas	Descripción
SA	Simulated Anneling
TS	Tabu Search
GRASP	Greedy Randomized Adaptative Search Procedure
ILS	Iterated Local Search
EA	Evolutionary Algorithm
PSO	Particle Swarm Optimization
SS	Scatter Search
ACO	Ant Colony Optimization

### 3.12.2. Metaheurísticas Basadas en Trayectorias

Este tipo de metaheurísticas parten de una solución y van explorando el espacio de búsqueda, actualizando soluciones y formando una trayectoria, algunos ejemplos

de estas metaheurísticas se describen a continuación.

- **Recocido Simulado (SA).** Esta metaheurística es una de las más antiguas propuesta por (Černý, 1985), su técnica se basa en simular el proceso de enfriamiento del metal y del cristal, el algoritmo permite elegir una solución con una cierta probabilidad.
- **Búsqueda Tabú(TS).** Esta metaheurística es la que se aplica con mayor éxito en los problemas NP-hard, consiste en el uso de un historial de búsqueda para evitar que se quede en un óptimo local, también evita que realice varias veces una búsqueda en el mismo espacio de soluciones, por lo que en cada iteración se elige la mejor solución y se añade a una lista tabú con la finalidad de excluirlas en las proximas iteraciones (Glover and Laguna, 1998).
- **Procedimiento de búsqueda aleatorio y adaptativo (GRASP).** Es una metaheurística simple que combina heurísticos constructivos con una búsqueda local, su procedimiento es iterativo que cuenta con dos fases, la constructiva y la de búsqueda local, esta metaheurística fue propuesta por (Feo and Resende, 1995).
- **Búsqueda Local Iterada (ILS).** Esta es una metaheurística simple pero muy efectiva, ya que en cada iteración la solución encontrada es perturbada y a la nueva solución se le agrega un método de búsqueda local para mejorarla (Martin et al., 1992).

### 3.12.3. Metaheurísticas Basadas en Población

Estas metaheurísticas son diferentes a las anteriores ya que se caracterizan por trabajar con un conjunto de soluciones.

- **Algoritmos Evolutivos (EA).** Estas metaheurísticas están basadas en la teoría de la evolución natural (Goldberg and Holland, 1988), esta técnica tiene un proceso iterativo y estocástico que opera sobre una población de soluciones llamados individuos que se generan de forma aleatoria. Los algoritmos evolutivos cuentan con tres fases:

1. Selección: Los individuos de la población se eligen mediante diversas técnicas aleatorias, estas pueden ser por Torneo o Ruleta ya que son las más usadas.
  2. Reproducción: Los individuos seleccionados se reproducen entre sí mediante un operador de cruce.
  3. Sustitución: En esta fase la población actual y los mejores individuos se genera una nueva población para continuar con las iteraciones del algoritmo.
- **Optimización por enjambre de partículas (PSO).** Estos algoritmos están inspirados en el comportamiento del vuelo de las abejas, el conjunto de soluciones se le denomina partículas, las cuales son inicializadas aleatoriamente en el espacio de búsqueda.
  - **Búsqueda Dispersa (SS).** Esta metaheurística consiste en mantener un conjunto pequeño de soluciones diversas dentro del espacio de búsqueda, sus principales características son:
    1. Población Inicial
    2. Método de combinación de Soluciones
    3. Método de Mejora
  - **Optimización por Colonia de Hormigas (ACO).** Esta metaheurística fue propuesta por (Dorigo, 1992), y esta inspirada en el comportamiento real de las hormigas cuando buscan comida para el hormiguero. Este algoritmo esta formado por lo siguiente:
    1. Inicializar Parámetros.
    2. Creación de Hormigas.
    3. Búsqueda Local.
    4. Actualización de Feromonas.
    5. Obtención de Resultados.

---

# Capítulo 4

## Modelo Propuesto

### 4.1. Metaheurística Optimización por Colonia de Hormigas

Esta metaheurística es parte de la rama de inteligencia colectiva, la cual se encarga en la investigación y estudio de los algoritmos inspirados en el comportamiento de los enjambres. Están compuestos por individuos que cooperan entre si a través de la auto-organización.

La metaheurística ACO está bioinspirada en el comportamiento de las hormigas reales, las cuales viven en colonias y buscan la supervivencia de la misma. Las colonias de hormigas son sistemas distribuidos que presentan una organización muy estructurada, por lo que pueden realizar tareas complejas.

La comunicación entre las hormigas y el entorno es mediante la segregación de sustancias químicas producidas por ellas mismas, para que las demás hormigas sigan el rastro, esta sustancia se denomina feromona.

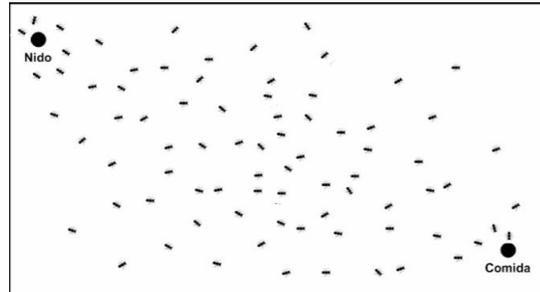


Figura 4.1. Colonia de Hormigas.

Al principio, las hormigas recorren su entorno en forma aleatoria en busca de alimento como se muestra en la figura (4.1), una vez encontrado el alimento las hormigas dejan un rastro de feromonas concentrado en el camino más corto para las demás sigan el mismo camino como en la figura (4.2).

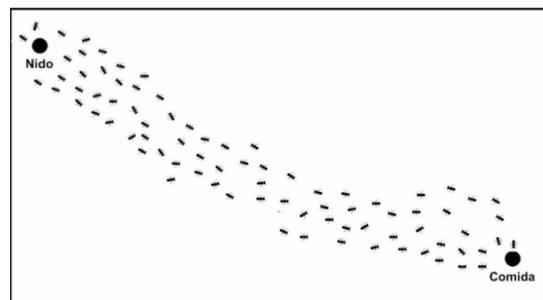


Figura 4.2. Rastro de Feromonas.

### 4.1.1. Hormiga Artificial

Una hormiga artificial es un agente simple, que construye soluciones a un problema y solo modifican valores numéricos. Estas hormigas crean las soluciones paso a paso, moviéndose de un estado a otro del problema.

Sus características son:

1. Buscan soluciones de mínimo coste para resolver el problema a optimizar.
2. Dispone de una memoria que almacena los caminos recorridos, para evaluar las soluciones construidas.

3. Su movimiento se realiza aplicando una regla de transición en función al rastro de feromonas, el valor de la heurística y las restricciones del problema.
4. La construcción del camino se finaliza cuando se satisfaga algún criterio de parada, como el número de iteraciones o encontrar el valor óptimo.
5. Cuando se encuentra una solución la hormiga puede volver a recorrerla y actualizar los rastros de feromonas.

#### 4.1.2. Características entre Hormigas Reales y Artificiales

Ya que las hormigas artificiales están basadas en el comportamiento de las hormigas reales, ambas comparten una serie de características:

- La capacidad de colaborar e interactuar entre si para construir soluciones óptimas.
- La de su entorno se debe a la comunicación estimérgica, basada en las feromonas, para las hormigas artificiales son valores numéricos.
- La finalidad de los dos tipos de hormiga es la construcción de soluciones de forma iterativa.

### 4.2. Algoritmo Optimización por Colonia de Hormigas (ACO)

La optimización por colonia de hormigas (ACO), es una metaheurística basada en población, fue propuesta por (Dorigo, 1992), en la cual esta inspirada en el comportamiento de las hormigas reales cuando buscan comida, su funcionamiento del algoritmo se caracteriza por construir soluciones de forma incremental a partir de sus componentes, para la construcción de soluciones se agrega la experiencia adquirida durante la búsqueda.

Los componentes del algoritmo ACO son:

- **Hormigas.** Se denominan hormigas artificiales, que construyen soluciones de forma incremental, ya que cada hormiga construye una solución independiente pero como una solución parcial.
- **Probabilidad de selección de un camino.** Esta se realiza mediante una regla probabilística en la que toma en cuenta la experiencia adquirida de las iteraciones anteriores.
- **Memoria de feromonas.** Se utiliza para la construcción de soluciones, la cual sirve como almacenamiento del rastro depositado por las hormigas para encontrar una solución óptima.

En la figura (4.3), se presenta la estructura general del algoritmo ACO.

---

**Algoritmo 1** Metaheurística ACO

---

```

Establecer parámetros, inicializar rastros de feromona
while (no se cumpla condición de terminación) do
  ConstruirSolucionesporHormigas
  AplicarBúsquedaLocal { Opcional }
  ActualizarFeromona
end while
    
```

---

Figura 4.3. Pseudocódigo General ACO.

En la tabla (4.1), se muestra la nomenclatura de los parámetros del algoritmo.

Tabla 4.1. Descripción de Parámetros.

Parámetro	Descripción
$h$	Población de Hormigas
$T_0$	Rastro de Feromona Inicial
$T_{ij}$	Información de las Feromonas
$\alpha$	Influencia de las Feromonas
$\beta$	Información de la heurística
$\rho$	Evaporación de Feromonas

Hoy en día se han propuesto más variantes del algoritmo que adoptan el esquema general de ACO para la resolución de diferentes problemas de optimización, por

ejemplo, problemas dinámicos, problemas multi-objetivo y problemas de dominio continuo.

A continuación se describen las etapas del pseudocódigo general ACO:

- **Inicializar Parámetros** Se debe definir el número de hormigas ( $h$ ) que formará la colonia en inicializarla, teniendo en cuenta que incrementar su tamaño supone aumentar la exploración del espacio de soluciones, pero también el coste de memoria y tiempo de computación. También se inicializa la información relacionada con las feromonas  $T_{ij}$ , con un valor inicial  $T_0$  homogéneo para no decantar la búsqueda; el parámetro de evaporación ( $\rho$ ), que tiene la función de reducir la intensidad de los rastros de feromonas; y los parámetros que ponderan la influencia de las feromonas ( $\alpha$ ) y de la información heurística ( $\beta$ ).
- **Construcción de Soluciones.** En esta etapa cada hormiga construye incrementalmente una solución mediante la incorporación de elementos sobre una solución parcial, con los nuevos elementos se adquiere experiencia con el objetivo de garantizar una mejor exploración en las regiones del espacio de búsqueda.

$$P_{ij}^h = \left\{ \frac{[T_{ij}^\alpha]}{\sum_{I \in N_i^h} [T_{ii}^\alpha]} \right. \quad (4.1)$$

Donde  $P_{ij}^h$  es la probabilidad que la hormiga  $h$  escoja el componente  $j$  en la decisión  $i$ ,  $T_{ij}$  representa la intensidad del rastro de feromonas en la opción  $j$  de la decisión  $i$ ,  $\alpha$  es un parámetro.

- **Búsqueda Local** Este paso consiste en utilizar un método de búsqueda local, que permita mejorar las soluciones encontradas, por lo que estas soluciones localmente óptimas sirven para decidir la mejor forma de actualizar las feromonas.
- **Actualización de Feromonas** Se actualiza el rastro de feromonas depositadas en la etapa de construcción de soluciones la cual se determina por la evaporación de las mismas. Su principal objetivo es incrementar los valores de feromonas asociadas a las buenas soluciones, y decrementar los valores que están asociados a las malas soluciones, esto se logra con:

1. Decrementando los valores de feromona a través de la evaporación.

$$T_{ij} \leftarrow (1 - \rho) * T_{ij} \quad (4.2)$$

2. Aumentando los niveles de feromona asociado con un conjunto de buenas soluciones.

$$T_{ij} \leftarrow + \sum_h^h = \Delta T_{ij}^h \quad (4.3)$$

El aumento  $\Delta T_{ij}^h$  es función de la calidad, así que mejores soluciones depositan mayor cantidad, de manera que en iteraciones posteriores de la búsqueda tiende hacia las zonas donde se han encontrado esas soluciones.

