



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**SIMULACIÓN DINÁMICA DE UN MOTOR DE
RELUCTANCIA ACCIONADO POR CONMUTACIÓN
(MRAC) DE BAJO CONSUMO DE ENERGÍA
ELÉCTRICA**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO ELÉCTRICO-ELECTRÓNICO

P R E S E N T A

JORGE ALBERTO ROSAS FLORES

DIRECTOR DE TESIS: ING. ARTURO MORALES COLLANTES



México, D.F.

2003

CONTENIDO.

Tabla de contenido	i
Índice de Figuras	v
Índice de Tablas	vii
Nomenclatura	viii
Motivos e inquietudes para el desarrollo de este tema	1
Prefacio	2
Introducción	4
Objetivo	6
Hipótesis	7
CAPITULO 1	
ANTECEDENTES (MOTORES ELÉCTRICOS)	8
1.1 Motores eléctricos.	8
1.2 Los motores eléctricos en la historia.	9
1.3. Tipo de corriente de alimentación para los motores eléctricos	12
1.3.1 Fundamentos de corriente alterna.	12
1.3.2 Fundamentos de corriente continua	14
1.4 Clasificación y funcionamiento de los motores eléctricos	15
1.5 Usos de los motores eléctricos.	22
CAPITULO 2	
LOS MRAC (PROPIEDADES)	24
2.1 Principios de operación de los MRAC	24
2.2 Funcionamiento de los MRAC.	26
2.3 Características de los MRAC.	28
2.3.1 Características par-velocidad	28
2.3.2 Fuente conmutada de alimentación.	29
2.3.3 Geometría de los MRAC.	31

2.4	Sección estructural de los MRAC.	32
	2.4.1 Devanados del estator.	32
	2.4.2 Laminación del rotor.	33
	2.4.3 Entrehierro.	34
	2.4.4 Balanceo del rotor.	35
2.5	Control de los MRAC	37
3.7	¿Que ofrecen los MRAC?	38
	2.6.1 Ventajas.	38
	2.6.2 Desventajas.	40
2.7	Avances tecnológicos en los motores de reluctancia.	40

CAPITULO 3

MODELO MATEMÁTICO DE LOS MRAC. 43

3.1	¿Porqué el uso de un modelo matemático?	44
	3.1.1 Requisitos de un modelo matemático.	45
3.2	Modelo matemático general de los MRAC.	46
	3.2.1 Ecuaciones electromagnéticas.	46
	3.2.2 Ecuación general de par.	47
	3.2.3.- Simplificación de la ecuación de par.	52
3.3	Modelo utilizado para la simulación.	52
	3.3.1 Modelo simplificado del MRAC.	52

CAPITULO 4

SIMULACION DEL MRAC 55

4.1	Simulación de motores eléctricos.	56
	4.1.1 Definición de simulación.	56
	4.1.2 El porque de la simulación.	56
	4.1.3 Componentes de una simulación por computadora.	57
	4.1.4 Diseño de la simulación por computadora.	58
	4.1.5 Ventajas y desventajas de la simulación.	59
4.2	Revisión bibliográfica de simulación en los MRAC.	59

4.3	Simulador utilizado en este trabajo (Matlab - Simulink).	60
4.3.1	Matlab.	61
4.3.2	Simulink.	62
4.4	Simulación en Matlab – Simulink	63
4.4.1	Programación en Matlab	64
4.4.2	Simulación basada en Simulink.	65
CAPITULO 5		
RESULTADOS DE SIMULACION.		66
5.1	Parámetros del MRAC	67
5.2	Listados para la simulación en Matlab	67
5.2.1	Listado para el programa de inicio.	67
5.2.2	Listado para el programa de conmutación.	69
5.2.3	Listado para el programa de inductancia.	70
5.2.4	Listado para el programa de par	72
5.3.	Simulación en Simulink	73
5.4	Resultados de simulación.	75
5.4.1	Inductancia.	76
5.4.2	Tensión de alimentación.	78
5.4.3	Corriente.	79
5.4.4	Par.	82
5.4.5	Velocidad.	84
5.5	Caracterización del MRAC.	86
5.5.1	Obtención de la potencia del MRAC	86
5.6	Pequeño momento de inercia. (gran respuesta dinámica)	87
5.7	El motor de reluctancia mejor aprovechamiento para bajas revoluciones.	89
5.8	Consumo de energía.	90
5.9	Costos en los motores eléctricos.	93
5.9.1	Estimación de manufactura.	94

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	96
BIBLIOGRAFÍA.	99
APENDICE I	101
APENDICE II	109

ÍNDICE DE FIGURAS

- FIGURA 1.1 Fundamento de un generador de corriente alterna
- FIGURA 1.2 Vista de un generador de corriente continua
- FIGURA 1.3 Vista de un pequeño motor de corriente continua.
- FIGURA 1.4 Vista de un motor síncrono.
- FIGURA 1.5 Vista de un motor tipo jaula de ardilla
- FIGURA 1.6 Vista de un MRAC.
- FIGURA 2.1 Corte transversal de un MRAC.
- FIGURA 2.2 Curva par-velocidad de los MRAC
- FIGURA 2.3 Conmutador electrónico para un MRAC 3ϕ
- FIGURA 2.4 Geometría de los MRAC
- FIGURA 2.5 Devanados de los MRAC
- FIGURA 2.6 Rotor de un MRAC
- FIGURA 2.7 Programa “demo” de estudio de ruido en los MRAC
- FIGURA 2.8 Modelo utilizado para el estudio de ruido en los MRAC.
- FIGURA 2.9 Polos del rotor de un MRAC.
- FIGURA 2.10 Estructura de un MRAC con 6 polos en el estator y 4 polos en el rotor
- FIGURA 3.1 Interpretación gráfica de la energía de campo magnético
- FIGURA 3.2 Interpretación gráfica de la co-energía de campo magnético.
- FIGURA 3.3 Inductancia de cada fase de un MRAC $6/4$
- FIGURA 3.4 Arcos de rotor y estator de un MRAC $6/4$
- FIGURA 5.1 Esquema de simulación en Simulink
- FIGURA 5.2 Esquema detallado del esquema de simulación en Simulink
- FIGURA 5.3 Inductancia de fase

- FIGURA 5.4 Acercamiento de la gráfica 5.3
- FIGURA 5.5 Inductancia en los MRAC
- FIGURA 5.6 Voltaje de alimentación del MRAC
- FIGURA 5.7 Corriente de fase del MRAC.
- FIGURA 5.8 Acercamiento de la gráfica 5.7
- FIGURA 5.9 Par obtenido del MRAC
- FIGURA 5.10 Acercamiento de la curva 5.9
- FIGURA 5.11 Velocidad del MRAC.
- FIGURA 5.12 Acercamiento de la figura 5.11
- FIGURA 5.13 Representación gráfica de los momentos de inercia
- FIGURA 5.14 Máximo par motor permitido en régimen permanente, referido respecto al momento de inercia
- FIGURA 5.15 Comparación gráfica de corriente eléctrica entre motores

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA No 1	Usos de los motores eléctricos en la industria
TABLA No 2	Caracterización del motor de reluctancia simulado
TABLA No 3	Comparación de momentos de inercia de distintos motores eléctricos de proporciones semejantes
TABLA No 4	Corriente eléctrica a plena carga de motores eléctricos
TABLA No 5	Consumo y ahorro de energía entre motores eléctricos
TABLA No 6	Costo en motores eléctricos
TABLA No 7	Costos de manufactura de un motor de reluctancia (simulado)

NOMENCLATURA.

MRAC MOTOR DE RELUCTANCIA ACCIONADO POR CONMUTACIÓN

ó SRM POR SUS SIGLAS EN INGLES "SWITCHED RELUCTANCE MOTOR"

θ POSICIÓN DEL ROTOR [rad]

ω VELOCIDAD ANGULAR [rad/s]

ψ FLUJO MAGNETICO (MODELO SIMPLIFICADO) [Wb]

ϕ FLUJO MAGNETICO (MODELO GENERAL) [Wb]

N_r NUMERO DE POLOS EN EL ROTOR.

N_s NUMERO DE POLOS EN EL ESTATOR.

T PAR [N*m]

T_l PAR DE CARGA [N*m]

V VOLTAJE DE FASE [V]

β_r ARCO DEL ROTOR. [°]

β_s ARCO DEL ESTATOR. [°]

J MOMENTO DE INERCIA [Kg*m²]

H INDUCTANCIA [H]

A CORRIENTE ELÉCTRICA [A]

W_f ENERGÍA DE CAMPO MAGNÉTICO.

W_c COENERGÍA DE CAMPO MAGNETICO.

W_m ENERGÍA MECANICA

θ_s ANGULO DE DESPLAZAMIENTO DE INDUCTANCIA ENTRE FASES [°]

θ_x ANGULO DE DESPLAZAMIENTO DE INDUCTANCIA UNO CON RESPECTO A CERO GRADOS

θ_y ANGULO DE DESPLAZAMIENTO DE INDUCTANCIA DOS CON RESPECTO A CERO GRADOS

f COEFICIENTE DE FRICCIÓN.

r.p.m. REVOLUCIONES POR MINUTO.

P POTENCIA [HP] [KW]

R RESISTENCIA DE FASE

CFE COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD

PREFACIO

Este trabajo fue realizado utilizando la herramienta de programación MATLAB con simulación en SIMULINK para determinar parámetros como inductancia propia de fase, corriente de fase, y torque de fase para caracterizar a un motor de reluctancia (6 polos en estator y 4 polos en el rotor).

Con base en la teoría general y básica de máquinas eléctricas rotativas, se plantea el estudio de los motores de reluctancia accionados por conmutación, con ello se determinó las ecuaciones diferenciales generales propias del circuito eléctrico, que permiten estudiar directamente las respuestas temporales.

El presente trabajo muestra la simulación del motor de reluctancia con características lineales a partir del modelo establecido y considera el omitir algunos parámetros como es el caso de la inductancia mutua entre fases, además de considerar lineal el flujo en el entrehierro de la máquina; pero siempre tomando en cuenta los parámetros fundamentales como es el caso de la resistencia de fase, inercia, voltaje de alimentación, entre otros; que como hemos visto nos brinda aproximaciones muy buenas que esperábamos en un principio de la realización del tema.

En este caso se utilizó con el programa MATLAB ver 5.2 y SIMULINK ver 2.0, el cual en la facultad de ingeniería ha probado ser pieza fundamental para el desarrollo y análisis de sistemas dinámicos.

Los programas utilizados para la simulación se encuentran debidamente comentados para su fácil comprensión, además del diagrama de bloques de la simulación que nos brinda una idea general y sencilla de su funcionamiento.

Si bien el motivo original de este desarrollo fue el de disponer de una herramienta para fines didácticos, su potencialidad lo hace perfectamente aplicable para sistemas productivos y de diseño, donde no se justificaría el empleo de programas comerciales de mucha mayor envergadura, que recargarían considerablemente el aspecto económico del estudio del tema.

Una de las principales ventajas que presenta el motor de reluctancia, es su bajo costo de construcción, debido a su estructura simple, la cual consta de devanados solamente en el estator, además de ser una máquina eléctrica muy confiable, debido a que cada fase del motor se encuentra física, eléctrica y magnéticamente independiente. Esto nos lleva a pensar que si alguna fase del motor llegase a fallar, la máquina no dejará de funcionar (pero su rendimiento disminuiría), esto es muy importante y atractivo para sistemas que necesitan una alta confiabilidad en el proceso que efectúan.

Como se cometa en un principio, se obtuvo las respuestas temporales del motor de reluctancia conmutada, que caracterizan a dicho motor; las respuestas obtenidas están en un rango de valores reales, además fueron sometidos a diversas comparaciones con otros modelos de simulación, y el resultado fue una similitud asombrosa, esto tomando en cuenta que nosotros realizamos una simulación con un modelo lineal, y las demás simulaciones toman en cuenta una serie de parámetros mas completa y compleja.

Al tener las respuestas temporales del motor de reluctancia, pudimos caracterizar al modelo del motor simulado; con lo anterior pudimos comparar este motor con otros de tecnologías diversas, similares características y mismas dimensiones, resultando ser los motores de reluctancia accionados por conmutación una máquina eléctrica atractiva por el ahorro de energía eléctrica que presenta.

los resultados más importantes obtenidos son:

- ✓ Ahorro de energía eléctrica del 16%, basándose en consumos promedios.
- ✓ Ahorro económico en la construcción de estos motores del 27% con respecto a otras tecnologías utilizadas actualmente.

Es importante mencionar que el primer paso en el estudio de motores de reluctancia conmutada esta dado, espero que en un futuro no muy lejano, estudiantes y grupos de investigación, desarrollen temas basados en este trabajo o relacionados con este.

Sabemos que el estudio de los motores de reluctancia conmutada es muy amplio, en el área de control principalmente, y espero que este tema sea el camino para abrir un espacio en las futuras líneas de investigación.

OBJETIVO GENERAL.

Comprobar que los Motores de Reluctancia Accionados por Conmutación (MRAC) son de bajo consumo de energía eléctrica; a partir de su caracterización basada en un modelo de simulación digital.

Objetivos Particulares:

- ✓ Conocer las características físicas y matemáticas del motor de reluctancia para conocer las ventajas y desventajas que nos puede ofrecer.
- ✓ Realizar uno de los primeros estudios sobre motores de reluctancia basado en programación en MATLAB-SIMULINK.
- ✓ Conocer las respuestas temporales derivadas de la simulación dinámica basada en MATLAB-SIMULINK, como es el caso de la corriente, inductancia y torque de fase, además de la velocidad y el voltaje de alimentación del motor.
- ✓ Conocer el ahorro de energía que los motores de reluctancia tienen sobre otras tecnologías de características similares de iguales dimensiones.
- ✓ Presentar en forma didáctica todos los conocimientos presentados, esto con el fin de tener una fácil comprensión por parte de la gente que consulte esta obra.
Esta forma didáctica, será en base a un CD-ROM que contiene la programación en MATLAB y la simulación hecha en SIMULINK, además de programas hechos por investigadores dedicados al área de estudio de los motores de reluctancia; se anexan

además manuales de MATLAB-SIMULINK que ayudaran a comprender mejor lo realizado en este trabajo de tesis.

- ✓ Conocer los avances que los motores de reluctancia tiene hasta la fecha y poder saber o inferir, el impacto que estos motores nos brindarán en un tiempo no muy largo.

- ✓ Apertura y conocimiento de futuras líneas de investigación, que aporten y sirvan para formar un camino firme en el desarrollo y estudio de los motores de reluctancia

HIPOTESIS:

- ✓ Los motores de reluctancia accionados por conmutación son máquinas eléctricas de bajo consumo energético.

- ✓ Los motores de reluctancia accionados por conmutación son máquinas eléctricas que presentan una atractiva eficiencia con respecto a otras tecnologías utilizadas actualmente.