### 4.3. Algoritmos Basados en ACO

En la actualidad se han propuesto diversos tipos de algoritmos basados en la metaheurística ACO, que se utilizan para resolver problemas de optimización combinatoria, los principales son:

1. Simple Ant Colony Optimization (SACO).
2. Ant System (AS).
3. Elitist Ant System (EAS).
4. Rank-Based Ant System ( $AS_{rank}$ ).
5. Ant Colony System (ACS).
6. MAX-MIN Ant System (MMAS).

A continuación se describirán cada uno de los algoritmos:

### 4.3.1. Simple Ant Colony Optimization

El algoritmo SACO fue propuesto en (Dorigo and Stützle, 2009), donde se adapta el comportamiento de las hormigas reales, un cierto número de hormigas artificiales construyen soluciones para un determinado problema de optimización, en el cual se intercambia información para encontrar la mejor solución.

- **Construcción de Soluciones.** En cada iteración cada hormiga construye un camino de de soluciones, el cual se genera con la ecuación (4.4).

$$P_{ij}^k(t) = \left\{ \frac{[T_{ij}]^\alpha(t)}{\sum T_{ij}^\alpha(t)} \quad j \in N_i^k \right. \quad (4.4)$$

Donde  $N_i^k$  es el conjunto de nodos factibles con respecto a la hormiga  $K$ ,  $T_{ij}$  es la concentración de feromonas y  $\alpha$  es una constante positiva para amplificar la concentración de feromonas.

- **Actualización de Feromonas.** Al igual que el algoritmo base, la actualización de feromonas se utiliza para incrementar los valores de las feromonas que están mejor asociadas con la calidad de las mejores soluciones, la cual se expresa en la ecuación (4.5).

$$T_{ij}(t+1) = T_{ij}(t) + \sum \Delta T_{ij}^k(t) \quad (4.5)$$

- **Evaporación de Feromonas.** La evaporación de feromonas es añadida para reforzar la exploración de las hormigas y no converger prematuramente a una solución, si  $\rho = 1$ , la búsqueda es aleatoria, se expresa en la ecuación (4.6).

$$T_{ij}(t) \leftarrow (1 - \rho)T_{ij}(t) \quad (4.6)$$

Con la evaporación se evita la convergencia a óptimos locales, sin ella el espacio de exploración de las hormigas las soluciones serían muy restringidas.

En este algoritmo se necesita un balance entre la exploración de las hormigas y la explotación del rastro de feromonas como en la figura (4.4), para que las hormigas artificiales esten forzadas a explorar diferentes caminos y al mismo tiempo no

sobreexplotar la concentración de feromonas con la finalidad de no estacionarse en una solución óptima local.

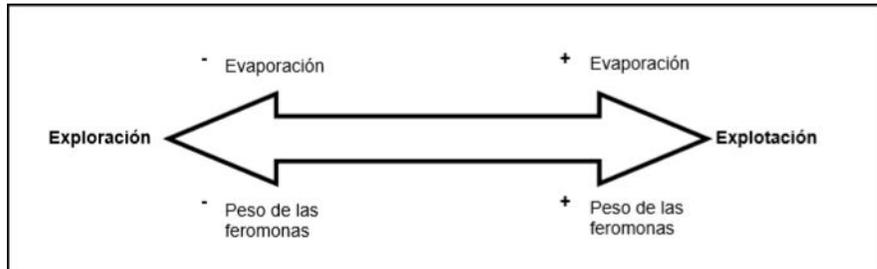


Figura 4.4. Relación entre la exploración y explotación.

### 4.3.2. Ant System

El sistema de hormigas (AS), fue propuesto por (Dorigo et al., 1996), es el primer algoritmo ACO, el cual tenía tres variantes : ant-density, ant-quantity y ant-cycle, su principal diferencia es la forma de actualizar los rastros de feromonas. En el ant-density y ant-quantity depositaban feromonas mientras se construían soluciones, el ant-cycle depositaba feromonas cuando las hormigas ya tenían una solución, esta variante otorgaba mejores resultados, en la literatura se le conoce como AS, el pseudocódigo se muestra en la figura (4.5).

---

**Algoritmo 2** Ant System

---

```

T = initializePheromoneValues()
sbest = s | f(s) = +∞
while not stopCriteria() do
  for all a ∈ A do
    sa = constructAntSolution(T,H)
    T = applyOnlineDelayedPheromoneUpdate(T,sa|a ∈ A)
    if f(sa) < f(sbest) then
      sbest = sa
    end if
  end for
end while
return sbest

```

---

Figura 4.5. Pseudocódigo Ant System.

En el primer bloque se inicializan los valores del rastro de feromonas para cada uno de los componentes que pueden ser parte de una solución, en la literatura se

demuestra que es conveniente inicializar un rastro de feromonas con una cantidad similar a la depositada en una iteración por la colonia de hormigas. Ya que si los valores son muy grandes se necesitaran varias iteraciones, mientras que si son pequeños la búsqueda estará orientada por las primeras soluciones generadas.

- **Construcción de Soluciones.** En este algoritmo las hormigas construyen soluciones concurrentemente, en cada paso de la construcción aplican una regla de elección probabilística:

$$P_{ij}^k = \left\{ \frac{[T_{ij}]^\alpha [N_{ij}]^\beta}{\sum_{I \in N_i^k} [T_{ii}]^\alpha [N_{ij}]^\beta} \quad j \in N_i^k \right. \quad (4.7)$$

Donde  $N_{ij}$  es un valor heurístico y  $\alpha, \beta$  son parámetros que establecen los rastros de feromona y la información heurística respectivamente,  $N_i^k$  es el espacio de búsqueda restante.

- **Actualización de Feromonas.** Se realiza una vez que todas las hormigas completan sus soluciones, su rastro de feromonas son un factor constante así se implementa la evaporación de feromona, por lo que cada hormiga deja un rastro de feromonas en función a la calidad de su solución, en la ecuación (4.8) se muestra  $\rho$  como la tasa de evaporación de feromonas.

$$T_{ij} \leftarrow (1 - \rho) * T_{ij} \quad (4.8)$$

El objetivo de esta regla es aumentar la cantidad de feromonas en las soluciones encontradas, donde  $\Delta T_{ij}^k$  es la cantidad de feromonas que la hormiga deposita en los espacios recorridos.

$$T_{ij} \leftarrow + \sum_h^h = \Delta T_{ij}^k \quad (4.9)$$

### 4.3.3. Elitist Ant System

El algoritmo EAS se propuso en (Dorigo et al., 1996), en el cual le dan una mayor importancia a la mejor solución encontrada, por lo que la mejor solución construida es recorrida por un cierto número de hormigas que se denomina hormigas elitistas.

Con respecto al algoritmo AS, el único cambio que presenta el EAS es en la actualización del rastro de feromonas que se representa mediante la ecuación (4.10).

$$T_{ij} \leftarrow (1 - \rho) * T_{ij} + \sum_{\alpha \in A} \Delta T_{ij}^k + e \quad (4.10)$$

El EAS utiliza los mismos parámetros que el AS para la actualización de feromonas como en la ecuación (4.9), incorporando el parámetro  $e$  que es la cantidad de hormigas elitistas.

#### 4.3.4. Rank-Based Ant System

La incorporación de elitismo en el AS otorga privilegios a las regiones del espacio de búsqueda cercanas a la mejor solución encontrada, también provoca que la distribución de las feromonas se realice por todas las hormigas que construyen soluciones permitiendo que el rastro de feromonas de las soluciones de baja calidad se refuercen, por estos inconvenientes en (Bullnheimer et al., 1997), se propuso el algoritmo  $AS_{rank}$ , el cual consiste en ordenar las soluciones construidas por las hormigas de acuerdo a su costo y ponderar su contribución en la actualización del rastro con su posición  $\mu$  que ocupe cada posición en el ranking. Por lo que las mejores soluciones  $\omega - 1$  son tomadas en cuenta en la actualización.

Se considera como el factor de ponderación mínimo el 1, por lo que el peso para cada hormiga es  $\omega - \mu$ , como se muestra en la ecuación (4.11).

$$T_{ij} \leftarrow (1 - \rho) * T_{ij} + \sum_{\mu=1}^{\omega} -1(\omega - \mu) \Delta T_{ij}^k + \omega \quad (4.11)$$

El  $AS_{rank}$  utiliza los mismos parámetros que el AS para la actualización de feromonas como en la ecuación (4.9), incorporando el parámetro  $\omega$  para la cantidad de hormigas que depositan feromonas.

#### 4.3.5. Ant Colony System

El algoritmo de Sistema de Colonia de Hormigas (ACS), es uno de los primeros sucesores del AS propuesto en (Dorigo and Gambardella, 1997) donde se incorpora la técnica de aprendizaje automático.

Las diferencias entre el algoritmo AS y ACS son:

1. La regla de elección es más agresiva que en el AS.
  2. La evaporación de feromonas y su depósito se aplica sólo al mejor global.
  3. Cuando una hormiga se mueve, disminuye el rastro de feromona.
- **Construcción de Soluciones.** La regla de transición es distinta en el ACS, ya que se elige de forma aleatoria mediante la ecuación (4.12).

$$j = \begin{cases} \operatorname{argmax} \in N_i^k \{ T_{il} [N_{il}]^\beta \} & q \leq q_0 \\ J & \end{cases} \quad (4.12)$$

Donde  $q$  es una variable aleatoria distribuida en  $[0, 1]$ ,  $q_0 \in [0, 1]$  es un parámetro y  $J$  es una variable aleatoria de acuerdo a la distribución de probabilidad dada en la ecuación (4.7).

- **Actualización de rastros de Feromonas Global.** El ACS permite que una hormiga agregue feromonas después de cada iteración, por lo que la actualización se implementa mediante la ecuación (4.13).

$$T_{ij} = (1 - \rho) * T_{ij} + \rho * \Delta T_{ij}^{bs} \quad (4.13)$$

Donde  $\Delta T_{ij}^{bs}$  es la actualización de rastros de feromona, sólo se puede aplicar a la mejor solución y no a todas como en el AS.

- **Actualización de rastros de Feromonas Locales.** La regla de actualización de feromonas se realiza al final de cada iteración, pero en el ACS, las hormigas usan una regla de actualización de feromona local, que se aplica cada vez que construyen una solución y se representa como:

$$T_{ij} = (1 - \rho) * T_{ij} + \rho * T_0 \quad (4.14)$$

Donde  $\rho \in (0, 1)$  es el coeficiente de disminución de feromonas y  $T_0$  es el rastro inicial de feromonas.

La actualización local incluye la evaporación de feromonas como el depósito de la misma, ya que la cantidad de feromonas depositadas es muy pequeña hace que los rastros de feromonas dejadas por las hormigas disminuya.

#### 4.3.6. MAX-MIN Ant System

Esta variante del ACO toma como base el AS se propuso en (Stützle and Hoos, 2000), para resolver carencias en el primer algoritmo. La idea principal del MMAS, es lograr una mayor explotación de las mejores soluciones encontradas.

Algunos de los cambios más importantes son:

1. La mejor hormiga puede actualizar los rastros de feromona.
  2. Limita el rango de los valores de rastros de feromona en un intervalo  $[T_{min}, T_{max}]$ .
  3. Los rastros de feromonas son inicializados con el valor del limite superior, con un pequeño factor de evaporación de feromonas, lo que incrementa la exploración en el espacio de búsqueda.
  4. Los rastros de feromonas se reinician cada vez que se las hormigas no han generado una posible solución durante un cierto número de iteraciones.
- **Inicialización de rastros de Feromonas.** En MMAS los rastros de feromonas son inicializados con un valor máximo para todos los componentes ( $T_{max}$ ), en combinación con un valor pequeño para el factor de evaporación, para que el algoritmo sea muy exploratorio desde el inicio.
  - **Actualización de feromonas.** Cuando todas la hormigas han construido una solución, se deben actualizar los rastros de feromonas, aplicando la ecuación (4.8), para guardarla en el depósito de nuevas feromonas:

$$T_{ij} \leftarrow + \Delta T_{ij}^{best} \quad (4.15)$$

Donde  $\Delta T_{ij}^{best}$  es la cantidad de feromonas que la mejor hormiga deposita.

- **Limites de Rastros de Feromonas.**

En esta etapa el MMAS incorpora los límites inferior y superior ( $T_{min}, T_{max}$ ) sobre los posibles valores de las feromonas, se aplican para evitar estancamiento en la búsqueda, por lo que tiene el efecto de limitar indirectamente la probabilidad de tomar decisiones correctas.

En la literatura sugieren que el límite inferior es más importante que el límite superior, ya que la cantidad máxima del rastro de feromonas está limitada a la evaporación de las mismas, en la ecuación (4.16) se determina la estimación de  $T_{min}$ .

$$T_{min} = \frac{T_{max} * (1 - \sqrt{P_{best}})}{(avg - 1) * \sqrt{P_{best}}} \quad (4.16)$$

Donde  $avg$  es una constante,  $P_{best}$  es la mejor solución encontrada hasta el momento.

En el MMAS se utiliza un medio de exploración adicional, es la reinicialización de los rastros de feromonas para que las soluciones que tienen una baja probabilidad de ser elegidas puedan volver a ser exploradas en busca del óptimo.

## 4.4. Modelo del Motor de Imanes Permanentes

El motor de corriente directa de imanes permanentes es ampliamente utilizado debido a su desempeño, este motor tiene características mecánicas y eléctricas que se requieren para poder ser modelado.

En la figura (4.6), se muestra el diagrama del modelo matemático de un motor de corriente directa con sus respectivas variables y símbolos que representan su parte eléctrica y mecánica.

Donde :

- R = resistencia óhmica de los embobinados del rotor
- L= inductancia de los embobinados del rotor
- J = momento de inercia del rotor

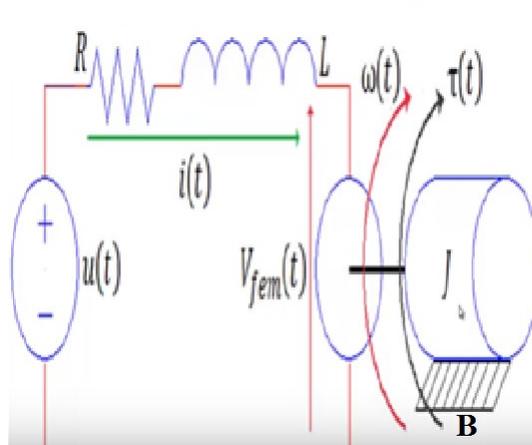


Figura 4.6. Diagrama del Motor de DC.

- $B$  = coeficiente de fricción viscosa entre el rotor y el estátor

Las variables que dependen del tiempo:

- $u(t)$  = fuente de excitación del sistema o voltaje.
- $w(t)$  = velocidad angular del rotor.
- $i(t)$  = corriente del sistema.
- $fem(t)$  = tensión eléctrica inducida o fuerza electromotriz inducida.

La parte eléctrica del motor, se muestra en la figura (4.7) y se analizó aplicando la ley de voltaje de Kirchhoff, determinando el voltaje que entra al circuito, que será igual a la resistencia por la corriente que pasa por ella, más el voltaje en la bobina conocido como voltaje inducido utilizando la ecuación (4.17).

$$u(t) = R_i(t) + L \frac{d_i(t)}{d_t} + V fem(t) \quad (4.17)$$

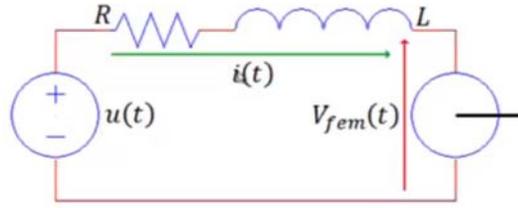


Figura 4.7. Parte Eléctrica del Motor.

Para poder encontrar el valor de la variable dinámica es necesario obtener la derivada de la corriente a través de la ecuación (4.18).

$$L \frac{d_i(t)}{d_t} = u(t) - R_i(t) - Vfem(t) \quad (4.18)$$

El modelo de la parte mecánica del rotor se muestra en la figura (4.8).

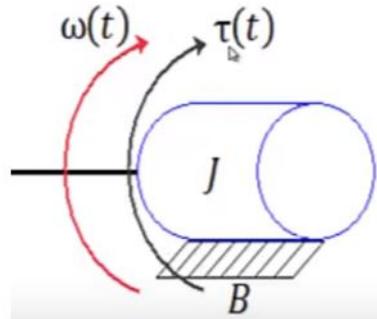


Figura 4.8. Parte Mecánica del Motor.

La sumatoria de las fuerzas que hace girar al eje es igual a la sumatoria de las fuerzas opuestas, se representa en la ecuación (4.19).

$$r(t) = B_w(t) + j \frac{d_w(t)}{d_t} + T_i \quad (4.19)$$

Despejando la variable de interés, se obtiene la ecuación (4.20) que es la característica de la fuerza.

$$j \frac{d_w(t)}{d_t} = r(t) - B_w(t) - T_i \quad (4.20)$$

Donde  $T_i$  es el par de fricción, o par inicial.

Cabe mencionar que existen dos constantes que relacionan tanto la parte eléctrica como la parte mecánica, dichas expresiones se representan mediante  $K_t$  que se encuentra en el torque en la ecuación (4.10) y  $K_E$  que se encuentra en la fuerza electromotriz inducida en la ecuación (4.30).

$$r(t) = K_i i(t) \quad (4.21)$$

$$V_{fem}(t) = K_E w(t) \quad (4.22)$$

Estas son las cuatro expresiones más significativas para el modelo de un motor de corriente directa que son la fórmula para encontrar la corriente, en donde sí, la inductancia se pasa a dividir, se obtiene la derivada de la corriente, de la misma forma se obtiene la velocidad angular, el torque y la fuerza electromotriz inducida, por lo que todas ellas están directamente relacionadas.

#### 4.4.1. Modelo Matemático del Motor de Imanes Permanentes

El modelado matemático del motor de imanes permanentes se describe mediante las siguientes ecuaciones generales (4.23)(4.24)(4.25)(4.26):

$$U_d = R_s i_d + \frac{d\Psi_d}{dt} - \omega_e \Psi_q \quad (4.23)$$

$$U_q = R_s i_q + \frac{d\Psi_q}{dt} - \omega_e \Psi_d \quad (4.24)$$

$$\Psi_q = L_q i_q \quad (4.25)$$

$$\Psi_d = L_d i_d + \Psi_{PM} \quad (4.26)$$

Donde:

- $R_s$  = La resistencia de estátor.

- $L_q, L_d$  = Representan las inductancias del estátor.
- $\Psi_q, \Psi_d$  = Flujo electromagnético del estátor.
- $U_q, U_d$  = Voltaje en los ejes directos y cuadratura.
- $\Psi_{PM}$  = Representa el flujo del imán permanente.

#### 4.4.2. Características del Motor seleccionado

La placa de los datos del fabricante que se muestran en la figura (4.9), se definen por las condiciones de operación del motor bajo ciertos regímenes, sin embargo algunos parámetros pueden variar a lo establecido por el fabricante debido al tiempo o las condiciones de operación, por tal motivo los fabricantes solo ofrecen un estimado de estos parámetros.



Figura 4.9. Datos nominales del Motor.

La máquina que se utiliza para realizar las pruebas es un motor de imanes permanentes de la marca Baldor 1/8 HP 1725 RPM TIPO 74AHPO, sus datos nominales se presentan en la tabla (4.2).

Tabla 4.2. Datos Nominales de la Placa del Motor AP7421.

Motor AP7421	
HP	0.13
R.P.M.	1725
Volts de la Armadura	180
Ampers de la Armadura	0.65
Resistencia de la Armadura	31.15 $\Omega$
Inductancia de la Armadura	96.2 $mH$
Inercia de la Armadura	17.54 $Ol^2$

## 4.5. Obtención de Parámetros

Los parámetros a medir se muestran en la tabla (4.3).

Tabla 4.3. Parámetros a Medir.

Resistencia de armadura	$R_a$
Inductancia de armadura	$L_a$
Constante de la fuerza contra electromotriz	$K_b$
Coefficiente de fricción viscosa	$B_m$
Constante mecánica	$T_m$
Inercia del motor	$J_m$

Cada parámetro se describe a continuación:

### 4.5.1. Resistencia de Armadura ( $R_a$ )

Este parámetro se puede determinar midiendo las terminales del motor con un multímetro en el devanado de la armadura del motor, otra forma de obtener este valor es tomando la lectura de la corriente cuando el motor arranca.

En la tabla (4.4), se muestran los valores de las resistencias.

Tabla 4.4. Medición de Resistencias.

Resistencia	Valor máximo[ $\Omega$ ]	Valor mínimo[ $\Omega$ ]	Valor promedio [ $\Omega$ ]
$R_a$	31.15	10.98	11.58
$R_s$	12.18	5.31	5.85

#### 4.5.2. Inductancia de la Armadura ( $L_a$ )

La inductancia, se puede determinar desde las terminales del motor, pero también se puede obtener mediante la ecuación (4.27).

$$L_a = \frac{\sqrt{\frac{V_a^2}{I_a^2} - R_a^2}}{2\pi f} \quad (4.27)$$

Donde:

- $V_a$  Voltaje de armadura.
- $I_a$  Corriente de armadura.
- $R_a$  Resistencia de armadura.
- $f$  Frecuencia de la fuente de alimentación.

En la tabla (4.5), se muestra los valores de las inductancias.

Tabla 4.5. Medición de Inductancias.

Inductancia	Valor máximo[mH]	Valor mínimo[mH]	Valor promedio [mH]
$L_a$	96.2	90.04	92.43
$L_s$	37.95	36.29	37.12

### 4.5.3. Constante de Tiempo Eléctrica ( $te$ )

Cuando se cuenta con los valores de la inductancia y la resistencia del motor se puede obtener esta constante, de acuerdo con las ecuaciones (4.28)(4.29).

$$L_a = te * R_a \quad (4.28)$$

$$te = \frac{L_a}{R_a} \quad (4.29)$$

### 4.5.4. Constante Contra Electromotriz ( $Ke$ )

Cuando la maquina eléctrica esta en funcionamiento, en el devanado se genera una fuerza denominada contra electromotriz, esta constante se puede determinar cuando la intensidad de flujo magnético es constante y el voltaje inducido ( $Eb$ ) es proporcional a la velocidad angular ( $\omega$ ), se puede expresar mediante las ecuaciones (4.30)(4.31).

$$Ke = \frac{Eb}{n} = \frac{V}{\omega} \quad (4.30)$$

$$Eb = Vi - (L_a * R_a) \quad (4.31)$$

Donde:

- $Eb$  Representa la fem inducida.
- $Vi$  Voltaje de entrada.

Para que la constante  $Ke$  sea confiable, es necesario tener las lecturas de velocidad, corriente y voltaje nominales, de tal forma se obtiene una constante más precisa.

### 4.5.5. Constante de Torque ( $Kt$ )

A través de su eje, el motor entrega la potencia mecánica que es representada por el par torsional, el cual se relaciona por el producto de la corriente en el devanado

del rotor y el flujo magnético en el entrehierro, para determinar la constante del torque se utiliza una polea de radio colocándola en el eje motriz como en la figura (4.10).

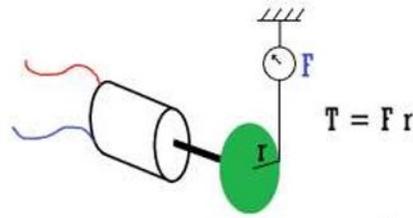


Figura 4.10. Par Motriz.

Mecánicamente el torque se determina mediante la ecuación (4.32), y eléctricamente el par motriz se determina con la ecuación (4.33).

$$T = F * r \quad (4.32)$$

$$T = K_t * I_a \quad (4.33)$$

Donde:

- $T$  Par motriz.
- $F$  Fuerza.
- $r$  Radio de la polea.