- ✓ Los motores de reluctancia accionados por conmutación presentan una sencilla forma de construcción que redunde en un bajo costo tanto constructivo como operativo.

- ✓ Esta división de máquinas eléctricas se encuentra actualmente en desarrollo en nuestro país, además de otros centros de desarrollo e investigación internacionales.

CAPITULO 1

ANTECEDENTES (MOTORES ELÉCTRICOS)

En este capítulo, haremos referencia a la ubicación que los motores de reluctancia accionados por conmutación "**MRAC**" tienen dentro de las máquinas eléctricas. En la primera sección hablaremos de conceptos básicos de motores eléctricos, como es el caso de una breve reseña histórica, clasificación y uso de los motores eléctricos, hasta poder llegar a ubicar a los *MRAC*'s dentro de las máquinas eléctricas, esto permitiendo comprender las características fundamentales que nos pueden brindar.

1.1 MOTORES ELÉCTRICOS

Los motores eléctricos efectúan la transformación de la energía eléctrica recibida de la red en energía mecánica en su eje, por intermedio de las interacciones electromagnéticas entre los devanados o los materiales magnéticos del rotor y el estator del motor.

En general el rendimiento de la transformación es muy alto comparativamente con otros dispositivos convertidores de energía. Sin embargo, hay varias razones que inducen a

prestar atención a la utilización racional de la energía en el empleo de los motores eléctricos.

Uno de ellos es el rendimiento del motor eléctrico, que esta ligado al empleo de una energía de calidad excepcional.

Otro punto es la gran difusión del uso de los motores eléctricos, entre otras razones por su alto rendimiento, economía, comodidad de empleo y limpieza, lo cual es una pieza fundamental de los procesos productivos actuales.

Como un dato muy importante se puede estimar que el 35% de la energía eléctrica se consume en los motores eléctricos.

1.2 LOS MOTORES ELÉCTRICOS EN LA HISTORIA.

Para ubicar los motores en la historia tenemos inevitablemente que remontarnos al descubrimiento y desarrollo de fenómenos magnéticos y eléctricos básicos. El fenómeno del magnetismo se conoce desde tiempos antiguos, las primeras observaciones de fenómenos magnéticos fueron hechas en la ciudad de Asia menor llamada Magnesia.

La piedra imán o magnetita, un óxido de hierro que tiene la propiedad de atraer los objetos de hierro, ya era conocida por los griegos, los romanos y los chinos. Cuando se pasa una piedra imán por un pedazo de hierro, éste adquiere a su vez la capacidad de atraer otros pedazos de hierro. Los imanes así producidos están 'polarizados', es decir, cada uno de ellos tiene dos partes o extremos llamados polos norte y sur. Los polos iguales se repelen, y los polos opuestos se atraen.

Tales de Mileto, seis siglos antes de Cristo, observó que una barra de ambar frotada atraía pequeñas partículas de materia.

La brújula se empezó a utilizar en Occidente como instrumento de navegación alrededor del 1300 d.C

William Gilbert publicó su libro, *De magnete* en 1600. Gilbert aplicó métodos científicos al estudio de la electricidad y el magnetismo.

Charles de Coulomb, en 1777 inventó la balanza de torsión para medir la fuerza de atracción magnética y eléctrica. Con este invento, Coulomb pudo establecer el principio, conocido ahora como ley de Coulomb, que rige la interacción entre las cargas eléctricas.

Hacia 1800 es desarrollada la llamada pila de Volta, precursora de la batería eléctrica, que producía un flujo estable de electricidad, y hace así su aparición en la historia la corriente eléctrica, uno de los fenómenos físicos que más han revolucionado al mundo.

La primera Revolución Industrial tuvo lugar en el Reino Unido a finales del siglo XVIII aproximadamente en los años posteriores a 1875, supuso una profunda transformación en la economía y sociedad británicas. Los cambios más inmediatos se produjeron en los procesos de producción: qué, cómo y dónde se producía. El trabajo se trasladó de la fabricación de productos primarios a la de bienes manufacturados y servicios. El número de productos manufacturados creció de forma espectacular gracias al aumento de la eficacia técnica. Así, la Revolución Industrial tuvo como consecuencia una mayor urbanización y, por tanto, procesos migratorios desde las zonas rurales a las zonas urbanas.

Se puede afirmar que los cambios más importantes afectaron a la organización del proceso productivo. Las fábricas aumentaron en tamaño y modificaron su estructura organizativa, es decir, se sustituyó el trabajo artesanal por producción en serie donde se utilizan maquinas (motores) para la realización de estos.

Esta etapa hace un giro total en la percepción y desarrollo de maquinas para la producción. Es aquí donde los motores eléctricos toman un camino seriamente prometedor hacia un futuro muy cercano.

Hans Christian Oersted, demostró la existencia de un campo magnético en torno a una corriente eléctrica.

En 1819 descubrió que una aguja imantada se desvía colocándose en dirección perpendicular a un conductor por el que circula una corriente eléctrica, iniciando así el estudio del electromagnetismo

André Marie Ampère En 1826 fue el primero en demostrar que dos conductores paralelos por los que circula una corriente en el mismo sentido, se atraen el uno al otro, mientras que si los sentidos de la corriente son opuestos, se repelen.

En 1831, el científico británico Michael Faraday descubrió que el movimiento de un imán en las proximidades de un cable induce en éste una corriente eléctrica; este efecto era inverso al hallado por Oersted. Así, Oersted demostró que una corriente eléctrica crea un campo magnético, mientras que Faraday demostró que puede emplearse un campo magnético para crear una corriente eléctrica

Henry experimentó y perfeccionó el electroimán, inventado en 1823 por el británico William Sturgeon. Hacia 1829 había desarrollado electroimanes con gran fuerza de sustentación y eficacia y esencialmente iguales que los utilizados más tarde en motores eléctricos. En 1831 ideó y construyó uno de los primeros motores eléctricos.

En base a lo anterior, se puede decir que el motor eléctrico, estaba listo para su desarrollo.

Otro punto muy importante en la situación histórica de los motores es la iluminación, que gracias a su crecimiento ayudo al pronto desarrollo de la tecnología de las máquinas eléctricas.

Aproximadamente a partir de 1840 fueron patentadas varias lámparas incandescentes, aunque ninguna tuvo éxito comercial hasta que el inventor estadounidense Thomas Alva Edison lanzara su lámpara de filamento de carbono en 1879

Estos dos descubrimientos: transformar energía mecánica (donde la hubiera) en electricidad y luego, transformar en otro sitio la energía eléctrica transportada a la velocidad de arrastre de la corriente eléctrica por un cable en energía mecánica (con motores o aparatos eléctricos), fue el acontecimiento más notable en la energética de la época.

La idea de suministrarla simultáneamente y coordinadamente a un cierto número de clientes impulsó la creación de un plan para el abastecimiento desde un sistema de generación común.

George Lane-Fox en Inglaterra y Thomas Alva Edison en EE.UU. propusieron planes para el desarrollo de esta idea. De esta manera, casi simultáneamente en Londres y Nueva Cork, se pusieron en servicio en 1882 las centrales térmicas de Holborn y de la calle Peral, dando un suministro que era bastante limitado en extensión.

Aunque estos sistemas jugaron un rol importante en el comienzo del desarrollo del servicio eléctrico, pronto se hicieron evidentes las limitaciones técnicas y económicas del transporte a media y gran distancia, que para la corriente continua parecían imposibles de evitar.

Paralelamente al desarrollo comercial de la corriente continua, en 1891 Gaulard y Gibas en Inglaterra patentaron un sistema de distribución en corriente alterna. Basado en esta patente, se perfeccionó el transformador, piedra fundamental de la utilización de la corriente alterna.

Las innumerables ventajas industriales de la energía eléctrica hicieron instalar rápidamente mayores centrales eléctricas privadas, establecidas por fábricas grandes; con esto se impulsó de manera importante el uso de máquinas eléctricas que hoy en día representan una base importante en el desarrollo y bienestar del ser humano.

1.3. TIPO DE CORRIENTE DE ALIMENTACIÓN PARA LOS MOTORES ELÉCTRICOS

Es este punto trataremos las dos fuentes principales de alimentación de energía eléctrica, que son la energía eléctrica alterna, y la energía eléctrica continua.

A continuación mostramos algunos fundamentos de estas formas de energía que servirán de base para su comprensión.

1.3.1 FUNDAMENTOS DE CORRIENTE ALTERNA.

El suministro de energía eléctrica en las redes de consumidores tiene lugar mediante corriente alterna ya que los niveles de una tensión alterna pueden ser cambiados, casi sin pérdidas, en los transformadores.

Se distinguen corrientes alternas monofásicas y trifásicas. La monofásica se compone de una sola corriente alterna; la trifásica de tres corrientes alternas, separadas 120° eléctricos cada una.

En la producción de tensión por inducción, en el caso de corriente alterna, se obtiene en base a un generador síncrono, que a continuación se presenta en la figura 1.1.

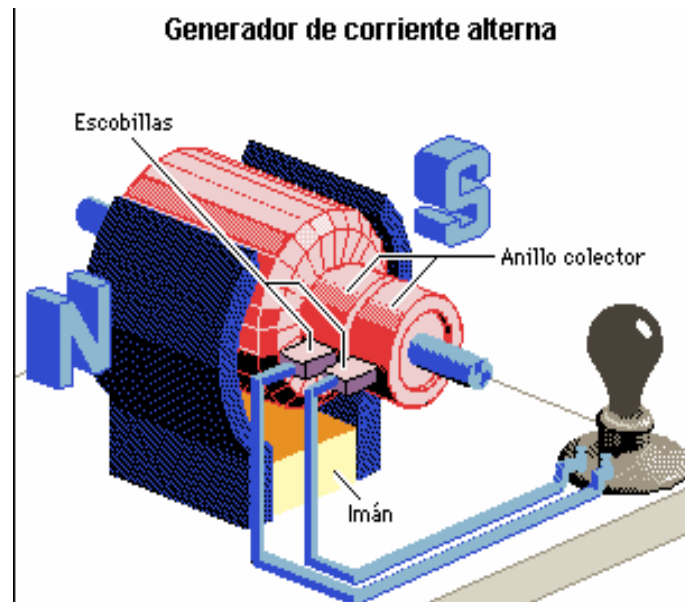
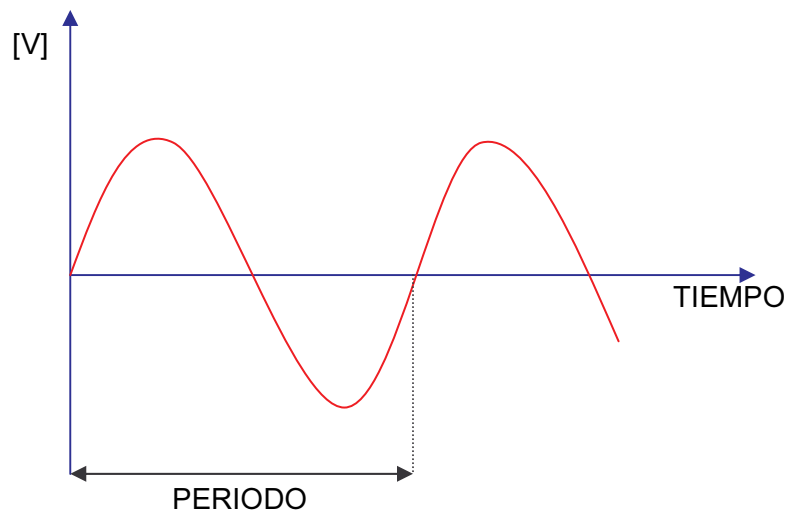


FIGURA 1.1 FUNDAMENTO DE UN GENERADOR DE CORRIENTE ALTERNA.

Obteniéndose una forma de onda siguiente:



Con un giro uniforme de la espira en un campo magnético (homogéneo) aparece en ella una tensión en forma senoidal inducida, como se puede observar en la figura anterior.

En el giro uniforme de la espira, esta tensión inducida no sólo modifica su dirección sino también su magnitud. Con el movimiento giratorio se altera el flujo magnético que pasa por la espira.

Una oscilación completa se denomina periodo (T). La duración del periodo se mide en segundos.

El número de periodos por segundo se denomina frecuencia f. La unidad de frecuencia es el Hertz (símbolo Hz).

La frecuencia es tanto mayor, cuanto menor es la duración del periodo. La frecuencia es la inversa de la duración del periodo.

$$f = \frac{1}{T}$$

1.3.2 FUNDAMENTOS DE CORRIENTE CONTINUA.

El generador de corriente continua, o dínamo, es una máquina eléctrica que permite obtener en sus terminales una corriente que tiende a tener un valor constante.

En la figura 1.2 se muestra el esquema de un generador de corriente continua.

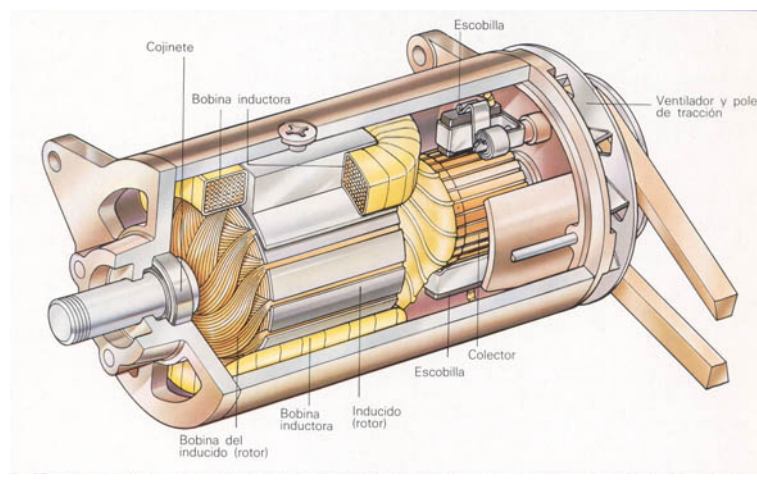
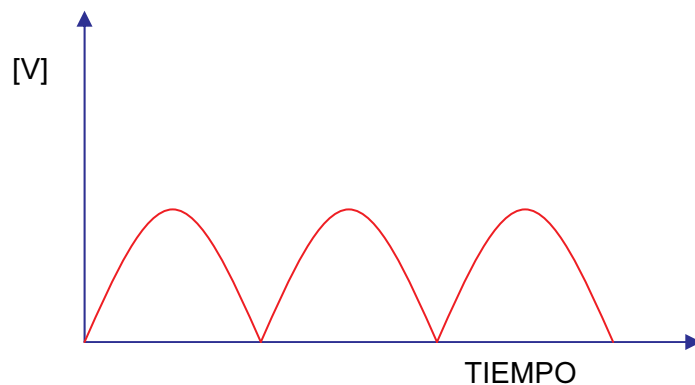


FIGURA 1.2 VISTA DE UN GENERADOR DE CORRIENTE CONTINUA.