#### 4.5.6. Constante de Tiempo Mecánica ( $t_m$ )

El motor de imanes permanentes tiene una constante de tiempo, la cual determina el tiempo en que el sistema mecánico alcanza un 63.2% de su velocidad nominal.

Para determinar su valor se aplica la tensión nominal al motor, con el 63.2% de la misma, el valor que alcanza  $T$  corresponde a la constante mecánica ( $t_m$ ).

Tabla 4.6. Constante de Tiempo Mecánica.

$V_{in}[V]$	$I_a[A]$	$W_m$ Dinamómetro	Tiempo de caída [ms]	$T_m[ms]$
50.19	1.98	601	880	293.33
60.22	2.12	733	980	326.66
70.70	2.27	854	1.09	363.0
80.44	2.41	957	1.18	393.0
90.40	2.67	1037	1.35	450.0

En la tabla (4.6), se muestran las mediciones realizadas para determinar la constante mecánica del motor, ya que no puede ser medida directamente.

#### 4.5.7. Momento de Inercia (Jm)

El momento de inercia se calcula utilizando los parámetros anteriores, mediante la ecuación (4.34).

$$J_m = \frac{tm * K_t * K_e}{R_a} \quad (4.34)$$

#### 4.5.8. Corriente de Arranque del Motor (Iarr)

Esta constante es la corriente necesaria para que el motor venza la inercia mecánica, se obtiene mediante la aplicación de tensión al motor mediante un voltaje variable hasta que el rotor comience su movimiento, esta lectura es correspondiente a la corriente de arranque (Iarr).

#### 4.5.9. Coeficiente de Fricción Viscosa (Bm)

La constante de la fricción viscosa se obtiene mediante las ecuaciones (4.35)(4.36).

$$J \frac{dw_m}{dt} = K_b i_a - B w_m \quad (4.35)$$

$$B = \frac{K_b i_a}{\omega_m} \quad (4.36)$$

#### 4.5.10. Torque de Fricción (Tf)

El torque de fricción es necesario para vencer la fricción de estática, la cual es una pérdida de energía por la inercia de la dinámica del sistema que se presentan en la superficies de contacto.

La constante del torque de fricción es el producto entre el torque( $K_t$ ) y la corriente de arranque( $I_{arr}$ ) y se representa mediante la ecuación (4.37)

$$T_f = K_t * I_{arr} \quad (4.37)$$

#### 4.5.11. Constante de Fricción de Coulomb

Cuando el motor se encuentra en estado estacionario se conoce como fricción de Coulomb, cuando el motor alcanza la velocidad angular nominal ( $\omega$ ), la aceleración decrece, por lo cual es posible determinar la constante de fricción ( $\beta$ ) como se muestra en la ecuación (4.38).

$$T_m = K_t * I_a = \beta\omega + T_f \quad (4.38)$$

Despejando  $\beta$  se obtiene la ecuación (4.39).

$$T_f = K_t * I_{arr} \quad (4.39)$$

Donde:

- $\omega$  Representa la velocidad angular.

#### 4.5.12. Flujo Magnético del Imán

La constante del flujo magnético( $\Psi_{PM}$ ) es necesaria para complementar el modelo del motor de imanes permanentes, por lo que se puede obtener mediante la ecuación (4.40).

$$U_{phase} = U_q = \omega_e \Psi_{PM} \quad (4.40)$$

Al despejar  $\Psi_{PM}$  como en la ecuación (4.41) se obtiene la constante del flujo magnético del imán del PMSM.

$$\Psi_{PM} = \sqrt{\frac{2}{3}} K_e \quad (4.41)$$

---

# Capítulo 5

## Resultados

### 5.1. Diagrama del Motor

La figura (5.1) muestra el diagrama de bloques realizado en simulink, este diagrama a bloques del motor se obtiene mediante las ecuaciones del modelado matemático (4.23)(4.24)(4.25)(4.26).

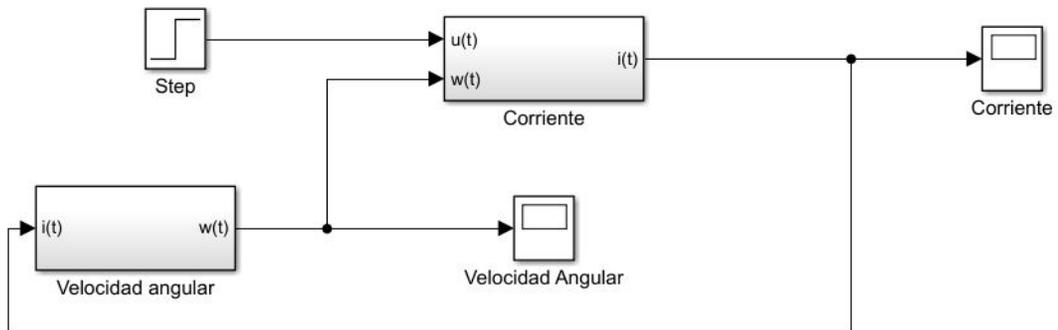


Figura 5.1. Diagrama General del Motor.

En la figura (5.2), se observan los bloques que componen el subsistema general de corriente para su simulación, este diagrama se desarrollo con el software Simulink de Matlab.

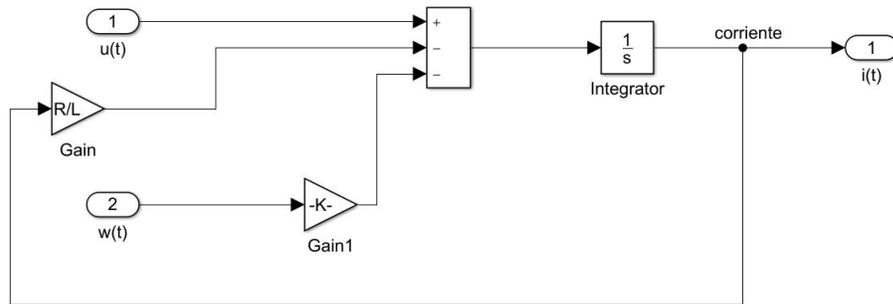


Figura 5.2. Diagrama General de Corriente.

En la figura (5.3), se muestra los bloques que componen el subsistema de velocidad angular para su simulación, también re desarrollo utilizando el software Simulink de Matlab.

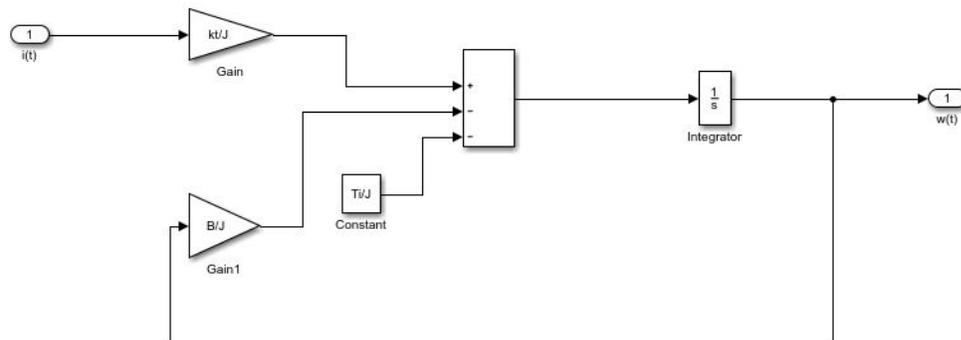


Figura 5.3. Diagrama General de velocidad Angular.

## 5.2. Parámetros del Motor en Funcionamiento

En la figura (5.4), se muestra el bloque donde se introducen los datos de los parámetros del motor para la simulación con Simulink, mientras que en la tabla (5.1), se describen los parámetros del motor Baldor modelo AP7421 de imanes permanentes en funcionamiento.

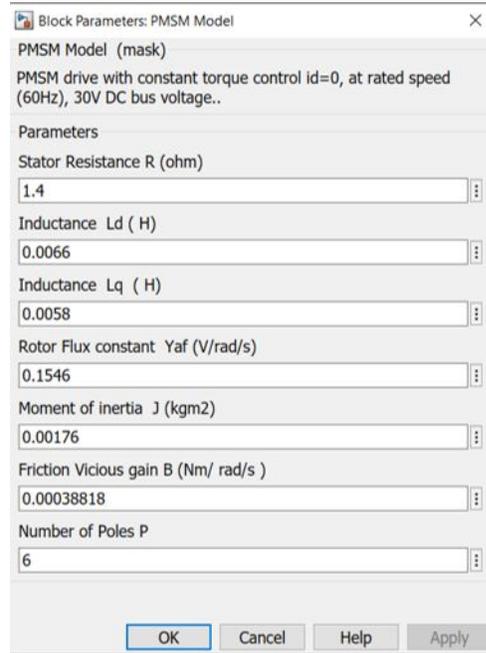


Figura 5.4. Introducción de Parámetros.

Tabla 5.1. Parámetros del Motor AP7421 en Funcionamiento.

Parámetros del motor Baldor CD de Imanes Permanentes	
Inductancia (L)	96.2 mH
Resistencia (R)	31.15 $\Omega$
Momento de Inercia (J)	17.54
Coefficiente de Fricción Viscosa (B)	7 $\mu$
Constante contra-electromotriz (ke)	1.408
Constante de tiempo eléctrica (te)	3.088
Constante de torque (kt)	13.44
Corriente (I)	0.65 amp
Revoluciones por minuto (RPM)	1725 rpm
Velocidad angular (w)	180.64 $\frac{r}{s}$
Torque (t)	0.536 Nm
Potencia (HP)	0.13= 96.94 Watts
Voltaje (Volts)	180

### 5.3. Gráficas de Salida de la Simulación

Después de introducir los valores de los parámetros en el bloque anterior, se muestran las gráficas de salida que se obtienen de la simulación.

En la figura (5.5), se muestra la gráfica de salida en la cual se observa el comportamiento de la corriente en función al tiempo, donde llegando al punto máximo se estabiliza.

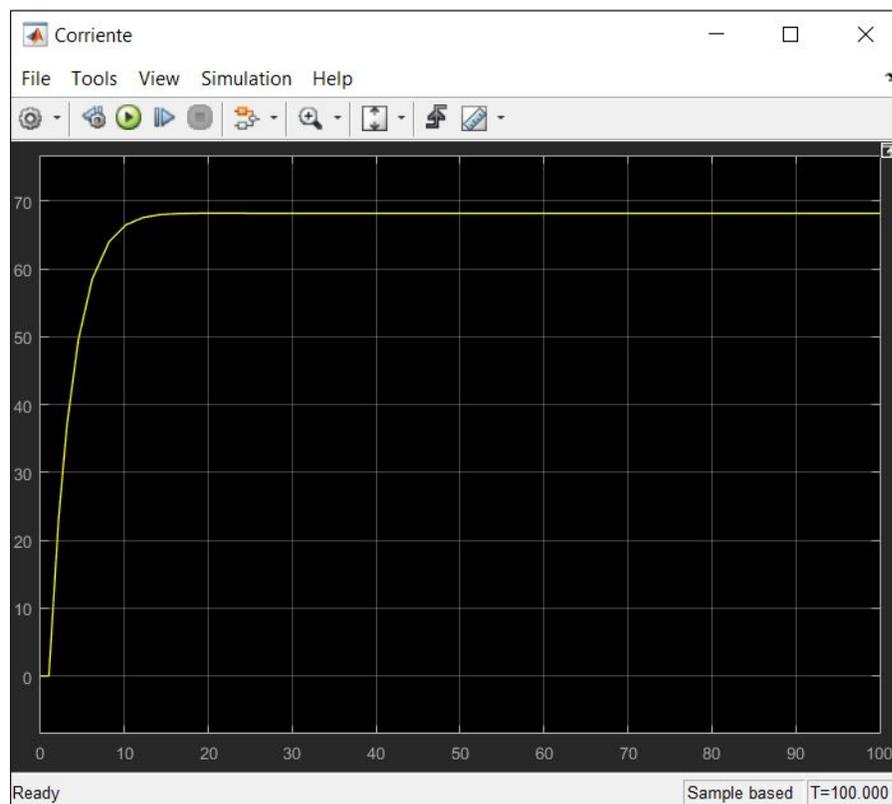


Figura 5.5. Corriente.