Como se puede observar, una modificación en los anillos y escobillas del alternador de la figura 1.1 nos permite obtener un generador de corriente continua. El cambio consiste en eliminar uno de los dos anillos y seccionar en dos partes iguales el restante, cada sección debe hacer contacto con una escobilla.

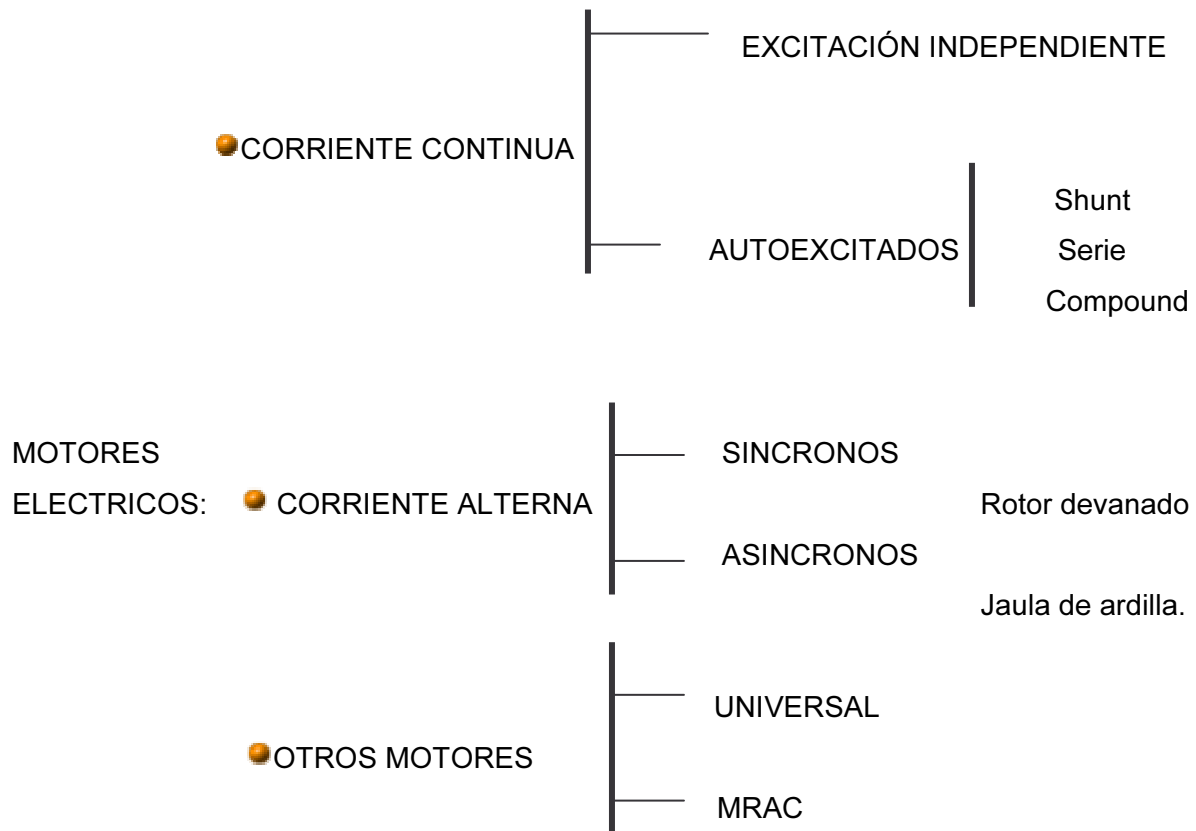
De esta forma se evitan los semiciclos negativos obtenidos en el alternador y la fuerza electromotriz inducida será de corriente continua como se puede observar en la siguiente figura.



En base a estas dos principales fuentes de alimentación podremos dar una clasificación de los motores eléctricos, esto con el fin de poder ubicar a los *MRAC* dentro de las máquinas eléctricas.

1.4 CLASIFICACIÓN DE LOS MOTORES ELÉCTRICOS

La clasificación de los motores eléctricos por tipo, se plasma en el siguiente cuadro (en forma representativa en sus categorías), este se ha efectuado de acuerdo con el criterio clásico, aunque externo al motor; que es la clase de tensión o corriente principal que le alimenta.



La diversidad de tipos de motores eléctricos que se hace patente en el cuadro anterior, está justificada principalmente en función de tres condiciones: el desarrollo histórico de la ciencia y la tecnología de la eléctrica-electrónica, razones económicas y finalmente la diversidad de las exigencias requeridas a los motores eléctricos, tanto a nivel de potencia como a la diferente complejidad de las aplicaciones

Los motores eléctricos son máquinas utilizadas en transformar energía eléctrica en mecánica. Son los motores utilizados en la industria, pues combinan las ventajas del uso de la energía eléctrica (bajo, costo, facilidad de transporte, limpieza y simplicidad de la puesta en marcha, etc) con una construcción relativamente simple, costo reducido y buena adaptación a los mas diversos tipos de carga.

De acuerdo a la fuente de tensión que alimente al motor, podemos realizar la siguiente clasificación:

- Motores de corriente directa (DC)
- Motores de corriente alterna (AC)
- Otros motores

A continuación se menciona en forma breve el principio de funcionamiento de cada una de las categorías descritas con anterioridad.

Motores de Corriente Directa (DC)

Se utilizan en casos en los que es de importancia el poder regular continuamente la velocidad del eje y en aquellos casos en los que se necesita de un toque de arranque elevado.

Además, utilizan en aquellos casos en los que es imprescindible utilizar corriente continua, como es el caso de trenes y automóviles eléctricos, motores para utilizar en el arranque y en los controles de automóviles, motores accionados a pilas o baterías, etc.

Para funcionar, el motor de corriente continua o directa precisa de dos circuitos eléctricos distintos: el circuito de campo magnético y el circuito de la armadura.

El campo (básicamente un imán o un electroimán) permite la transformación de energía eléctrica recibida por la armadura en energía mecánica entregada a través del eje. La energía eléctrica que recibe el campo se controla en su mayoría en la resistencia externa con la cual se regula la corriente del campo magnético. Es decir ninguna parte de la energía eléctrica recibida por el circuito del campo, es transformada en energía mecánica.



FIGURA 1.3 VISTA DE UN PEQUEÑO MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA.

La armadura consiste en un grupo de bobinados alojados en el rotor y en un ingenioso dispositivo denominado colector mediante el cual se recibe corriente continua desde una

fuerza exterior y se convierte la correspondiente energía eléctrica en energía mecánica que se entrega a través del eje del motor.

Motores de Corriente Alterna (AC)

Bajo el título de motores de corriente alterna podemos reunir a los siguientes tipos de motor.

- Motor Síncrono
- El Motor Asíncrono o de Inducción

El Motor Síncrono

Este motor tiene la característica de que su velocidad de giro es directamente proporcional a la frecuencia de la red de corriente alterna que lo alimenta. Por ejemplo si la fuente es de 60Hz, si el motor es de dos polos, gira a 3600 RPM; si es de cuatro polos gira a 1800 RPM y así sucesivamente. Este motor o gira a la velocidad constante dada por la fuente o, si la carga es excesiva, se detiene.

El motor síncrono es utilizado en aquellos casos en que los que se desea velocidad constante. En nuestro medio sus aplicaciones son variadas y casi siempre están en relación con sistemas de regulación y control mas no con la transmisión de potencias elevadas.

A pesar de su uso reducido como motor, la maquina síncronica es la mas utilizada en la generación de energía eléctrica. Por ejemplo, en México, todas las centrales hidroeléctricas y termoeléctricas generan energía eléctrica con generadores síncronos.



FIGURA 1.4 VISTA DE UN MOTOR SINCRONO.

El Motor Asíncrono o de Inducción

Si se realizara a nivel industrial una encuesta de consumo de la energía eléctrica utilizada en alimentar motores, se vería que casi la totalidad del consumo estaría dedicado a los motores asíncronos.

Estos motores tienen la peculiaridad de que no precisan de un campo magnético alimentado con corriente continua como en los casos del motor de corriente directa o del motor síncrono.

Una fuente de corriente alterna (trifásica o monofásica) alimenta a un estator. La corriente en las bobinas del estator induce corriente alterna en el circuito eléctrico del rotor (de manera algo similar a un transformador) y el rotor es obligado a girar.

De acuerdo a la forma de construcción del rotor, los motores asíncronos se clasifican en:

Motor Asíncrono de Rotor Bobinado

Motor Asíncrono tipo Jaula de Ardilla

Motor Asíncrono de Rotor Bobinado

Se utiliza en aquellos casos en los que la transmisión de potencia es demasiado elevada (a partir de 200 kW) y es necesario reducir las corrientes de arranque. También se utiliza en aquellos casos en los que se desea regular la velocidad del eje.

Su característica principal es que el rotor se aloja un conjunto de bobinas que además se pueden conectar al exterior a través de anillos rozantes. Colocando resistencias variables en serie a los bobinados del rotor se consigue suavizar las corrientes de arranque. De la misma manera, gracias a un conjunto de resistencias conectadas a los bobinados del rotor, se consigue regular la velocidad del eje.

Motor Asíncrono tipo Jaula de Ardilla

Finalmente aquí llegamos al motor eléctrico por excelencia. Es el motor relativamente más barato, eficiente, compacto y de fácil construcción y mantenimiento.



FIGURA 1.5 VISTA DE UN MOTOR TIPO JAULA DE ARDILLA

Siempre que sea necesario utilizar un motor eléctrico, se debe procurar seleccionar un motor asíncrono tipo jaula de ardilla y si es trifásico mejor.

Por otro lado, la única razón para utilizar un motor monofásico tipo jaula de ardilla en lugar de uno trifásico será porque la fuente de tensión a utilizar sea también monofásica. Esto sucede en aplicaciones de baja potencia. Es poco común encontrar motores monofásicos de más de 3 [kW].

La diferencia con el motor de rotor bobinado consiste en que el rotor está formado por un grupo de barras de aluminio o de cobre en formas similares al de una jaula de ardilla.

Otros Motores

Hemos mencionado los motores eléctricos de mayor uso en nuestro medio. Existen otros que son utilizados en casos especializados o domésticos. Entre ellos conviene destacar los siguientes:

El motor universal

El MRAC

Motor universal

Tiene la forma de un motor de corriente continua en conexión serie. La principal diferencia es que es diseñado para funcionar con corriente alterna. Se utiliza en los taladros, aspiradoras, licuadoras, lustradoras, etc. su eficiencia es baja (de orden del 51%), pero como se utilizan en maquinas de pequeña potencia esta ineficiencia no se considera importante.

Motor de reluctancia accionado por conmutación (MRAC)

Básicamente consiste en un motor con bobinas en el estator que al ser energizadas con corriente continua de acuerdo a una secuencia, origina el avance del eje. Estos motores son hoy en día idealizados para la utilización en sistemas directamente productivos, gracias a los avances que la electrónica de potencia nos brinda hoy en día.

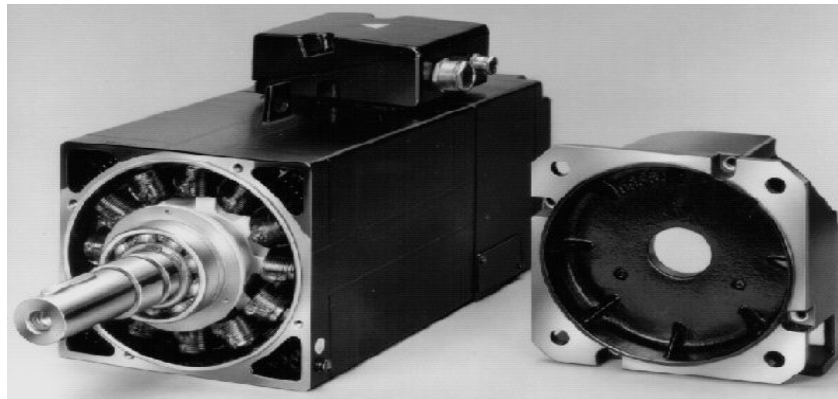


FIGURA 1.6 VISTA DE UN MOTOR DE MRAC.

1.5 USOS DE LOS MOTORES ELÉCTRICOS

El uso de motores eléctricos se lleva a cabo principalmente a nivel industrial, con base en esto, podremos referenciar los datos obtenidos en [18] que nos brinda una información esquemática, como es el caso de aplicación, potencia y tipo de motores que se utiliza para dicha actividad; esto se muestra en tabla 1 que a continuación se presenta.

TABLA No1 USOS DE LOS MOTORES ELÉCTRICOS EN LA INDUSTRIA

	POTENCIA	CORRIENTE CONTINUA			CORRIENTE ALTERNA MONOFASICA	CORRIENTE ALTERNA TRIFASICA			
		SHUNT	SERIE	COMPOUND		TIPO JAULA DE ARDILLA		ROTOR DEVANADO	SÍNCRONO
						NORMAL	OPTIMIZADO		
AGITADORES	5-15 CP	X	--	--	X	X	--	X	--
MOLINOS DE HILOS	10-900 CP	X	--	X	--	--	X	X	X
MEZCLADORES	100-900 CP	--	--	--	--	X	--	--	X
BATIDORAS	100-200 CP	--	--	--	--	--	X	X	X
DESMENUZADORAS	1500 CP	--	--	--	--	--	X	X	X
COMPRESORES	200-600 CP	--	--	X	X	--	X	X	X
BANDAS TRANSPORTADORAS	3-100 CP	X	--	X	X	--	X	X	--
GRUAS Y MONTACARGAS	3-150 CP	X	X	X	--	--	--	--	--
TRITURADORAS	5-300 CP	--	--	X	--	--	--	X	X
EXTRACTORES	3-100 CP	--	--	X	--	--	X	X	--
VENTILADORES	150 CP	X	--	--	X	X	--	--	X
BOMBAS CENTRIFUGAS	1000 CP	X	--	--	X	X	--	--	X

X (valor reportados y utilizado)

--- (valor no reportado)

Son muchos los factores que deben tenerse en cuenta al elegir un motor. La solución por lo general no es única, pudiendo existir diversas opiniones respecto al cual es el motor adecuado. Sin embargo, puede resumirse que el motor apropiado es aquel que se ajusta a los requerimientos técnicos solicitados con un *costo mínimo*. Este último requisito no es factor difícil de calcular. Deben incluirse, no solo el costo de adquisición, sino también los gastos de operación. El costo de adquisición incluye la provisión de cualquiera de los equipos de alimentación y control necesarios para hacer funcionar al motor.

Los gastos de operación incluyen asimismo los gastos por la energía consumida en los circuitos de la máquina y en su control.

Los gastos de instalación también pueden ser decisivos. Por ejemplo: se necesitan cimentaciones especiales para los equipos de motores.

Algunos motores se excluyen de una aplicación determinada debido a que el ambiente de trabajo es hostil, tal como las condiciones de elevada temperatura., elevada velocidad o debido a la presencia de líquidos o ambientes corrosivos.

Por lo que hoy en día existen exigencias mayores para voltear la mirada a diferentes variedades de motores eléctricos, en este caso hablaremos de los *MRAC* que brinda sin duda algunas características especiales e importantes que como se comentará más adelante deben ser tomadas en cuenta para que en un futuro puedan ser implementados.

CAPITULO 2

LOS MRAC (PROPIEDADES)

En este capítulo se hace referencia de las propiedades que el MRAC presenta. En la primera sección se lleva a cabo una revisión de la forma de operación y características que este tipo de motor nos brinda, además de mostrar las partes constitutivas del mismo.

En la siguiente sección se muestra una revisión de estudios de simulación de los MRAC que se han realizado en diversos centros de investigación, este punto brindará la idea de el desarrollo que este tipo de máquinas han venido desarrollando desde hace tiempo.

2.1 PRINCIPIO DE OPERACIÓN DE LOS MRAC.

Los motores de Reluctancia Accionados por Conmutación MRAC ó SRM (siglas a partir de su nombre en inglés *Switched Reluctante Motor*) son una división de máquinas eléctricas que hoy en día han crecido de popularidad a su tipo de funcionamiento, para poder identificar con mayor precisión la forma en que estos motores realizan la conversión de la energía eléctrica en energía mecánica, es a partir de la clasificación siguiente.

- Máquinas que transforman la energía electromagnéticamente:

En esta categoría, el movimiento de la máquina se produce debido a la interacción de 2 campos magnéticos, uno de ellos es generado en el estator y el otro en el rotor. Cuando estos 2 campos magnéticos están acoplados mutuamente, existe un par electromagnético entre ambos, el cual tiende a llevarlos a alinearse.

En esta clasificación de máquinas, se requiere de devanados en el rotor y en el estator y además que sean excitados simultáneamente; como ejemplo de estos motores encontramos: los motores de inducción, síncronos y de C.D.

Estos motores difieren entre sí en su geometría y en como son generados los campos magnéticos actuantes, es decir, si son utilizados imanes permanentes o corrientes inducidas.

- Máquinas que transforman la energía por reluctancia variable.

Esta conversión de energía es el resultado de la reluctancia variable en el entrehierro del rotor y el estator.

Cuando un devanado del estator es energizado se produce un par reluctivo, debido a la tendencia para que el rotor se mueva de posición, de tal manera que se produzca una mínima reluctancia, en el campo magnético generado en el estator.

Esta forma de producción de energía mecánica, es análoga al par de alineamiento que se observa en dos imanes polarizados opuestamente.

El MRAC esta dentro de esta categoría de máquinas eléctricas.

Observando la clasificación anterior, el MRAC, la operación básica de funcionamiento se fundamenta en la *reluctancia*. El concepto *reluctancia* corresponde con la resistencia de flujo de campo magnético, la cual opone dicho rotor al campo electromagnético. La *reluctancia* en un circuito magnético es un equivalente a la resistencia en un circuito eléctrico.

Los MRAC, no pertenecen a las máquinas síncronas, debido que la dirección y velocidad en el giro del rotor no es igual a la rotación del flujo del estator. Es decir, el rotor gira en

dirección contraria al flujo, esto sucede si el número de polos en el rotor es menor que el número de polos en el estator.

2.2 FUNCIONAMIENTO DE LOS MRAC.

El funcionamiento del motor de reluctancia accionado por conmutación, es muy simple al igual que su estructura, esto se basa en la generación y conmutación de campos magnéticos que se lleva a cabo en los bobinados de los polos del estator que es la parte fija de la máquina.

Si se alimentase una fase del motor con una corriente que produzca un campo magnético, que a su vez, produzca un par que tienda a alinear a los polos del rotor que se encuentren más cercanos, esto con el fin de poder hacer mínima la reluctancia entre ambos, en este caso si una fase se encuentra alineada, por consiguiente la siguiente fase estará desalineada

Si se presenta una excitación en los bobinados del estator secuencial entre fases, en función de la posición del rotor, se generará una producción continua de giro y par.

El sentido de giro, es determinado totalmente en el sentido de la secuencia en que se alimenta a las bobinas del estator.

A continuación se muestra la figura 2.1 que ejemplifica lo descrito anteriormente; en este caso se muestra un MRAC 8ϕ , con una geometría de 16 polos en el estator y 12 polos en el rotor, que muestra claramente el desacoplamiento mencionado y la forma en como se alinearía el rotor en presencia del campo magnético que es conmutado en la parte estática del motor

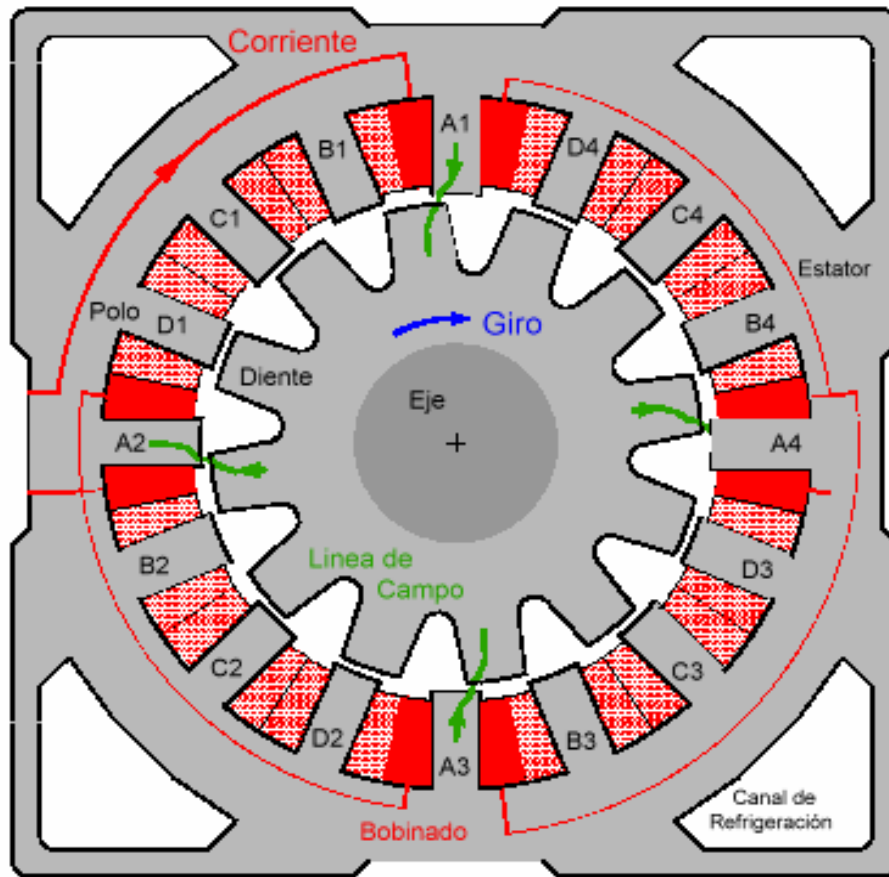


FIGURA 2.1. CORTE TRANSVERSAL DE UN MRAC

Como se mencionó anteriormente, una de las características que son primordiales de este motor, debido a su construcción y diseño, es el desacoplamiento. Cada una de las fases en el estator están desacopladas en forma física, además de eléctrica y magnética.

Estas propiedades que presenta ofrece indudablemente grandes ventajas, entre las cuales están que este tipo de máquinas puede seguir operando aún si una de sus fases es dañada, esto por supuesto afectará a su desempeño el cual no será el mismo que cuando la máquina trabajará con sus fases completas y normales, lo cual nos indica que este tipo de máquinas son muy confiables y seguras.

Un punto importante para su funcionamiento es el tipo de fuente de alimentación eléctrica para estos motores, con características muy especiales, con un principio de operación basada en la conmutación de energía eléctrica obtenida de la red de distribución.

2.3 CARACTERÍSTICAS DE LOS MRAC.

En esta sección se muestran las más importantes características que los MRAC presentan en sus diversas etapas de análisis, diseño, construcción, operación y control; tal es el caso de las curvas par-velocidad que nos brindan una visión general de la forma en como esta división de máquinas eléctricas pueden ser operadas; además de la geometría que estos motores presentan, este punto es primordial para la construcción y lógicamente el diseño de los mismos el cual dependerá fuertemente para un buen desempeño. Finalmente se presenta el concepto de la fuente de alimentación que acompaña a los MRAC, que es una pieza fundamental tanto para su diseño, operación. y control de los mismos.

2.3.1 CARACTERÍSTICAS PAR-VELOCIDAD.

La operación par-velocidad es un punto primordial de los MRAC, debido a que esta curva nos presenta una idea primordial de la forma en como trabaja este tipo de motores; esta información esta basada en el artículo [1] y la figura 2.2 representa esta característica.

Esta información esta basada en experiencias previas, las cuales conllevan a una serie de curvas o familias de curvas que se construyen en base a esta experiencia.

Como se menciona en este artículo la curva final obtenida se puede dividir en tres zonas la cuales serán explicadas posteriormente. Dentro de este artículo se menciona lo siguiente “El MRAC puede ser solicitado en principio con pares de cargas de dos o tres veces superiores al par de carga nominal, en regímenes transitorios para todo el intervalo de velocidades”.

Con base en lo anterior podremos mas adelante obtener la curva del MRAC que nosotros proponemos en la simulación.

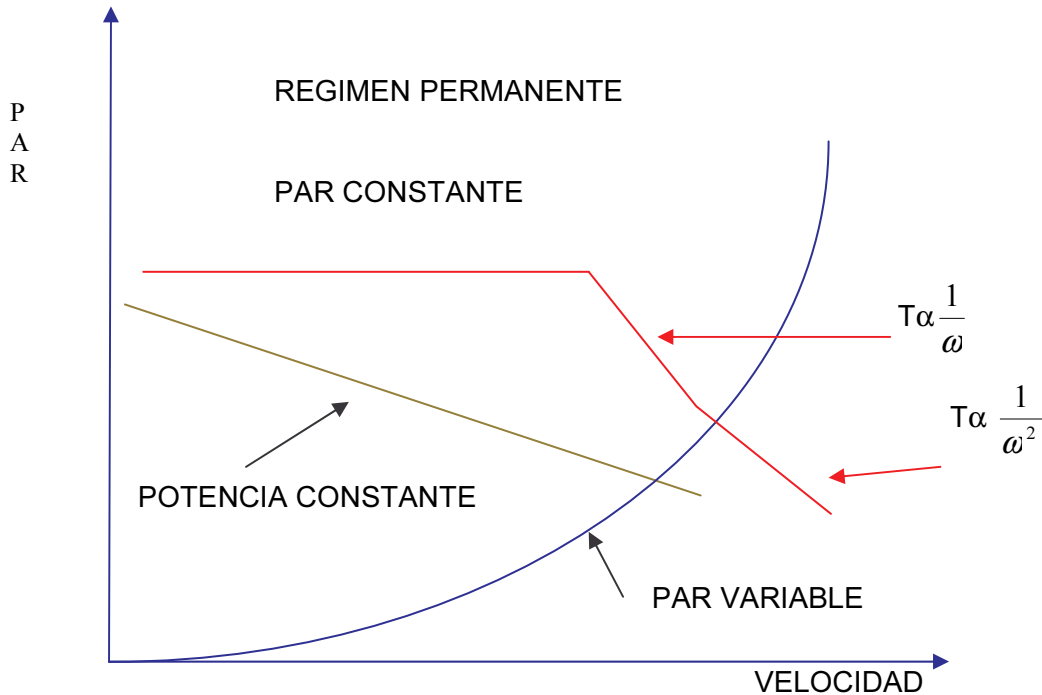


FIGURA 2.2 CURVA PAR-VELOCIDAD DEL MRAC.

2.3.2 FUENTE CONMUTADA DE ALIMENTACIÓN

La necesidad de un conmutador electrónico para llevar a cabo la alimentación de cada una de las fases también puede considerarse como una propiedad física de la máquina.

Esta necesidad es una derivación de la construcción misma de la máquina, que debido a su desacoplamiento de cada una de las fases debe ser alimentada en forma individual, no por tensiones de CD ni CA, si no por una tensión que debe ser conmutada y que depende totalmente de la posición del rotor.

El diseño del conmutador electrónico como se menciona anteriormente es una pieza fundamental para el control del MRAC ya que gran parte del buen desempeño que tenga el motor será debido a la forma en como trabaje el conmutador.

Para poder generar las señales conmutadas de estos motores es muy importante obtener la información de la posición que tiene el rotor, lo cual se puede lograr en forma física con

la implementación de un sensor de posición o en su defecto optar por una técnica de estimación del mismo como se muestra en diversos estudios [17] que su principal objetivo es de conocer el valor de posición del rotor sin necesidad de contar con algún dispositivo físico que realice esta tarea.

En la literatura científica que se revisó para este documento, hemos observado una división de trabajos que se enfocan a la conmutación en los MRAC [5], y que cada uno de ellos proponen una estrategia propia para poder resolver ese problema.

En la figura 2.3 se puede apreciar uno de los esquemas electrónicos que más comúnmente son utilizados para la conmutación, en este caso se muestra una fuente conmuta para un MRAC trifásico (6 polos en el estator), como se podrá observar solo se presenta la idea principal del funcionamiento que este dispositivo tiene por fin.

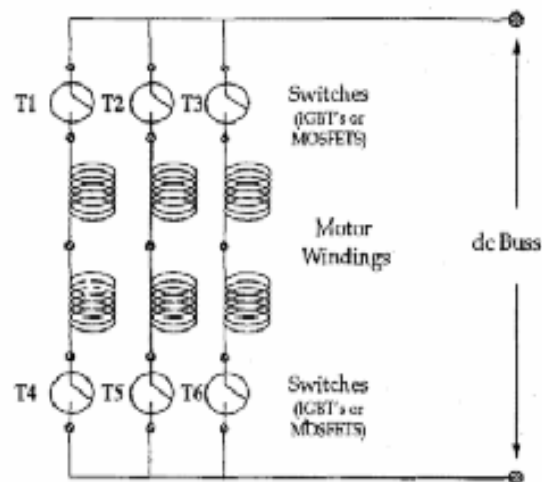


FIGURA 2.3 CONMUTADOR ELECTRÓNICO PARA UN MRAC 3ϕ

Si se observa el circuito, se puede observar que los interruptores se deben abrir y cerrar con el fin de poder obtener las curvas deseadas de corrientes del estator.

La secuencia de disparo de los interruptores es determinada propiamente por una ley de conmutación, en la revisión bibliográfica antes mencionada, se reportan estudios

detallados que han abierto un camino para el desarrollo de este tipo de componentes y leyes de conmutación.