La figura (5.6), se muestra la gráfica de salida de la simulación con respecto al comportamiento de la velocidad angular, donde en el mismo caso de la corriente alcanza su máximo y se estabiliza.

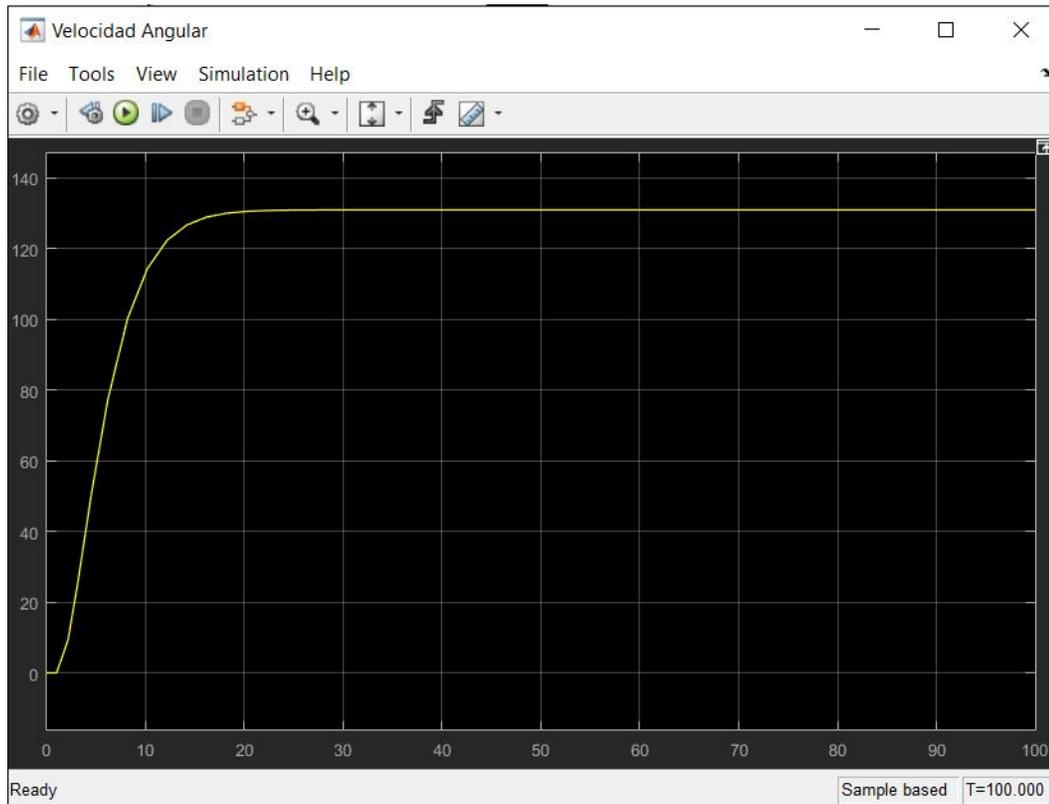


Figura 5.6. Velocidad Angular.

La figura (5.7), muestra la gráfica del comportamiento del torque y su oscilación.



Figura 5.7. Torque.

En la figura (5.8), se puede observar la variación que existe en la velocidad del motor medida en R.P.M.

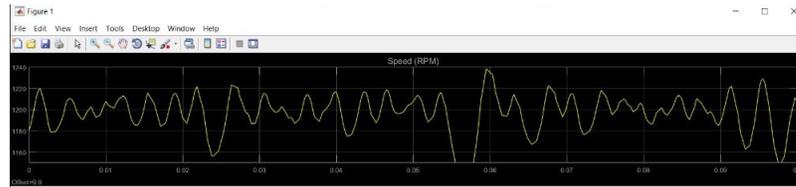


Figura 5.8. R.P.M.

## 5.4. Gráficas de Resultados del Algoritmo ACO

En la figura (5.9), se muestra la inicialización del algoritmo, su primera fase es definir la variable de la función objetivo a optimizar.

```
19  
20 - CostFunction=@(x) Sphere(x);  
21  
22 - nVar=10;  
23  
24 - VarSize=[1 nVar];  
25  
26 - VarMin=-100;  
27 - VarMax= 10;  
28
```

Figura 5.9. Inicialización del Algoritmo.

La segunda etapa del algoritmo la figura (5.10), muestra la introducción de los parámetros básicos como:

- Número de iteraciones.
- Tamaño de la población.
- Taza de evaporación de feromonas.

```
29 %% ACOR Parametros
30
31 - MaxIt=100;
32
33 - nPop=100;
34
35 - nSample=50;
36
37 - q=0.5;
38
39 - zeta=1;
40
```

Figura 5.10. Parámetros del Algoritmo.

La figura (5.11), se observa la función objetivo que se optimizara con el algoritmo ACO.

```
1 function z = Sphere(x)
2
3 -     z = sum(x.^2-10*cos(2*pi.*x))+10;
4
5 - end
```

Figura 5.11. Función Objetivo.

En la figura (5.12), se puede observar la gráfica de salida de la función objetivo con 30 iteraciones y una población de 100 hormigas, un taza de evaporación del 0.5.

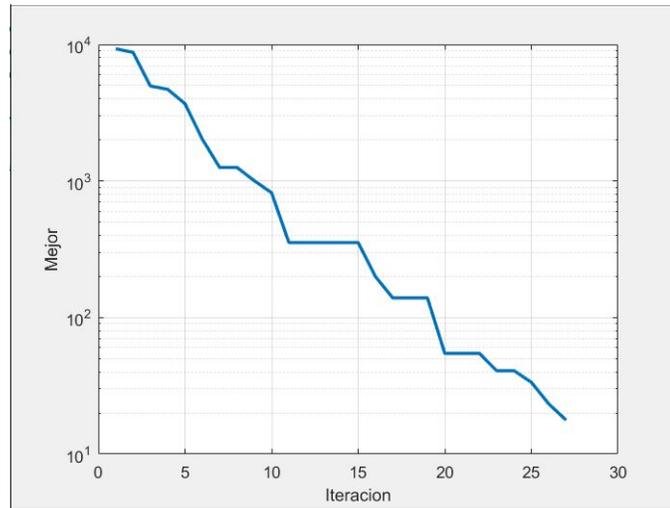


Figura 5.12. Gráfica con 30 Iteraciones.

En la figura (5.13), se puede observar la gráfica de salida de la función objetivo con 40 iteraciones y una población de 100 hormigas, un tasa de evaporación del 0.5.

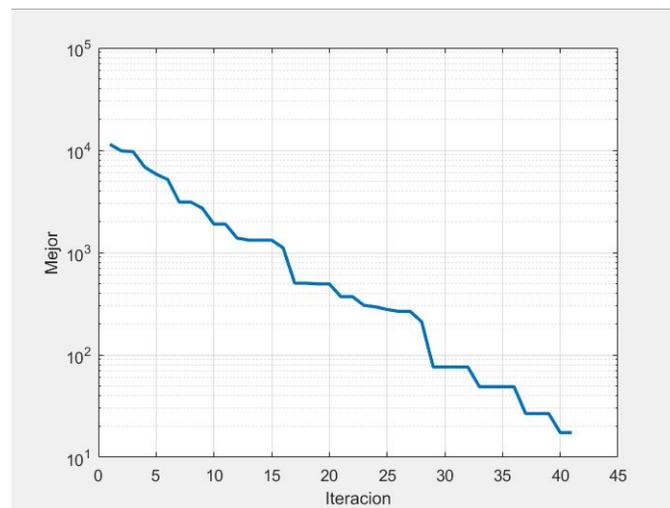


Figura 5.13. Gráfica con 40 Iteraciones.

En la figura (5.14), se puede observar la gráfica de salida de la función objetivo con 45 iteraciones y una población de 100 hormigas, un tasa de evaporación del 0.5.

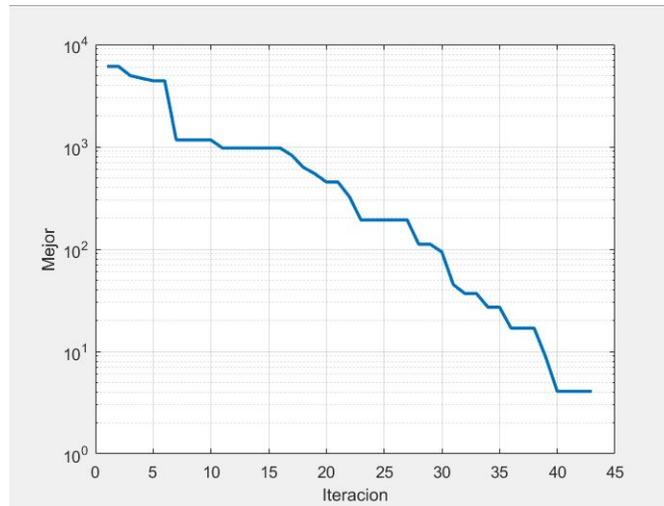


Figura 5.14. Gráfica con 45 Iteraciones.

En la figura (5.15), se puede observar la gráfica de salida de la función objetivo con 60 iteraciones y una población de 100 hormigas, un taza de evaporación del 0.5.

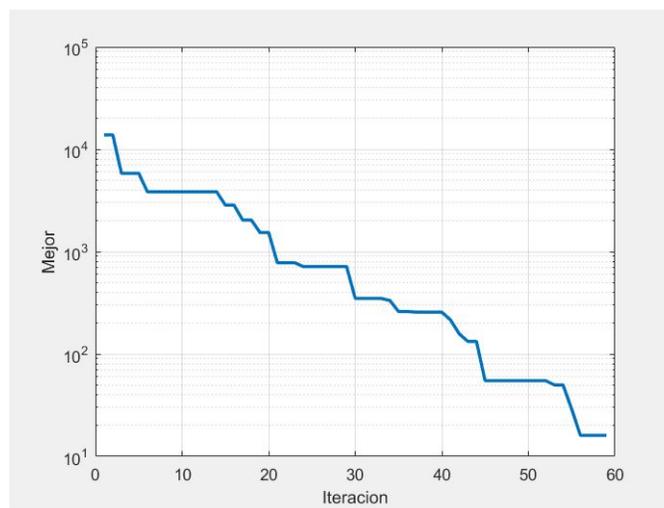


Figura 5.15. Gráfica con 60 Iteraciones.

En la figura (5.16), se puede observar la gráfica de salida de la función objetivo con 100 iteraciones y una población de 100 hormigas, un taza de evaporación del 0.5.

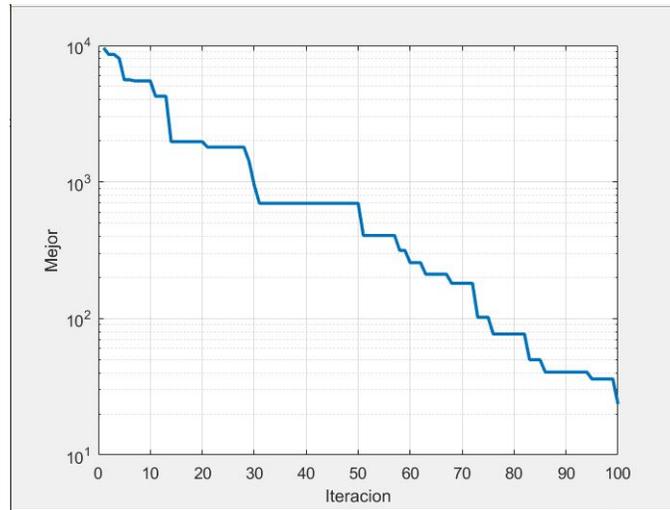


Figura 5.16. Gráfica con 100 Iteraciones.

---

# Capítulo 6

## Conclusiones

Hoy en día las máquinas eléctricas se encuentran en muchas aplicaciones, tanto en domésticas, comerciales o industriales. Gracias a su versatilidad de operación los motores de imanes permanentes logran características más eficientes para el uso de energía lo que permite menores costos energéticos, mejora la productividad, la competitividad y reduce la contaminación atmosférica.

El motor de imanes permanentes se describe como una máquina eléctrica sencilla, sin embargo, por sus características propias esta en continua investigación para un mejor desarrollo ya que en la actualidad es un modelo innovador.

La revisión de las variantes del algoritmo ACO, para la resolución de problemas de optimización cumplió con el objetivo para facilitar la comprensión de la metaheurística ACO, aunque en la actualidad se proponen demasiadas variantes, se estudiaron las propuestas más utilizadas, así como las de nueva creación, ya que se pudo comprender las principales características de cada una de ellas.

También se puede observar que desde sus inicios hasta el día de hoy la metaheurística ACO es una técnica muy competitiva para la resolución de diversos problemas de optimización combinatoria, en el algoritmo propuesto se realizaron modificaciones en la manera de construir las soluciones por las hormigas en el espacio de búsqueda. La importancia de este algoritmo es su aplicación a problemas reales relacionados con problemas de optimización, de restricción entre otros.

Las pruebas se realizaron con tres motores de imanes permanentes, donde los datos nominales definen las condiciones de operación de la máquina eléctrica. Sin embargo,

el motor con el mejor desempeño se utilizó para la aplicación del modelo matemático, la obtención de parámetros eléctricos del motor de CD de imanes permanentes y a través de la simulación se puede observar el comportamiento del motor tanto en la velocidad como de la corriente. Para poder modelar un motor de corriente directa de imanes permanentes se utilizan diferentes ecuaciones diferenciales, para la identificación de los parámetros que permiten obtener un modelo eléctrico y mecánico exacto del motor.

Por otro lado, la simulación se realizó con la herramienta Simulink de Matlab aplicando los valores reales de la máquina para desarrollar pruebas experimentales y así obtener resultados donde se pueda observar la eficiencia del motor bajo los regímenes de operación, estos resultados permiten continuar con una investigación, con fundamentación teórico-práctica para proponer mejoras que propicien un rendimiento de dicho motor.

Basado en los resultados obtenidos, el algoritmo de Optimización por Colonia de Hormigas (ACO), demostró tener un buen rendimiento cuando aumenta el número de la población de hormigas, también se puede aumentar el número de iteraciones para mejorar los resultados, dado que el espacio de búsqueda es amplio, por lo tanto, esta metaheurística se puede aplicar en diferentes áreas relacionadas a los problemas de optimización complejos.

## 6.1. Trabajos Futuros

Para trabajos futuros se propone:

- Desarrollar pruebas con el software especializado Flux 3D, ya que, en el se puede desarrollar el método de elementos finitos para realizar un análisis completo sobre el comportamiento eléctrico y magnético del motor de imanes permanentes.
- Mejorar el algoritmo combinando otras metaheurísticas basadas en trayectoria para explotar el espacio de búsqueda y encontrar soluciones óptimas al problema de una forma más rápida.

- Desarrollar un algoritmo híbrido de metaheurísticas para la resolución de problemas combinatorios, de restrcción y de optimización.
- La aplicación de las nuevas propuestas del algoritmo ACO para continuar con la optimización de motores de imanes permanentes.
- Desarrollar más pruebas con la metaheurística, aplicando nuevas restricciones y diferentes parámetros con respecto al motor Baldor TIPO 74AHPO.

---

# Apéndice A

## Publicaciones



# Obtaining Parameters from a Direct Current Motor of Permanent Magnets for Modeling with Evolutionary Algorithms

Carlos Sanchez<sup>1</sup>, Minerva Matlalcuatzi<sup>2</sup>, Jose Hernandez<sup>3</sup>, Crispin Hernandez<sup>4</sup>, Federico Ramirez<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Máster in Computer Systems, Instituto Tecnológico de Apizaco, Apizaco, Tlaxcala, México

<sup>2</sup>Máster in Computer Systems, Instituto Tecnológico de Apizaco, Apizaco, Tlaxcala, México

<sup>3</sup>Department of Industrial Maintenance, Universidad Tecnológica de Tlaxcala, El Carmen Xalpatlahuaya Huamantla, Tlaxcala, México

<sup>4</sup>Department of Systems and Computing, Instituto Tecnológico de Apizaco, Apizaco, Tlaxcala, México

<sup>5</sup>Department of Systems and Computing, Instituto Tecnológico de Apizaco, Apizaco, Tlaxcala, México

**Abstract:** In this research we present the analysis of the mathematical model of the permanent magnet DC motor, Baldor brand, model AP7421 1/8 HP 1725 RPM TYPE 74AHPO, the evaluation of motor parameters has been a subject of great interest for several years. This interest is presented from the classification of engines, which is divided into: synchronous and asynchronous with different specifications in each of them. Obtaining electrical and mechanical parameters allows proposals to improve their efficiency; Differential equations and the analysis of the terms of the physical variables given by the motor manufacturer were applied against the data obtained in a normal operating environment. In the simulation, the Simulink software was used as a tool of the MATLAB program with which the behavior of the motor can be observed, applying the parameters obtained. They will be modeled with evolutionary algorithms that are widely used to solve real optimization and searching problems in electrical machine and algorithms. The algorithms of Differential Evolution (DE) and the Ant Colony Optimization (ACO) algorithm will be analyzed.

**Keywords:** Analysis, Direct Current, Permanent Magnet, Motor, Parameters

## 1. Introduction

Nowadays permanent magnet DC motors are widely used in multiple industrial applications, due to their high efficiency, low maintenance and ease of control. [1]

The operation of DC motors is based on: converting electrical energy into mechanical energy inducing a rotating movement and generating a mechanical work.

The permanent magnet motors can be divided into two types: Synchronous motors with permanent external magnets (EPMSM), these have the permanent magnets mounted on the surface of the rotor, with a relatively large air gap; the second type are the internal permanent magnet motors (IPMSM) unlike the previous ones, this has permanent magnets inserted in the rotor, hidden and protected. [2]

In order to perform model analysis and obtaining engine parameters, it is necessary to understand and identify the operating variables through mathematical calculations, obtaining readings and data from it. [3]

The computational modulation in various investigations is carried out with the application of MATLAB's Simulink software, in which samplings are developed at a rapid speed, applying electrical and mechanical parameters and the visualization shows the operation of the engine based on the calculations obtained from the border variables. On the other hand, evolutionary algorithms are applied as optimization and search methods, which are based on evolution

biological. Many optimization problems are difficult to solve only with the use of traditional techniques, which is why they use this type of algorithms, that are inspired by nature to obtain better results through their searching techniques. [4]

The application of algorithms allows us to look for the improvement in the performance of permanent magnet motors to achieve this application, it is essential to know the algorithms such as the optimization by colony of ants that is described as a tool for the solution of combinatorial problems, which is inspired by the collective behavior of the ants, also, this metaheuristic is considered as intelligence of swarms. [5]

Recently, several researchers have designed and applied new techniques and variations of the first ACO algorithm, in order to solve multi-objective problems. [6]

The algorithm of differential evolution multi-objective (DE) has been adopted by more than a decade by several researchers, which is used to address narrow problems of multi-objective optimization, which are used on a large scale in electrical machines. [7]

In Section II, the mathematical model of the DC motor of permanent magnets in its electrical and mechanical part, and the analysis for the obtaining of the parameters of the motor speed and current are presented. Section III describes the operation of the proposed evolutionary algorithms. In section IV the results obtained in the simulation are shown. Finally, section V details the conclusions of this research.

Volume 7 Issue 3, March 2018

[www.ijsr.net](http://www.ijsr.net)

Licensed Under Creative Commons Attribution CC BY

**2. Mathematical Model**

The direct current motor of permanent magnets is widely used this due to its performance, it is easy to control its speed and position [8], this device has mechanical and electrical characteristics that require the use of differential equations to be modeled.

In Figure 1, the diagram of the mathematical model of a direct current motor with its respective variables and symbols that represent its electrical and mechanical part is shown.

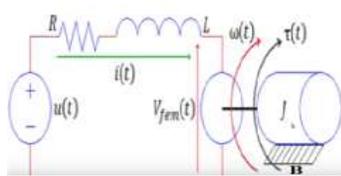


Figure 1: Model of a DC motor.

Where:

- R = Ohmic resistance of rotor windings
- L = inductance of rotor windings
- J = moment of inertia of the rotor
- B = Viscosity friction coefficient between rotor and stator

Variables that depend on time:

- $u(t)$  = source of system excitation or voltage
- $w(t)$  = angular speed of the rotor
- $i(t)$  = system current
- $fem(t)$  = Induced electrical voltage or induced electromotive force [9]

The electric part of the motor was analyzed applying the Kirchhoff voltage law, determining the voltage that enters the circuit, which will be equal to the resistance by the current passing through it, plus the voltage in the coil known as induced voltage, see Ec.1.

$$u(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} + Vfem(t) \tag{1}$$

Electrical part of the engine

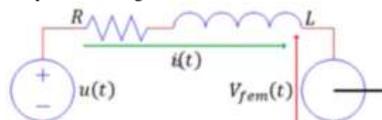


Figure 2: Electrical part of the engine

In order to find the value of the dynamic variable it is necessary to obtain the derivative of the current through the Ec.2

$$L \frac{di(t)}{dt} = u(t) - Ri(t) - Vfem(t) \tag{2}$$

Mechanical part of the engine

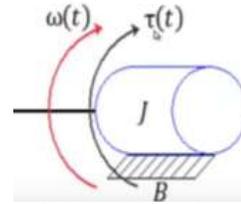


Figure 3: Mechanical part of the engine

Figure 3 shows the model of the mechanical part of the rotor, where the sum of the forces that rotates the axis is equal to the sum of the opposing forces. Represented in Ec.3.

$$r(t) = Bw(t) + j \frac{dw(t)}{dt} + Ti \tag{3}$$

Where we clear the variable of interest and obtain the characteristic equation of the forces. Ec.4

$$j \frac{dw(t)}{dt} = r(t) - Bw(t) - Ti \tag{4}$$

Where Ti is the friction torque, or initial torque.

It is worth mentioning that there are two constants that relate both the electrical part and the mechanical part, these expressions are represented by  $K_t$  that is in the torque Ec.5 and  $K_E$  that is in the electromotive force induced Ec.6

$$r(t) = K_t i(t) \tag{5}$$

$$Vfem(t) = K_E w(t) \tag{6}$$

The four most significant expressions for the model of a direct current motor are the formula to find the current, where yes, the inductance is passed to divide, we obtain the derivative of the current. Ec.2, in the same way we obtain the angular velocity, Ec.4. The Ec.5 torque and the induced electromotive force. Ec.6. So, we can emphasize that all of them are directly related.

**3. Evolutive Algorithms**

**A) Algorithm multi-objective differential evolution CMODE**

The multi-objective differential evolution algorithm is a stochastic direct search algorithm, based on a population P, that uses a set of the initial population Q, which is chosen at random and comprises the candidate solutions. This set is made up of vector individuals NP, while each vector includes the decision variables VD, in a decision space S, which must be optimized, through its operations of mutation, crossing and for the selection process the methodology is implemented of dominance and all this is repeated by iteration to improve the initial candidate solution, until the maximum number of Gmax generations is reached or the required fitness value is achieved. [10] [11]

In each generation of the differential evolution algorithm maintains:

- 1.- a population consisting of  $N_p$  vectors
- $P_g = \{ \vec{x}_1, \vec{x}_2 \dots \vec{x}_{N_p} \}$  where g denotes the number of generations;

2.- Objective function values  $F(\vec{x}_1), F(\vec{x}_2), \dots, F(\vec{x}_{Np})$ , and its restriction level  $R(\vec{x}_1), R(\vec{x}_2), \dots, R(\vec{x}_{Np})$ .