Cabe destacar que el diseño de la fuente de conmutación es propia para cada uno de los MRAC, esto debido a que existe una gama muy amplia en geometrías de construcción de estos motores.

2.3.3 GEOMETRÍA DE LOS MRAC.

Los MRAC, son diseñados de distintas formas, en la figura 2.4 se muestra la configuración de diferentes tipos y diseños.

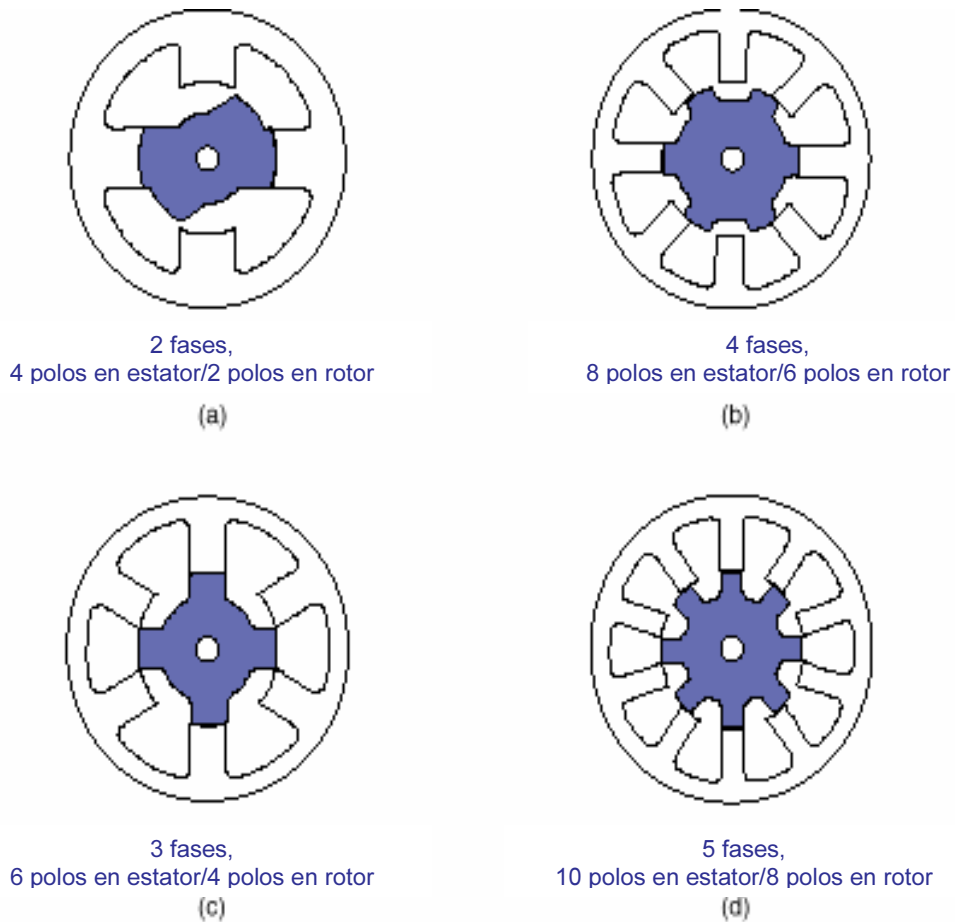


FIGURA 3.4 GEOMETRIA DE LOS MRAC

Como se muestra en la figura 2.4, se observan motores de 2 a 5 fases, los cuales son diseños que investigadores realizan para poder saber cual de todos ellos es el más óptimo dependiendo de sus características propias.

Como se puede observar claramente, los polos del rotor no deben ser estrictamente la mitad de los polos del estator, lo cual nos brinda una posibilidad muy amplia de diseños.

Cabe destacar que los materiales con que se construye los MRAC son una parte sumamente importante para el buen desarrollo tecnológico de estos motores.

2.4 SECCION ESTRUCTURAL DE LOS MRAC.

Este punto es tratado y comentado en base a los estudios realizados por la compañía EMERSON MOTORS la cual en base a la experiencia en investigación ha logrado desarrollar un conjunto de recomendaciones que debemos tomar en cuenta. Estas recomendaciones están tomadas en base al artículo [1] el cual menciona a detalle lo que se escribe a continuación.

2.4.1 DEVANADOS DEL ESTATOR

El desarrollo llevado a cabo por EMERSON en base al desarrollo de fabricación de devanados para el estator de los MRAC, han conducido a concluir que estos devanados no requieren de alguna forma especial de manufactura.

En la figura 2.5 se puede observar la forma en como se encuentra los devanados de los motores.

Esta empresa reporta que como los devanados se fabrican con técnicas comunes, es posible fabricarlos muy fácilmente; un punto muy importante en los resultados reportados, conducen a un logro más para el desarrollo de los MRAC, es que como los devanados del estator, están montados sobre el polo saliente del estator, es fácilmente intercambiable, en caso de un daño del devanado. Solo habría que desmontarlo e intercambiarlo por un devanado similar de las mismas características y el problema estará solucionado.

La empresa EMERSON reporta en su estudio que ha logrado el desarrollo de montaje de devanados del estator en un 85 % en base a una técnica que ellos denominan como inserción de espiras, el cual recomiendan como el método más óptimo.

Como se comento anteriormente, los MRAC no necesitan de materiales de especial manufactura para su construcción, pero la empresa EMERSON, esta desarrollando una división de construcción de MRAC con materiales magnéticos de mayor calidad que lógicamente hace aumentar el costo del motor, esta posibilidad esta en desarrollo para poder mejorar la eficiencia del motor, que es una posibilidad que se encuentra en estudio.



FIGURA 2.5 DEVANADOS DE LOS MRAC.

2.4.2 LAMINACION DEL ROTOR.

Para la construcción del rotor del MRAC, es lógico pensar que debe ser laminado para evitar las pérdidas por el efecto de las corrientes parásitas.

La empresa EMERSON realiza la fabricación de rotores de los MRAC, en base a técnicas de laminación semejantes a las utilizadas en los transformadores eléctricos.

Estas técnicas nos hacen pensar que la fabricación de rotores de estos motores se puede realizar con aparatos ya existentes, no con aparatos especiales, lo cual indica la sencillez de la máquina.

A continuación se muestra la figura 2.6, en la cual se puede observar la forma que tiene el rotor de estos motores.

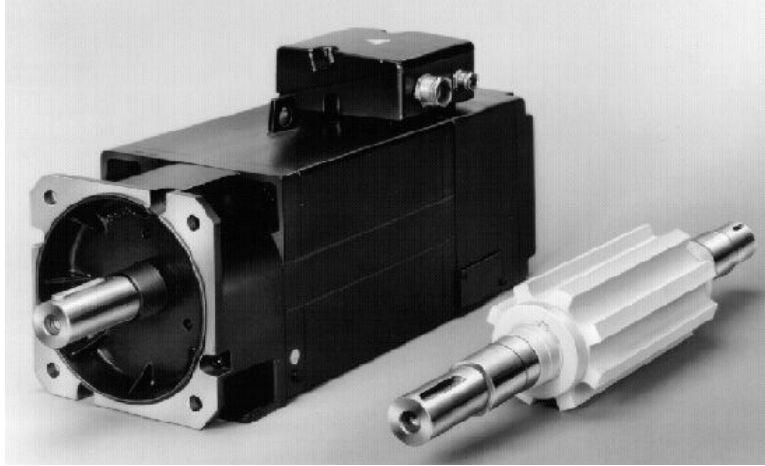


FIGURA 2.6 ROTOR DE UN MRAC.

2.4.3 ENTREHIERRO.

Los motores que se encuentran en diseño y prototipos de EMERSON, en el área de los MRAC, nos pueden reportar que durante la fabricación se presta un principal cuidado sobre las medidas de las piezas que conforman el motor, esto da pie para la medida del entrehierro formado entre los polos del rotor y el estator, es importante que se realicen con medidas que representen la menor varianza posible.

En los reportes obtenidos por EMERSON, menciona que el valor típico del entrehierro desarrollado para sus motores no debe exceder el 25% del valor nominal, dado que si esto sucediera existiría un desbalanceo físico severo que mas adelante comentaremos.

EMERSON recomienda que los valores óptimos de varianza del entrehierro sea de .004 a .008, con lo cual ellos han recomendado que el valor de .005 en su varianza para un buen desempeño del motor y así poder evitar un desbalanceo físico que a continuación comentaremos.

2.4.4 BALANCEO DEL ROTOR.

Como sabemos los devanados del estator tienen suministro eléctrico y magnético, la principal causa de desbalanceo en los motores eléctricos es la no uniformidad de distribución del rotor.

Además los cojinetes y soportes contribuyen al desbalanceo y por consecuencia a la vibración.

En la práctica el costo de balancear usualmente es bajo, pero como siempre corremos el riesgo de introducir desbalanceos por los apoyos del rotor, que pueden ser fabricados con especial cuidado y el costo no es muy elevado.

EMERSON ha estudiado a los MRAC en su comportamiento, en pruebas de laboratorio y una de las principales conclusiones que reportan, es mencionar que para motores menores de 10,000 r.p.m el efecto de desbalanceo no es muy crítico y por ello para este tipo de motores es raro que existan problemas por este motivo.

Para motores de mayor velocidad, tendríamos que analizar más detenidamente las condiciones de operación del mismo y poner mayor énfasis a las piezas que involucra el balanceo del motor.

Sobre este tema se realizan estudios sobre el ruido que los MRAC desarrollan; una muestra firme de lo comentado, está mostrado en el siguiente programa que en su versión demo (figura 2.7 y 2.8), muestra el desarrollo de un programa que simula el ruido producido por el motor a distintas velocidades, posteriormente se muestra el diagrama utilizado para este fin.

Como se podrá observar más adelante, la forma del modelo es muy similar al desarrollado para la simulación de este trabajo.

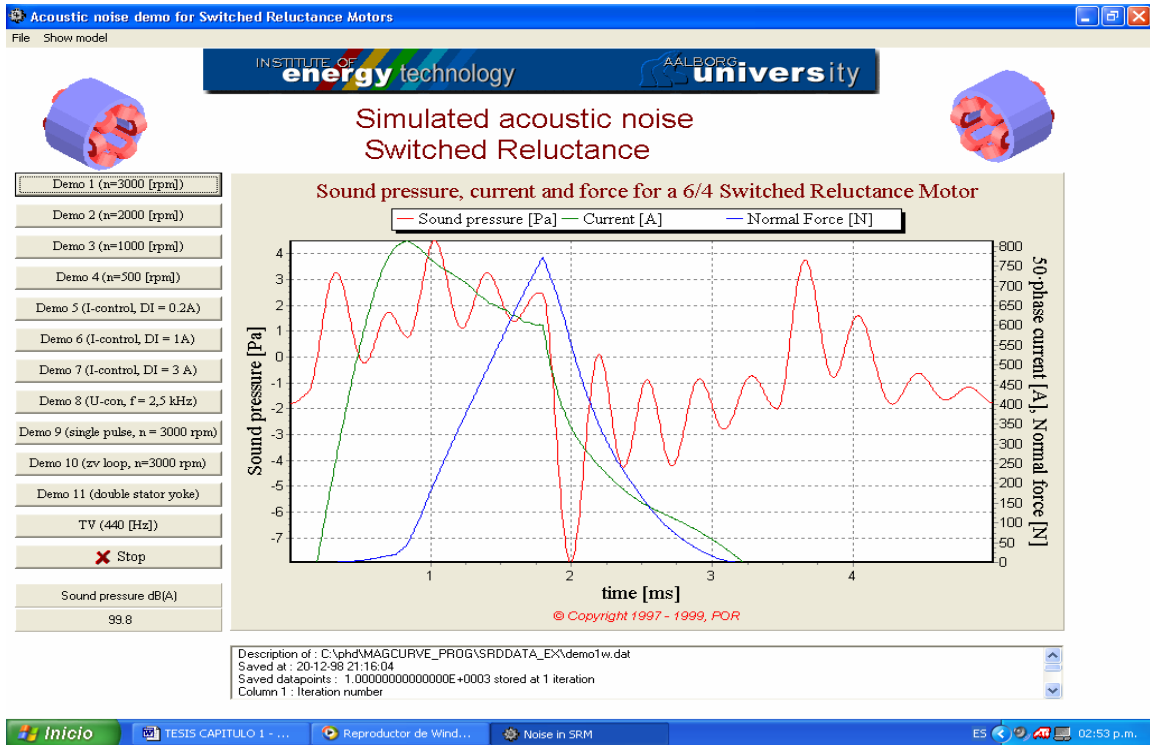


FIGURA 2.7 PROGRAMA DEMO DE ESTUDIO DE RUIDO EN LOS MRAC

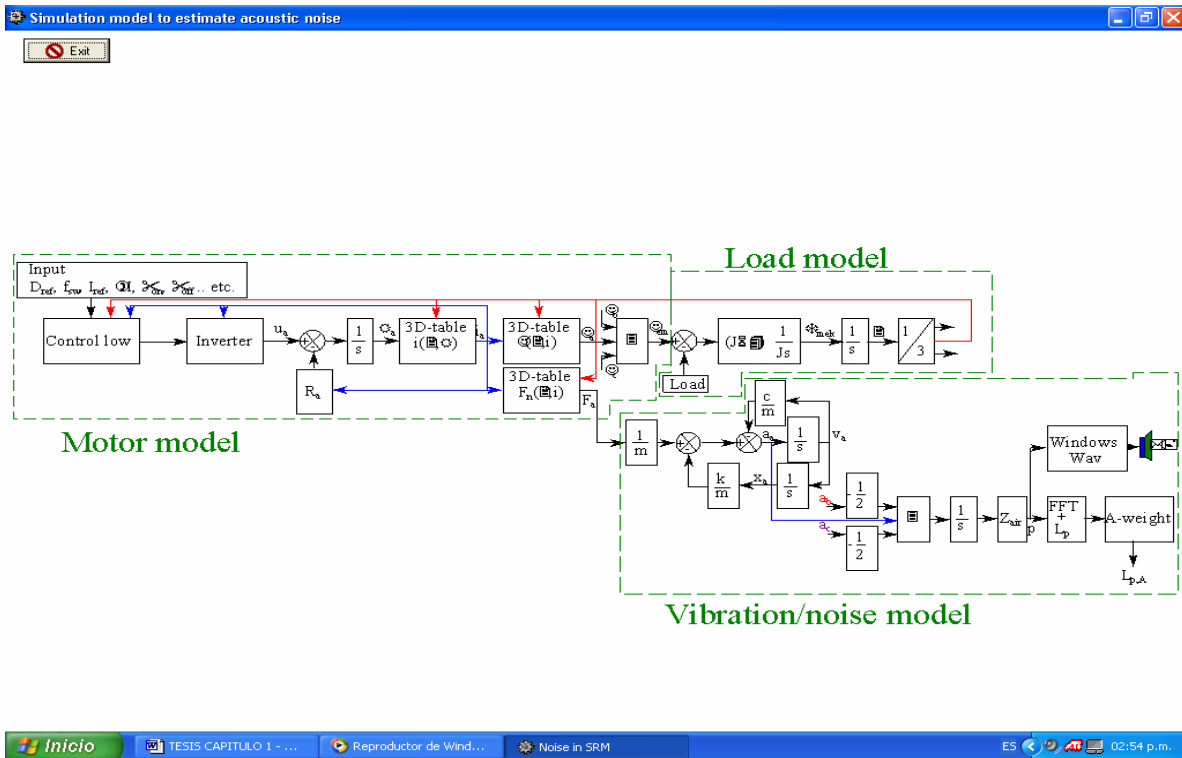


FIGURA 2.8 MODELO UTILIZADO PARA EL ESTUDIO DE RUIDO EN LOS MRAC.