The algorithm starts from a population  $P_{(g)}$  generated randomly within the decision space defined by  $[L_i, U_i], 1 \leq i \leq n$ . later a group of individuals (Q) are chosen randomly from the population  $P_{(g)}$  to produce an offspring (C) to apply the mutation, crossing and selection (DE) operations and are eliminated from  $P_{(g)}$ . Thereafter, the non-dominated individuals (R) are identified from (C) and replace the individuals dominated in Q, (if they exist), the Q set is updated and subsequently Q is updated in  $P_{(g)}$ .

It should be mentioned that, if R contains only infeasible solutions, C will also be composed entirely of infeasible solutions, so the solution not feasible with the lowest degree of restriction violation in R is stored in file A. Each g generation, all the unfeasible individuals in A are used to replace the same number of individuals in  $P_{(g)}$ . It should be noted that the previous substitution is executed based on an unfeasible solution, replacing mechanisms inspired by multi-objective improvement. The procedure is repeated until the maximum number of iterations is achieved. [12]

**B) Ant Colony Optimization Algorithm**

The algorithm ACO is denominated as intelligence of swarms of insects, which use a set of optimization techniques inspired by the collective behavior of the ants, in the simulation of the algorithm it is by means of artificial ants, that are able to learn a space of search during their execution, so they get experience to build better solutions. [13] [14]

**Inicialization**

In this phase, the problem data are introduced, and the parameters of the algorithm are initialized, which is why it is dependent on the problem to be solved.

You must define the number of ants (h) that will form the colony and initialize it, taking in. Note that increasing its size means increasing the exploration of the solution space, but also the cost of memory and computing time. The information related to the pheromones  $T_{ij}$ , is also initialized, with an initial value  $T_0$  homogeneous so as not to decant the search; the evaporation parameter ( $\rho$ ), which has the function of reducing the intensity of pheromone traces; and the parameters that weigh the influence of pheromones ( $\alpha$ ) and heuristic information ( $\beta$ ).

**Construction of Solutions**

Probability is a function that depends on the artificial trail of pheromones and simulates the behavior of ants in nature for the choice of routes

$$P_{ij}^h = \frac{[T_{ij}]^\alpha}{\sum_{l \in N_i^h} [T_{il}]^\alpha} \quad (7)$$

Where  $P_{ij}^h$  is the probability that the ant  $h$  chooses the component  $j$  in the decision,  $T_{ij}$  represents the intensity of

the trace of pheromones in the option  $j$  of the decision  $i$ ,  $\alpha$  is a parameter

**Pheromone Evaporation**

The evaporation of pheromones is carried out in all elements of the trace, simulating the process that occurs in nature.

$$T_{ij} \leftarrow (1 - \rho) * T_{ij} \quad (8)$$

**Pheromones Update**

Each artificial ant deposits a quantity of pheromones in each of the elements of the trace that form the solution, thus increasing the intensity of the trace.

$$T_{ij} \leftarrow + \sum_{h=1}^h \Delta T_{ij}^h \quad (9)$$

Increasing  $\Delta T_{ij}^h$  it is a function of quality, so better solutions deposit more, so that in later iterations of the search it tends towards the areas where those solutions have been found.

**4. Simulation & Results**

**A) Simulink of Matlab.**

Simulink provides a graphical user interface (GUI) to model the system in physical form, which allowed us to analyze the system dynamic from models with block diagrams. The Simulink is widely used in different areas of engineering such as: biomedical, telecommunications, electronics, control engineering and robotics.

**B) Parameters**

The simulated model of the permanent magnet DC motor consists of the following parameters, which were calculated, measured and compared with the manufacturer's technical data:

**Table 1: Parameters**

Motor DC Parameters	
Inductance (L)	96.2 mH
Resistance (R)	31.15 $\Omega$
Inertiamoment (J)	17.54 OI <sup>2</sup>
Coefficient of viscous friction (B)	7 $\mu$
Constantelectromotive(ke)	1.408
Electric time constant(te)	3.088
Torque constant(kt)	13.44
Current (I)	0.65 amp
Revolutions per minute(RPM)	1725 rpm
Angular speed (w)	180.64 r/s
Torque (Hp)	0.536 Nm
Potence (HP)	0.13= 96.94 Watts
Voltage(Volts)	180 volts

**5. Results**

With the simulation, the behavior of the velocity and angular current parameters can be observed.

In fig. 4, the diagram of a CD motor that is composed of two subsystems, current and angular velocity is observed.

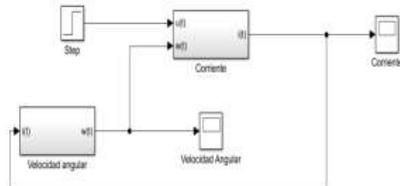


Figure 4. Schematic of the dc motor

In fig. 5 the simulation of the angular velocity subsystem is shown

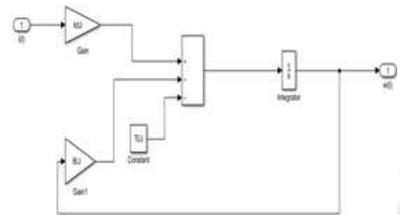


Figure 5: Angular Speed Simulation

In fig. 6 shows the simulation of the current subsystem.

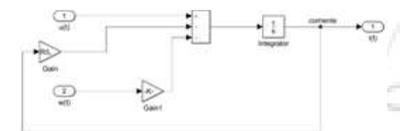


Figure 6: Current Simulation

The following figures show the outputs obtained with respect to the simulation of the DC motor

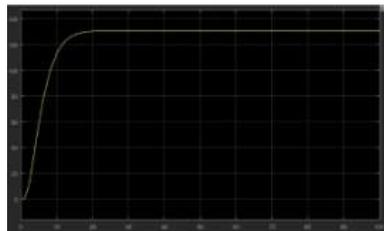


Figure 7: Angular Speed Behavior as a Function of Time

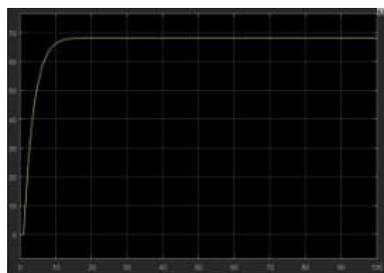


Figure 8: Current-Time Behavior

## 6. Conclusion

With the application of the mathematical model, the obtaining of electrical parameters of the dc motor of permanent magnets and through the simulation can be observed the behavior of the motor both in the speed and the current

In order to model a direct current motor with permanent magnets, different differential equations are used to identify the parameters that allow us to obtain an exact electrical and mechanical model of the motor.

The simulation was carried out with the MATLAB Simulink tool, applying the real values of the machine to develop experimental tests and thus obtain results where the efficiency of the engine can be observed under the operating regimes.

These results allow us to continue with an investigation, with a theoretical-practical foundation to propose improvements that propitiate a performance of said engine.

## References

- [1] A. V. Deepti Yadav, «Performance Analysis of PMSM Drive using MPSO and MOGA Technique,» Lucknow, India, 2016.
- [2] M. A. J. A. M. K. Liu Qinghua, «Desing Optimization of Interior Permanent Magnet Synchronous Motors for Wide-Speed Operation,» Indonesia, 2001.
- [3] M. S. A. Alvarado, «Modelo Matematico de un Motor de Corriente Continua Separadamente Exitado: Control de Velocidad por Corriente de Armadura,» vol. 6, n° 1, pp. 155-161, 2012.
- [4] A. E. S. J. E. Eiben, «Introduction to Evolutionary Computing,» Springer Verlag, pp. 71-87, 2003.
- [5] M. Dorigo, «Optimization, learning and natural algoritms,» Milan, 1992.
- [6] J. L. Z. Y. C. Q. Ying Xie, «Optimization Desing of Line-Start Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Ant Colony Algorithm,» de International Conference on Electrical Machines and Systems, Hangzhou, China, 2014.
- [7] K. P. Rainer Storm, «Differential Evolution - A Simple and Efficient Adaptative Scheme for Global Optimization over Continuous Spaces,» de International Computer Science Institute, 1995.
- [8] A. M. O. K. K. M. A. J. H. W. P. M. A. Rahman, «Advanced on Single-Phase Line-Start High Efficiency Interior Permanent Magnet Motors,» IEEE Trans. Ind Electron, vol. 59, n° 3, pp. 1333-1345, 2012.
- [9] S. J. Chapman, Maquinas Electricas, Mexico, D.F: McGraw Hill, 2012.
- [10] Z. C. Yong Wang, «Combinig Multiobjtieve Opt imization whit Differential Evolution to Solve Constrained Optimization Problems,» IEEE Transaction on Evolutionary Computation, vol. 16, n° 1, pp. 117-133, 2012.
- [11] L. L. Gustavo Caravaggi Tenaglia, «A multiobjtieve Approach of Differential evolution Optimization Applied to Electromagnetic Problems,» IEEE Transactions on Magnetics , vol. 50, n° 2, 2014.

**International Journal of Science and Research (IJSR)**

ISSN (Online): 2319-7064

Index Copernicus Value (2016): 79.57 | Impact Factor (2015): 6.391

- [12] D. M. I. N. A. O. T. W. N. Alireza Fatemi, «Fast Multiobjective CMODE Type Optimization of PM Machines Using Multicore Desktop Computers,» IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 52, n° 4, pp. 2941-2950, 2016.
- [13] M. B. S. G. A. L. Sofiane Mendaci, «Ant Colony for Optimal Design of PM Synchronous Generator for Direct-Drive Wind Turbines,» 2014.
- [14] W. S. Y. P. Daniel Soto, «Algoritmo de Optimización de Colonia de Hormigas Multiobjetivo Aplicado al Problema de la mochila Multidimensional,» Programación Matemática y Software, vol. 3, n° 2, pp. 20-30, 2012.

**Author Profile**

**Carlos Raúl Sánchez Becerril** He obtained the title of Engineer in Information Technology and Communication from the Technological Institute of Apizaco (ITA), Apizaco, Tlax, Mexico, in 2015, currently a student of the master's in computational systems, in the Technological Institute of Apizaco.



**Minerva Matlalcuatzi Cruz**, obtained the title of Engineer in Information Technology and Communications from the Technological Institute of Apizaco (ITA), Apizaco, Tlax, Mexico, in 2016, currently a student of the master's Degree in Computational Systems, at the Technological Institute of Apizaco.



**José Luis Hernández Corona**, Candidate for a PhD in Computational Sciences and Electronics from the Autonomous University of Tlaxcala, MC in Mechanical Technology from the Center for Research in Engineering and Applied Sciences, Research Professor at the Technological University of Tlaxcala, PROMEP Profile since 2007, Head of the Academic Body in Consolidation of Industrial Maintenance, Leader of the Research Network RIMI



**José Crispín Hernández Hernández** He obtained the title of Lic. In Computing by the Technological Institute of Apizaco (ITA), Apizaco, Tlax., Mexico, in 1993. The degree of M. in C. in Computational Sciences by the ITA, Apizaco, Tlax., Mexico, in 1998. And the degree of Doctorate in Informatique by the Université d'Angers, France in 2008. His areas of research include: metaheuristics optimization, bioinformatics, biomedicine, fuzzy logic, computer vision.



**José Federico Ramírez Cruz** He is currently a professor at the National Technological Institute of Mexico (TecNM) Apizaco campus. He obtained the degree of Doctor of Science in the area of Computational Sciences in the National Institute of Astrophysics, Optics and Electronics (INAOE) and the Master of Science in Electronics in the same INAOE, and the degree of Industrial Electronics Engineer in the TecNM campus Puebla. His areas of interest are: the applications of Automatic Learning, Evolutionary Computing and Computer Vision.