Con toda esta información, podemos comentar los distintos avances que los MRAC han tenido hasta la fecha.

2.5 CONTROL EN LOS MRAC

En una revisión de la literatura utilizada para este trabajo, podemos concluir, que la limitación más común proviene de una de las características más importantes de esta máquina: la no linealidad que presenta el entrehierro en el flujo magnético que lo atraviesa, además esto aunado a que la conmutación debe ser llevada a cabo en base a la medición de la posición del rotor, hace esta tarea aun más compleja.

La mayoría de los resultados que se reportan consideran una relación lineal entre los enlaces de flujo y las corrientes de los devanados del estator en el circuito magnético, lo cual permite diseñar un modelo de control sencillo, que a postre se ha validado como un modelo confiable.

En el mismo sentido, el controlador debe diseñarse tomando en cuenta la estrategia o forma en que se realizará la conmutación, dado que el motor debe ser eléctricamente conmutado para una corriente de operación, el cual gobierna el tipo de conmutación.

Para el diseño de los controles de los MRAC, generalmente se supone una serie de factores que son:

- Las únicas variables que se encuentran disponibles par poder hacer mediciones son las corrientes del estator, la posición del rotor y la velocidad propia del motor.
- El momento de inercia es conocido
- Los parámetros del motor son completamente conocidos (resistencia, inductancia, etc.)
- Las únicas entradas de control son las tensiones conmutados que alimentan el estator.

Bajo estos parámetros se basan los grupos de trabajo para poder obtener el controlador adecuado para el MRAC.

2.6 ¿QUE OFRECEN LOS MRAC?

Los MRAC son una tecnología que tiene amplias expectativas en el área de motores eléctricos de innovación; sin duda tienen muchas características que lo hacen atractivo para poderse involucrar en distintas divisiones de estudio que actualmente son explorados por variados grupos de investigación alrededor del mundo y en especial a importantes empresas dedicadas a la comercializar motores eléctricos por varias décadas.

Para situar las características atractivas de estos motores a continuación se muestran las más importantes ventajas y algunas desventajas que los MRAC presentan.

2.6.1 VENTAJAS

La construcción de los MRAC, es una de las más sencillas. Únicamente el estator contiene devanados, los cuales son montados sobre los polos de cada fase, de tal manera que al ser conmutados, se formen polos apuestos.

El rotor no contiene ningún devanado, ni imán permanente. Este solo consiste en una masa metálica laminada montada sobre un soporte. Lo mencionado anteriormente, sobre la simplicidad en la construcción de la máquina nos lleva a observar que el costo disminuye fuertemente, como se muestra en la FIGURA 2.9.

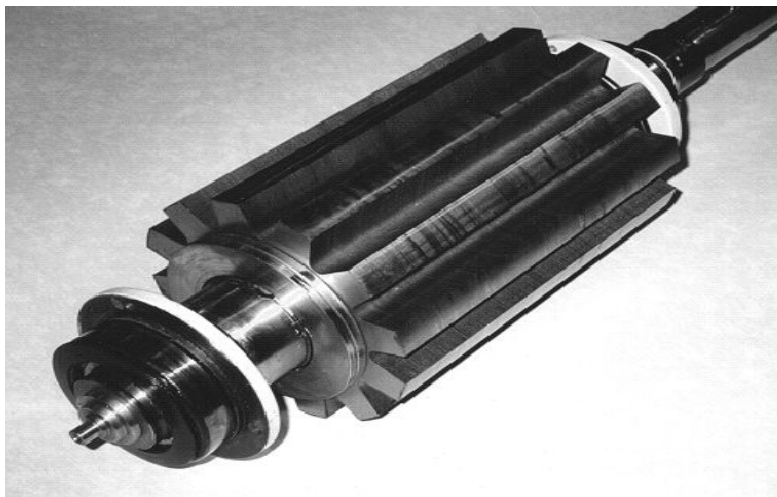


FIGURA 2.9 POLOS DEL ROTOR DE UN MRAC.

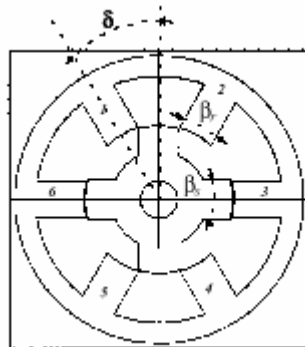
Son máquinas muy confiables dado que cada fase de la máquina es independiente tanto en forma física, eléctrica y magnética, entre fases, que hace que si una fase llegase a fallar, esto no impediría que la máquina siguiera trabajando, lo cual nos indica que esta máquina es muy confiables en cuanto a su operación y funcionamiento.

Además a la inexistencia de conductores en el rotor, este tipo de máquinas puede alcanzar velocidades considerablemente altas, aunado al tipo de conversión de energía, se puede observar que el MRAC puede generar altas potencias, comparadas con motores de las mismas dimensiones.

Otra ventaja gracias a su estructura simple, es la de poder operar continuamente en condiciones extremas, en donde la temperatura, humedad y otros agentes naturales son limitantes para la utilización de motores eléctricos.

Otra ventaja muy notoria es que el MRAC posee un momento de inercia muy pequeño, debido a la ausencia de masa en los huecos entre los dientes del motor. El rotor está compuesto únicamente por el eje en forma dentada, en base a estudios previos que investigadores realizan sobre el tema se puede observar claramente que el MRAC aventaja claramente a los motores eléctricos convencionales al punto de minimizar el momento de inercia del motor al 60% con respecto con otros motores de las mismas dimensiones.

En la figura 2.10 se muestra la figura de un MRAC 3 ϕ , donde posee 6 polos en el estator y 4 polos en el rotor, que es la geometría que mayor gente en el área de estudio de estos motores recomiendan.



2.10. ESTRUCTURA DE UN MRAC CON 6 POLOS EN EL ESTATOR Y 4 POLOS EN EL ROTOR.

2.6.2 DESVENTAJAS.

Algunas limitaciones que produce la simplicidad mecánica de la máquina, se muestran en el análisis y el control propio de estas máquinas.

Una desventaja que se presenta en los MRAC es el hecho que para poderlos implementar en el campo productivo, no se puede alimentar directamente desde una línea de CD ni una línea de AC, debido a que debe de ser conmutado electrónicamente.

Este problema ha sido solucionado parcialmente gracias al avance en la electrónica de potencia, la cual nos brinda la posibilidad de poder controlar grandes cantidades de potencia a costos cada vez más económicos.

Otra desventaja que presenta es la que el estator y el rotor son de polos salientes, para la realización del par reluctivo, hace que esta máquina tenga características magnéticas sean fuertemente no lineales.

2.7 AVANCES TECNOLOGICOS EN LOS MRAC

Podremos mencionar que los MRAC se encuentra hoy en día en un proceso de estudio e investigación, este tipo de motores como hemos mencionado anteriormente, están ganando popularidad, debido a las características físicas propias que el motor presenta, además de poder contar hoy en día con avances en el área de la electrónica de potencia.

Esto hace a los MRAC como un fuerte candidato para ocupar un lugar en aplicaciones que así se requieran.

Hoy en día el desarrollo físico de estos motores es muy limitado, en la revisión realizada, podremos encontrar institutos que han desarrollado físicamente este tipo de motores, este es el caso de "The Elektrotechnische Instituto of the University Karlsruhe" en Alemania; que ha desarrollado un prototipo de 18.5kW a 1500 r.p.m, y es importante destacar que el modelo desarrollado es un prototipo que se encuentra actualmente en estudio; además "Institute of Energy Tecnology of The Aalborg University" en Dinamarca, tiene una división de estudios sobre MRAC con un prototipo de 550W y 2500 r.p.m.

Esta es una pequeña muestra podemos observar los grandes avances que estos motores se tienen desarrollados en forma física, es importante mencionar que existen un variado numero de personas que hoy en día están trabajando sobre investigación en esta área.

Sobre el área de controladores de los MRAC podemos encontrar a una empresa líder de componentes electrónicos como es el caso de TEXAS INSTRUMENTS, la cual ha realizado una gran serie de investigaciones hasta llegar a mostrar un circuito integrado que sirve para las funciones de control de estos motores, el modelo del circuito es el TMS320F240, cabe destacar que existen un variado grupo de investigación que desarrollan técnicas de control de los MRAC a nivel de investigación, pero nosotros tomamos como base a la empresa TEXAS, por la representatividad que ese microcircuito presenta y con el hecho que se presenta como un circuito existente y comercial.

Sobre la fabricación de los MRAC, existen una variedad de empresas de motores eléctricos que desarrollan estudios sobre estos motores. Como se ha comentado actualmente es difícil poder encontrar un MRAC en forma comercial, ya que solo se presenta como investigación y prototipos; pero hemos encontrado un sistema comercial que contiene un MRAC en su mecanismo, este es el caso de la empresa EMERSON MOTORS que brinda conjuntamente con la empresa de línea blanca MAYTAG, una lavadora de ropa, la cual es accionada por un MRAC, la lavadora se conoce con el modelo de NEPTUNE; actualmente se comercializa en U.S.A. y se espera que a finales de este año se introduzca a México.

Como se ve los MRAC se encuentran ya postrados sobre sistemas productivos, actualmente en aparatos electrodomésticos, pero esto nos hace pensar que en un futuro veremos a este tipo de máquinas eléctricas en sistemas productivos a nivel industrial diversificando así sus usos.

Al estar situados en una etapa de investigación y desarrollo; es evidente que su operación queda descrita y regida por un modelo matemático, que en la mayoría de los trabajos publicados tienen orígenes y características diferentes.

Si bien es cierto que los MRAC muestran muchas ventajas para el uso en muchas áreas; el describir su funcionamiento en operación de una forma clara y sencilla a través de modelos matemáticos, nos permitirá conocer mejor las características de respuesta y comportamiento que los MRAC nos podrá brindar bajo ciertas condiciones existentes.

A partir de lo anterior, el siguiente capítulo muestra las características del modelo general que rige al motor según la mayoría de trabajos reportados en el área.

CAPITULO 3

MODELO MATEMÁTICO DE LOS MRAC.

En este capítulo, se muestra el modelo matemático que gobierna el funcionamiento de los MRAC.

Como se ha comentado anteriormente, los MRAC son una división de máquinas eléctricas que en su construcción física presentan una gran simplicidad y economía, debido a sus propiedades y características que presenta. Esto nos hace pensar que el modelo matemático que rige a este tipo de máquinas es sencillo, por lo contrario, su desarrollo es elaborado y debemos poner especial atención a la obtención del mismo, para tener una visión precisa del funcionamiento que los MRAC nos brindan.

En la primera parte se muestra el modelo matemático general que rigen a los MRAC, y posteriormente mostramos el modelo matemático simplificado utilizado para la simulación; el cual utilizaremos para el desarrollo de la simulación.

3.1 ¿PORQUÉ EL USO DE UN MODELO MATEMÁTICO?

En las ciencias de ingeniería, el propósito de una gran parte de la investigación es comprender las funciones de sistemas útiles para el ser humano. Con este propósito, surgen problemas relacionados con la existencia de técnicas de investigación que resultan inadecuadas por la existencia del sistema o que aún cuando pueden ser usadas su desarrollo es limitado.

También surgen obstáculos cuando existe un insuficiente conocimiento de las técnicas experimentales en uso, o con la inexistencia de ellas.

Por mucho tiempo, los modelos matemáticos fueron ignorados porque no eran visibles y parecían estar remotamente alejados de la realidad. Actualmente, se acepta que las suposiciones y apreciaciones que subyacen en el modelo teórico respecto al sistema eléctrico modelado pueden resultar similares a las que se presentan en otros modelos. Más aún, los modelos teóricos permiten rápidas modificaciones y se pueden evaluar muchas combinaciones de eventos e interrelaciones entre estructuras.

El advenimiento de las computadoras y su vertiginoso desarrollo ha impulsado el modelaje matemático y la simulación computacional (MATLAB-SIMULINK), puesto que prácticamente todo lo que puede ser concebido puede ser modelado, y además en un corto período de tiempo. Por esto, el campo del modelaje y la simulación, es actualmente una parte inseparable y por demás importante, de las ciencias de ingeniería. Sin embargo, el investigador debe tener siempre presente que el modelo matemático, a pesar de ser válido, no es exactamente igual a la realidad y no puede suplantarla.

Los modelos cubren desde conceptos e hipótesis expresados en forma gráfica o descriptiva hasta formulaciones matemáticas complejas del comportamiento dinámico de los sistemas físicos, construcciones físico-analógicas (eléctricas y/o mecánicas) y las simulaciones computacionales. Entre los objetivos de la construcción de modelos de los sistemas eléctricos están:

- Alcanzar una mejor comprensión de dichos sistemas.
- La formulación cuantitativa y cualitativa de los fenómenos y

- La predicción del comportamiento del sistema sobre la base de pocos parámetros.

La adecuada selección de suposiciones simplificadoras representa uno de los puntos más críticos del modelaje y requiere una adecuada comprensión de los fenómenos físicos para poder determinar si dichas suposiciones no distorsionan los resultados del modelaje. Como se dijo antes, la validación (comparación de los resultados obtenidos con un modelo con aquellos obtenidos con el sistema físico real, cuando se someten a las mismas entradas; si el sistema no se ha desarrollado físicamente hasta el momento, la validación se realiza en base a la comparación y discusión de resultados con otros modelos y sistemas similares) constituye la prueba decisiva para decidir sobre lo adecuado o no de un modelo.

3.1.1 REQUISITOS DE UN MODELO MATEMÁTICO

Con estas ideas en mente, un modelo debe cumplir con diversos requisitos. Entre ellos, los siguientes constituyen los más importantes:

1. Debe ser físicamente realizable y se debe construir en términos de parámetros que son significativos y medibles en el sistema físico.
2. Tiene que incluir toda la información disponible que sea pertinente, respecto al sistema físico que va a ser modelado. Aquellas suposiciones que entran en conflicto con los datos existentes deben ser evaluados y justificados con un cuidado especial.
3. Debe ser simple, porque de esa manera es más fácil evaluar tanto su comportamiento como un todo, así como también la influencia de los componentes individuales en la diferencia que se presenta entre las salidas del modelo y del sistema físico general.
4. Es preferible, aunque no siempre posible, construir el modelo de tal forma que permita alteraciones en las suposiciones y parámetros del sistema sin un esfuerzo excesivo. El modelo debe ser más simple de manipular que el mismo sistema físico.

5. Debe servir como una guía para el investigador experimental, sugerir ciertos experimentos y excluir la necesidad de otros.
6. Debería tener poder predictivo, es decir, debe servir como fundamento para extrapolaciones, bien sea dentro del rango de los resultados observados, o también para determinar propiedades más generales del sistema real.
7. Debe ser un sustituto suficientemente válido del sistema real que permita realizar con él experimentos ficticios que se asemejen a experimentos reales; y que incluso permita realizar experimentos irrealizables en el sistema verdadero.

Con lo anterior tenemos todas las bases para poder formar un modelo matemático que describa el funcionamiento de los MRAC.

3.2 MODELO MATEMATICO GENERAL DE LOS MRAC.

El modelo general que describe el funcionamiento de los MRAC, se describe a continuación, este modelo esta basado en estudios previos realizados [5], en donde se determinan los parámetros principales que caracterizan a los MRAC, como se podrá observar, se presenta un estudio detallado de la temática utilizada para obtener las ecuaciones que describen la función y comportamiento de estos motores.

3.2.1 ECUACIONES ELECTROMAGNETICAS:

Aunque el MRAC parece tener una operación simple, requiere un estudio muy formal y completo en el área de modelado matemático.

El voltaje instantáneo de las terminales de los devanados de una fase del MRAC, esta relacionado con el flujo producido en estos, por la ley de Faraday, como se menciona

$$V = iR_m + \frac{d\phi}{dt} \quad (1)$$

En donde V es la terminal de voltaje, i es la corriente de fase, R_m es la resistencia del motor y ϕ es el flujo magnético del devanado.

Pero como la construcción del motor es de polos salientes (tanto el rotor como el estator), además de los efectos de saturación magnética, en general, el flujo magnético en las fases del MRAC varia en función de la posición del rotor (θ), y la corriente del motor de la ecuación 1 es complementada como sigue.

$$V = iR_m + \frac{\partial \phi}{\partial i} \frac{di}{dt} + \frac{\partial \phi}{\partial \theta} \frac{d\theta}{dt} \quad (2)$$

donde $\frac{\partial \phi}{\partial i}$ esta definido como $L(\theta, i)$ la inductancia instantánea, $\frac{\partial \phi}{\partial \theta}$ es $K_b(\theta, i)$ que es la FEM instantánea.

3.2.2 ECUACION GENERAL DE PAR

La ecuación anterior (2) muestra la transferencia de energía eléctrica a campos magnéticos para el MRAC; En este punto desarrollaremos la ecuación que describe la conversión de la energía de los campos en energía mecánica.

Si nosotros multiplicamos cada lado de la ecuación (1) por la corriente eléctrica i , obtenemos la expresión de la potencia instantánea en un MRAC.

$$Vi = i^2 R_m + i \frac{d\phi}{dt} \quad (3)$$

La parte izquierda de la ecuación (3) representa la potencia eléctrica instantánea demandada por el MRAC, El primer termino en la parte derecha de la ecuación (3) representa las perdidas ohmicas en los devanados del MRAC, el siguiente termino representa la suma de la salida de la potencia mecánica del MRAC y toda la potencia es guardada en los campos magnéticos, y se puede representar así:

$$i \frac{d\phi}{dt} = \frac{dW_m}{dt} + \frac{dW_f}{dt} \quad (4)$$

Donde el término $\frac{dW_m}{dt}$ es la potencia mecánica instantánea, y $\frac{dW_f}{dt}$ es la potencia instantánea, que es almacenada en los campos magnéticos. Como potencia es definida como la razón de cambio de la energía en función del tiempo.

Por lo que W_m es la energía mecánica y W_f es la energía de los campos magnéticos.

Conociendo la potencia mecánica, podremos nosotros escribir a esta como el producto de par y velocidad como sigue.

$$\frac{dW_m}{dt} = T\omega = T \frac{d\theta}{dt} \quad (5)$$

donde T , es el par, y $\omega = \frac{d\theta}{dt}$ es la velocidad rotacional del rotor o flecha.

Ahora bien, si sustituimos la ecuación número 5 en la ecuación número 4 se obtiene.

$$i \frac{d\phi}{dt} = T \frac{d\theta}{dt} + \frac{dW_f}{dt} \quad (6)$$

resolviendo la ecuación anterior (6), para obtener la ecuación de la producción de par.

$$T(\theta, \phi) = i(\theta, \phi) \frac{d\phi}{d\theta} - \frac{dW_f(\theta, \phi)}{d\theta} \quad (7)$$

y como el flujo es constante, la ecuación (7) se simplifica.

$$T = - \frac{\partial W_f}{\partial \theta} \quad (8)$$

Como se observa anteriormente, la expresión de par se expresa en función de flujo magnético; pero en ocasiones es deseable que esta expresión sea expresada en función de corrientes en vez de flujos, por ello es común que se exprese en función de co-energía, W_c en vez de energía.

Para poder comprender el concepto de co-energía, hay que analizar la figura 3.1 que representa la energía de campo magnético.

Para un constante ángulo de rotor, tenemos $\frac{d\theta}{dt} = 0$, con esta consideración, integramos la ecuación (6) y nos muestra la energía de los campos magnéticos, como se expresa en la siguiente ecuación.

$$W_f = \int_0^{\phi} i(\theta, \phi) d\phi \quad (9)$$

La interpretación gráfica se muestra a continuación.

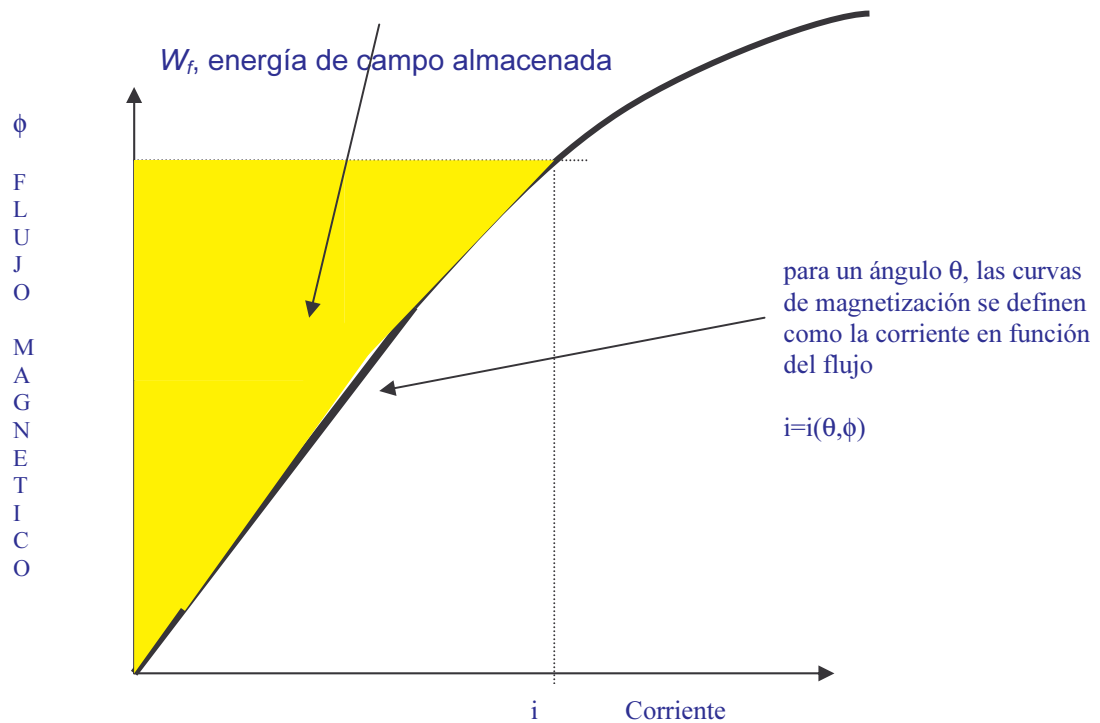


FIGURA 3.1 INTERPRETACIÓN GRAFICA DE LA ENERGÍA DE CAMPO MAGNETICO

Ahora se considera la figura 3.2 tenemos:

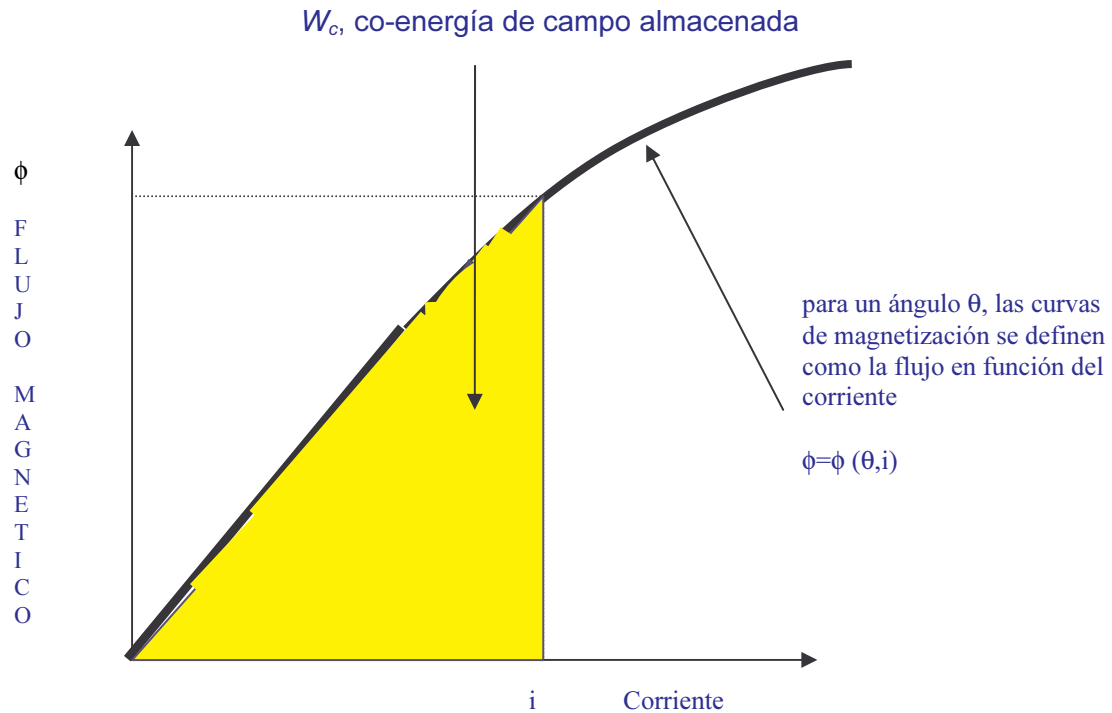


FIGURA 3.2 INTERPRETACIÓN GRAFICA DE LA CO-ENERGÍA DE CAMPO MAGNETICO.

Para un ángulo fijo θ , observamos que la curva de magnetización, el flujo es una función de la corriente, en vez de que la corriente se define como función del flujo. Por lo que con el área bajo la curva se obtiene:

$$W_c = \int_0^i \phi(\theta, i) di \quad (10)$$

Esto se define como la co-energía del campo magnético.

De las figuras 3.1 y 3.2, se puede observar que el área que describe la energía y co-energía de campo, puede bien describirse con la siguiente relación.

$$W_c + W_f = i\phi \quad (11)$$

Si nosotros diferenciamos cada parte de la ecuación anterior podremos obtener.

$$dW_c + dW_f = \phi di + id\phi \quad (12)$$

Si resolvemos la diferencial de energía de campo en la ecuación anterior (12) y se substituye en la ecuación (7) obtendremos:

$$T = \frac{id\phi - (\phi di + id\phi - dW_c(\theta, i))}{d\theta} \quad (13)$$

Para simplificar, la ecuación general de par, ecuación (13), se suele simplificar valuando para corrientes constantes.

Si diferenciamos la ecuación de co-energía se torna en términos de diferenciales parciales como sigue:

$$dW_c(\theta, i) = \frac{\partial W_c}{\partial \theta} d\theta + \frac{\partial W_c}{\partial i} di \quad (14)$$

Con las ecuaciones anteriores (13) y (14), se simplifica fuertemente si se considera la corriente constante.

$$T = \frac{\partial W_c}{\partial \theta}, \text{ es si } i \text{ es constante} \quad (15)$$

3.2.3.- SIMPLIFICACION DE LA ECUACION DE PAR.

Como se puede observar anteriormente, en el desarrollo matemático se obtiene el modelo que rige al par que produce el MRAC, pero cabe resaltar que para poder hacer esta relación más sencilla podemos proponer:

La relación entre el flujo y la corriente esta dado por:

$$\phi = L(\theta) \cdot i \quad (16)$$

Como la inductancia del motor solo varia en función del ángulo del rotor. Se puede sustituir la ecuación anterior en la ecuación (10), con esto y evaluando la integral se obtiene:

$$W_c = \frac{i^2}{2} L(\theta) \quad (17)$$

Esta ecuación se puede sustituir en la ecuación (15) con lo que obtendremos una ecuación simplificada y sencilla que nos brinda el par del MRAC.

$$T = \frac{i^2 dL}{2d\theta} \quad (18)$$

3.3 MODELO UTILIZADO PARA LA SIMULACIÓN

El modelo que a continuación se muestra, esta basado en estudios realizados en [9], que se basan en hacer un estudio de los parámetros del MRAC en forma lineal; la principal característica que se presenta es hacer un análisis tomado en cuenta que los flujos magnéticos que se presentan en el entrehierro se realizan en forma lineal, no existen variaciones importantes durante el funcionamiento del motor.

3.3.1 MODELO SIMPLIFICADO DEL MRAC.

El estudio que se realizó en [9] se obtienen los parámetros necesarios que se utilizarán más adelante para la simulación.

Basándonos en la figura 3.3, que nos muestra la forma de la inductancia de cada una de las fases del MRAC, donde podremos determinar los siguientes parámetros.