Volume 7 Issue 3, March 2018

[www.ijsr.net](http://www.ijsr.net)

Licensed Under Creative Commons Attribution CC BY

---

## Apéndice B

### Documentos de Estancias



C. DOMINGO ARENAS 16A, COL. FCO. SARABIA, CALPULALPAN TLAX. C.P. 90207  
Tel: 749-918-3432 Cel. 749-101-4120

**GRUPO F3 INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN  
Y COMPUTACIÓN S.A. DE C.V.**

RFC:GF1104296BA  
email:grupof3sacv@gmail.com

Calpulalpan Tlaxcala a 3 de noviembre de 2017

**Asunto:** Carta de Aceptación de Estancia  
Profesional de Investigación

**MTRO. FELIPE PASCUAL ROSARIO AGUIRRE**

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE APIZACO**

**DIRECTOR**

**PRESENTE.**

Por este conducto me permito informar a usted que el **Ing. Carlos Raúl Sánchez Becerril**, con número de control **M10370749**, estudiante de la **Maestría en sistemas computacionales** del instituto tecnológico de Apizaco, ha sido aceptado para realizar su estancia de investigación durante el periodo comprendido del 16 de octubre de 2017 al 16 de abril de 2018, los días jueves y viernes en un horario de 9:00 a 18:00 hrs. Incorporándolo en el departamento de Computación y electrónica de la empresa Grupo F3 Ingeniería en Construcción y Computación S. A de C. V. en el proyecto: **"Análisis de datos de un motor de imanes permanentes usando un algoritmo de optimización evolutiva"**,

A petición del interesado y para fines legales que al mismo le convengan; se extiende la presente a los 3 días del mes de noviembre del año en curso.

Sin otro particular por el momento, reciba un cordial saludo.

**ATENTAMENTE**

**M. I. FERNANDO GONZÁLEZ SÁNCHEZ**

**Administrador Único de la Empresa**

**Grupo F3 Ingeniería en Construcción y Computación S.A de C.V**



C. DOMINGO ARENAS 16A, COL. FCO. SARABIA, CALPULALPAN TLAX. C.P. 90207  
Tel: 749-918-3432 Cel. 749-101-4120

**GRUPO F3 INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN  
Y COMPUTACIÓN S.A. DE C.V.**

RFC: GFI1104296BA  
email: grupof3sacv@gmail.com

Calpulalpan, Tlaxcala a 16 de abril del 2018.

ASUNTO: LIBERACIÓN DE ESTANCIA EN EMPRESA

Mtro. Felipe Pascual Rosario Aguirre.  
Director del Instituto Tecnológico de Apizaco  
PRESENTE

El que suscribe M.I. Fernando González Sánchez, Administrador Único de la empresa GRUPO F3 INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN Y COMPUTACIÓN S.A. de C.V., por medio de la presente se hace constar que el **Ing. Carlos Raúl Sánchez Becerril**, realizo satisfactoriamente su estancia en nuestra empresa, durante el periodo del 16 de Octubre del 2017 al 16 de Abril del 2018, incorporándolo en el Departamento de Computación y Electrónica de la empresa Grupo F3 Ingeniería en Construcción y Computación S.A. de C.V., en el proyecto: **"Análisis de datos de un motor de imanes permanentes usando un algoritmo de optimización evolutiva"**.

A petición del interesado y para fines legales que al mismo convengan, se extiende la presente constancia a los 16 días del mes de abril del año en curso.

ATENTAMENTE

M. I. Fernando González Sánchez  
REPRESENTANTE LEGAL DE  
GRUPO F3 INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN Y COMPUTACIÓN.



C.C.P. Interesado  
C.C.P. Archivo de la Empresa



C. DOMINGO ARENAS 16A, COL. FCO. SARABIA, CALPULALPAN TLAX. C.P. 90207  
Tel: 749-918-3432 Cel. 749-101-4120

**GRUPO F3 INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN  
Y COMPUTACIÓN S.A. DE C.V.**

RFC:GF11042968A  
email:grupof3sacv@gmail.com

Calpulalpan, Tlaxcala a 16 de abril del 2018.

ASUNTO: Constancia de Satisfacción.

**Dr. José Federico Casco Vásquez**

**Jefe de la división de estudios de Posgrado e Investigación del**

**Instituto Tecnológico de Apizaco.**

PRESENTE

Sirva la presente para enviarle un cordial saludo y notificarle que posterior a la recepción del proyecto de tesis del Ing. **Carlos Raúl Sánchez Becerril**, alumno de la Maestría en Sistemas Computacionales con numero de control **M10370749**, de la institución que usted destacadamente dirige, se incluyo en el proyecto que lleva como título:

**“Análisis de datos de un motor de imanes permanentes usando un algoritmo de optimización evolutiva”**

Siendo este desarrollado bajo la dirección del M.I. Fernando González Sánchez. En virtud de que se han cubierto satisfactoriamente los objetivos establecidos para el desarrollo del citado proyecto.

Agradeciendo ampliamente sus atenciones quedo de usted.

ATENTAMENTE

M. I. Fernando González Sánchez  
REPRESENTANTE LEGAL DE  
GRUPO F3 INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN Y COMPUTACIÓN.



C.C.P. Interesado  
C.C.P. Archivo de la Empresa

---

# Bibliografía

(1995). *FLUKE 39/41B Power Harmonic Tester*. FLUKE.

(2010). *Fluke 810 Vibration Tester*. FLUKE.

(2013). *Analizador de Potencia y Armónicos Modelo PQ-3350*. EXTECH.

Almonacid, O. (2008). Evaluación de fallos de un motor sincrónico de imanes permanentes mediante el mef. *Universidad del Valle*.

Ariyasingha, I. and Fernando, T. (2016). A modified pareto strength ant colony optimization algorithm for the multi-objective optimization problems. In *Information and Automation for Sustainability (ICIAfS), 2016 IEEE International Conference on*, pages 1–6. IEEE.

Bullnheimer, B., Hartl, R. F., and Strauss, C. (1997). A new rank based version of the ant system. a computational study.

Buschow, K. H. J., Boer, F. R., et al. (2003). *Physics of magnetism and magnetic materials*, volume 92. Springer.

Černý, V. (1985). Thermodynamical approach to the traveling salesman problem: An efficient simulation algorithm. *Journal of optimization theory and applications*, 45(1):41–51.

Cherta, M. C. (1995). *Curso moderno de máquinas eléctricas rotativas*, volume 4. Reverte.

Chong, E. K. and Zak, S. H. (2013). *An introduction to optimization*, volume 76. John Wiley & Sons.

- Cullity, B. D. and Graham, C. D. (2011). *Introduction to magnetic materials*. John Wiley & Sons.
- Dorigo, M. (1992). Optimization, learning and natural algorithms. *PhD Thesis, Politecnico di Milano*.
- Dorigo, M. and Gambardella, L. M. (1997). Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem. *IEEE Transactions on evolutionary computation*, 1(1):53–66.
- Dorigo, M., Maniezzo, V., and Coloni, A. (1996). Ant system: optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 26(1):29–41.
- Dorigo, M. and Stützle, T. (2003). The ant colony optimization metaheuristic: Algorithms, applications, and advances. In *Handbook of metaheuristics*, pages 250–285. Springer.
- Dorigo, M. and Stützle, T. (2009). Ant colony optimization: overview and recent advances. *Techreport, IRIDIA, Université Libre de Bruxelles*, 8.
- Engelbrecht, A. P. (2006). *Fundamentals of computational swarm intelligence*. John Wiley & Sons.
- Feo, T. A. and Resende, M. G. (1995). Greedy randomized adaptive search procedures. *Journal of global optimization*, 6(2):109–133.
- Forbes, N. (2004). *Imitation of life: how biology is inspiring computing*. Mit Press Cambridge.
- Glover, F. (1977). Heuristics for integer programming using surrogate constraints. *Decision sciences*, 8(1):156–166.
- Glover, F. and Laguna, M. (1998). Tabu search. In *Handbook of combinatorial optimization*, pages 2093–2229. Springer.
- Goldberg, D. E. and Holland, J. H. (1988). Genetic algorithms and machine learning. *Machine learning*, 3(2):95–99.

- Harper, G. E. (1987). *El ABC de las máquinas eléctricas*, volume 2. Editorial Limusa.
- Haupt, R. L., Haupt, S. E., and Haupt, S. E. (1998). *Practical genetic algorithms*, volume 2. Wiley New York.
- Jahns, T. M. and Soong, W. L. (1996). Pulsating torque minimization techniques for permanent magnet ac motor drives—a review. *IEEE transactions on industrial electronics*, 43(2):321–330.
- Jin, L., Wang, D., and Yang, Q. (2017a). Research on optimization algorithm of bp neural network for permanent magnet synchronous motor based on cloud computing. In *Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2017 20th International Conference on*, pages 1–6. IEEE.
- Jin, L., Wang, F., and Yang, Q. (2017b). Performance analysis and optimization of permanent magnet synchronous motor based on deep learning. In *Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2017 20th International Conference on*, pages 1–5. IEEE.
- Kosow, I. L. (1993). *Máquinas eléctricas y transformadores*. Pearson Educación.
- Lassaad, Z., Ali, M., and Hamed, T. (2017). Particle swarm-based optimization of an in wheel permanent magnet motor. In *Systems, Signals & Devices (SSD), 2017 14th International Multi-Conference on*, pages 138–144. IEEE.
- Londoño-Parra, C. M. and Ramírez-Echavarría, J. L. (2013). Normas de eficiencia energética de motores de inducción, ¿ está preparada latinoamérica? *Tecnología*, (30).
- Martin, O., Otto, S. W., and Felten, E. W. (1992). Large-step markov chains for the tsp incorporating local search heuristics. *Operations Research Letters*, 11(4):219–224.
- Mavrovouniotis, M., Müller, F. M., and Yang, S. (2017). Ant colony optimization with local search for dynamic traveling salesman problems. *IEEE transactions on cybernetics*, 47(7):1743–1756.

- Muñoz, R. (2008). Generalidades sobre imanes permanentes y su caracterización. *Instituto Nacional de Tecnología Industrial*.
- Olivas, F., Valdez, F., and Castillo, O. (2014). A fuzzy system for parameter adaptation in ant colony optimization. In *Swarm Intelligence (SIS), 2014 IEEE Symposium on*, pages 1–6. IEEE.
- Part-Enander, E., Sjöberg, A., Melin, B., and Isaksson, P. (1996). *The MATLAB handbook*. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc.
- Ratanavilisagul, C. (2017). Modified ant colony optimization with pheromone mutation for travelling salesman problem. In *Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 2017 14th International Conference on*, pages 411–414. IEEE.
- Santana, J. B., Rodríguez, C. C., López, F. C. G., Torres, M. G., Batista, B. M., Pérez, J. A. M., Vega, J. M. M., and de Computación Inteligente, G. (2004). Metaheurísticas: una revisión actualizada.
- Stützle, T. and Hoos, H. H. (2000). Max–min ant system. *Future generation computer systems*, 16(8):889–914.
- Vázquez Leal, F. E. Diseño y simulación de un prototipo de motor-generador magnético de imanes permanentes.
- Wei, X., Li, Z., and Qu, J. (2014). Research on parameters optimization and simulation of the ant colony algorithm.
- Wolpert, D. H. and Macready, W. G. (1997). No free lunch theorems for optimization. *IEEE transactions on evolutionary computation*, 1(1):67–82.
- Xie, Y., Li, J., Yang, Z., and Qu, C. (2014). Optimization design of line-start permanent magnet synchronous motor based on ant colony algorithm. In *Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2014 17th International Conference on*, pages 75–79. IEEE.

- 
- Yadav, D. and Verma, A. (2016). Performance analysis of pmsm drive using mpso and moga technique. In *Industrial Electronics and Applications Conference (IEA-Con), 2016 IEEE*, pages 197–202. IEEE.
- Zhang, Z. and Zou, K. (2017). Simple ant colony algorithm for combinatorial optimization problems. In *Control Conference (CCC), 2017 36th Chinese*, pages 9835–9840. IEEE.
- Zhu, X., Xiang, Z., Quan, L., Wu, W., and Du, Y. (2018). Multimode optimization design methodology for a flux-controllable stator permanent magnet memory motor considering driving cycles. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(7):5353–5366.