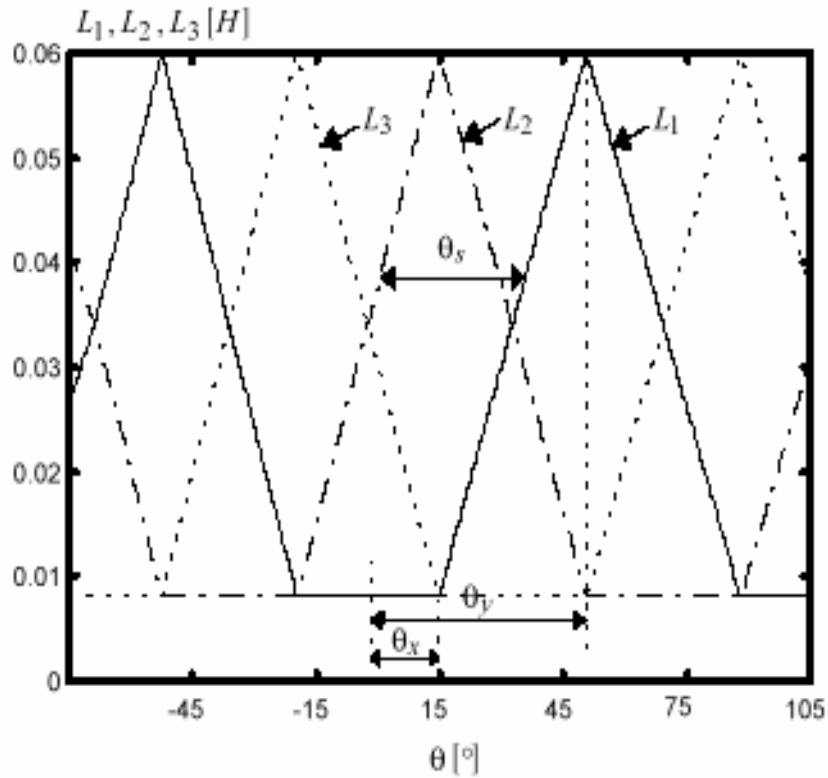


FIGURA 3.3 INDUCTANCIA DE CADA FASE DE UN MRAC 6/4

$$\theta_s = 2\Pi\left(\frac{1}{N_r} - \frac{1}{N_s}\right) \tag{19}$$

Donde N_r y N_s son el número de polos del rotor y estator respectivamente.

Un factor importante que se debe determinar es el arco del estator y el rotor, que en este caso son iguales $\beta_r = \beta_s$. Estos parámetros se pueden observar en la figura 3.4.

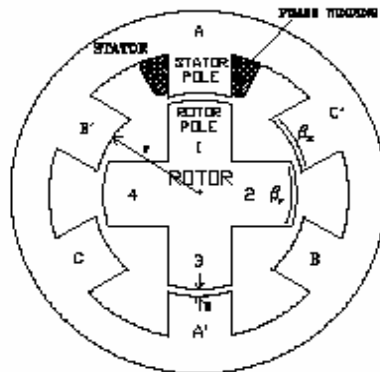


FIGURA 3.4 ARCOS DE ROTOR Y ESTATOR DE UN MRAC 6/4

con respecto a las figuras anteriores se obtiene la siguiente relación.

$$\theta_x = \left(\frac{\Pi}{N_r} - \beta_r \right) \quad (20)$$

$$\theta_y = \frac{\Pi}{N_r} \quad (21)$$

Como se indica en las anteriores figuras, el ángulo δ corresponde al desplazamiento de una fase con respecto a otra y esta determinada por:

$$\delta = 2\Pi \left(\frac{1}{N_r} - \frac{1}{N_s} \right) \quad (22)$$

Con estos parámetros, y sabiendo que se esta haciendo un análisis en régimen lineal, la relación que el flujo tiene es:

$$\psi = L(\theta)I \quad (24)$$

Que como se mencionó la co-energía esta dada por:

$$W = \frac{1}{2} L(\theta)I^2 \quad (25)$$

de donde resulta que la ecuación que representa el par es:

$$T = \frac{i^2 dL}{2d\theta} \quad (26)$$

y para poder representar las ecuaciones mecánicas del MRAC, podemos representar la siguiente igualdad.

$$J \frac{d\omega}{dt} = T - Tl - f\omega \quad (28)$$

y

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (29)$$

en donde Tl representa el par de carga, y f es el coeficiente de fricción, y ω es la velocidad angular del rotor.

CAPITULO 4

SIMULACION DEL MRAC.

En este capítulo se mostrará la forma en que se ha realizado las simulaciones basadas en MATLAB-SIMULINK.

En la primera sección se hace mención a los fundamentos que debe llevar toda simulación que se lleva a cabo por computadora, posteriormente se hace una revisión y análisis de los trabajos que se han desarrollado en base a la simulación de los MRAC.

En la siguiente sección se hace referencia del paquete de simulación utilizado en este trabajo, que es MATLAB en su versión 5.2 y SIMULINK en su versión 2.0; se hace referencia de sus orígenes y algunas formas en como trabaja el programa, además de mencionar los alcances que el mismo nos brinda.

En la tercera parte se hace mención de la forma en como se utilizó el programa de simulación para poder desarrollar y obtener los resultados.

4.1 SIMULACION DE MOTORES ELÉCTRICOS.

Una de las más importantes y poderosas herramientas para analizar el diseño y operación de sistemas de procesos complejos, es la simulación. Aunque la solución al problema nunca es exacta, las aproximaciones que se obtienen son bastante buenas.

Por lo anterior hoy en día la simulación es una vinculación de suma importancia entre los modelos reales y los modelos que existen aún en desarrollo.

A continuación se presenta los fundamentos básicos que describen y definen a la simulación, en el área de los motores eléctricos.

4.1.1 DEFINICIÓN DE SIMULACIÓN.

Simulación es el proceso de diseñar un modelo de un sistema físico real, el cual sirve para dirigir los experimentos y desarrollos, con el propósito de entender el comportamiento del sistema y proponer varias estrategias para realizar la operación de esta.

Por sistema físico real, se refiere a la representación de un conjunto de partes o elementos propios al sistema en estudio, en este caso el término "real" se usa en el sentido de " existencia o capaz de ser puesto en existencia", esto quiere decir que el sistema no necesariamente tiene que ser real (puede ser desarrollado).

4.1.2 EL PORQUE DE LA SIMULACIÓN.

El principio racional para usar la simulación en cualquier área del conocimiento es la búsqueda del hombre por adquirir conocimientos referentes a la predicción del futuro, o la explicación lógica de un fenómeno.

El inicio del estudio de un fenómeno o sistema físico se basa en el Método Científico el cual consta de cuatro pasos:

- Observación del sistema físico en estudio.
- Formulación de hipótesis las cuales deberían explicar el comportamiento del sistema.
- Obtener una teoría que explique el comportamiento del sistema, utilizando una deducción lógica o más rigurosamente un *modelo matemático*.
- Experimentación para probar la validez de la teoría propuesta.

Pero en ocasiones es muy difícil utilizar este método en algunos sistemas particulares, entonces la *simulación* aparece como una alternativa muy *eficiente*.

4.1.3 COMPONENTES DE UNA SIMULACIÓN POR COMPUTADORA.

Antes de diseñar una simulación por computadora es decisivo tener presentes los siguientes componentes:

- Los objetivos o datos de salida del estudio de simulación que tienen la forma de un valor numérico específico.
- Los datos de entrada o valores numéricos necesarios para determinar las salidas de la simulación.

Estos pueden ser:

1. Condiciones iniciales: valores que expresan el estado del sistema al principio de una simulación.
2. Datos determinísticos: valores conocidos necesarios para calcular las salidas de la simulación. (representan la caracterización del sistema y en nuestro caso se presentan como resultado de experiencias previas)
3. Datos probabilísticos: magnitudes numéricas cuyos valores son inciertos pero necesarios para obtener las salidas de la simulación.

4.1.4 DISEÑO DE LA SIMULACIÓN POR COMPUTADORA.

- Generación de números aleatorios: se obtienen las entradas probabilísticas para el modelo generando números aleatorios de acuerdo a las distribuciones conocidas asociadas.
- Contabilidad: se diseña un método sistemático para almacenar y procesar todos los valores de entrada y para realizar los cálculos necesarios para obtener los valores de salida.
- Implementación del modelo en el computador. Hay que definir que lenguaje utilizar, para procesarlo en el computador y obtener los resultados deseados.
- Validación. A través de esta etapa es posible detallar deficiencias en la formulación del modelo a en los datos que lo alimentan.

Las formas más comunes de validar un modelo son:

1. La opinión de los expertos.
2. La exactitud con que se precisen los datos históricos.
3. La exactitud en la predicción del futuro.
4. Utilizar datos que hacen fallar al sistema real.
5. La aceptación y confianza en el modelo de la persona que hará uso de los resultados obtenidos con el sistema.
6. Interpretación. Interpretar los datos que arroja la simulación y hacer uso de ellos para tomar decisiones.
7. Documentación. Hacer el manual técnico y el manual de usuario para el sistema de simulación a utilizarse.

4.1.5 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA SIMULACIÓN.

- **Ventajas:** Podemos aplicar la simulación sino existe una formulación matemática del problema. Se aplica cuando los procedimientos matemáticos son muy complejos. Se aplica cuando no existe el elemento físicamente (aún se encuentra en un proceso de estudio). Cuando se desea hacer experimentos por un cierto periodo de tiempo para observar el comportamiento del sistema, Cuando se requiera que el proceso sea en menos tiempo. Se aplica a la educación y el entrenamiento
- **Desventajas:** Entre estas tenemos que: un buen modelo requiere mucho tiempo y en ocasiones muy complejo. Puede reflejar con precisión una situación del mundo real, cuando en verdad no lo hace. La simulación es imprecisa, y no se puede medir el grado de error. Generalmente los resultados son numéricos y pueden ser imprecisos por algunas cifras decimales que con el tiempo se convierten en unas cifras muy significativas al obtenerse el error.

4.2 REVISION BIBLIOGRÁFICA DE SIMULACIÓN EN LOS MRAC

El beneficio que uno tiene con el análisis y simulación de un sistema en forma integral, es importante hoy en día para la validación del mismo, además de que sirve como base para el diseño y su realización en forma experimental.

Estudios referentes a la simulación en forma dinámica de los MRAC, se han elaborado en programas como es el caso de lenguaje C y Fortran, por otra parte se han basado en estos estudios y hemos encontrado simulaciones en lenguaje ACSL (16,20), otro tipo de simulaciones se han realizado en el caso de lenguaje Delphi 2.0(15).

Por otro lado, muy poca gente estudia los MRAC, en un idioma de programación basado en lenguajes o programas como: Spice, Simulink-Matlab, Matrix, Tutsim, Vissim y Mathcad. Se han realizado las primeras simulaciones gracias al programa de simulación Spice (7). Desgraciadamente, la técnica que se utiliza aquí no es muy apropiada, debido a que el programa Spice, se adapta sobre todo a simulaciones de circuitos eléctricos (14).

En esta última década, existen progresos muy importantes, en relación al ambiente de simulación de MATLAB-SIMULINK, el cual permite un desarrollo de ambientes de programación flexible dirigido a las máquinas eléctricas.

En este trabajo sobre MRAC se hace un estudio en base a la programación en MATLAB, y una simulación en SIMULINK.

La principal motivación que impulsa este trabajo, es poder mostrar la diversidad de máquinas eléctricas que se pueden utilizar para distintos campos de trabajo; esperando que alumnos del área de ingeniería se interesen por el tema para que en un tiempo corto, se pueda abrir una línea de investigación más formal sobre este tipo de motores.

Y que podamos competir directamente con los dos o tres grupos de investigación llevan la punta en innovaciones.

Se que el camino es largo y difícil, pero con buenos cimientos en el tema, la gran educación de calidad y el empeño de nosotros como estudiantes, podremos hacer investigación de muy alto nivel como el mundo de hoy en día exige.

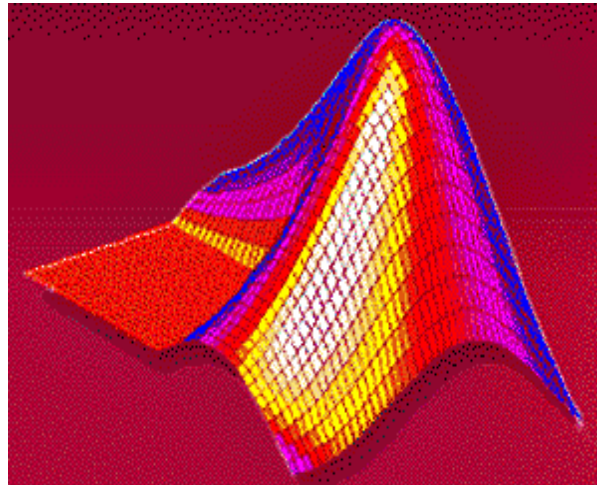
4.3 SIMULADOR UTILIZADO EN ESTE TRABAJO (MATLAB-SIMULINK)

El simulador empleado para este trabajo es MATLAB ver.5.2 y SIMULINK ver2.0, los cuales como se mencionó anteriormente, representa un software muy utilizado en áreas de enseñanza de ingeniería, además de mostrar una simplicidad en su estructura de programación lo cual nos brinda la ventaja de poder hacer esta simulación en una forma de fácil comprensión para el público que consulte esta obra.

A continuación se muestra una introducción del simulador (MATLAB-SIMULINK), el cual nos ayudará a comprender los orígenes y formas en como trabaja este lenguaje de programación.

4.3.1 MATLAB

El nombre de MATLAB proviene de la contracción de los términos **MAT**rix **LAB**oratory y fue inicialmente concebido para facilitar el acceso a las librerías LINPACK y EISPACK, las cuales representan hoy en día dos de las librerías más importantes en computación y cálculo matricial.



Matlab fue originalmente desarrollado en lenguaje FORTRAN para ser usado en computadoras mainframe. Fue el resultado de los proyectos Linpack y Eispack desarrollados en el Argonne National Laboratory. Su nombre proviene de **Matrix Laboratory**. Al pasar de los años fue complementado y reimplementado en lenguaje C. Actualmente la licencia de Matlab es propiedad de MathWorks Inc .

MATLAB es un entorno de computación y desarrollo de aplicaciones totalmente integrado orientado para llevar a cabo proyectos en donde se encuentren implicados elevados cálculos matemáticos y la visualización gráfica de los mismos. MATLAB integra análisis numérico, cálculo matricial, procesamiento de señales y visualización gráfica en un entorno completo donde los problemas y sus soluciones son expresados del mismo modo en que se escribirían tradicionalmente, sin necesidad de hacer uso de la programación tradicional.

MATLAB goza en la actualidad de un alto nivel de implantación en escuelas y centros universitarios, así como en departamentos de investigación y desarrollo de muchas compañías industriales nacionales e internacionales. En entornos universitarios, por ejemplo, MATLAB se ha convertido en una herramienta básica, tanto para los profesionales e investigadores de centros docentes, como una importante herramienta para la impartición de cursos universitarios, tales como sistemas e ingeniería de control,

álgebra lineal, proceso digital de imagen, señal, etc. En el mundo industrial, MATLAB está siendo utilizado como herramienta de investigación para la resolución de complejos problemas planteados en la realización y aplicación de modelos matemáticos en ingeniería. Los usos más característicos de la herramienta los encontramos en áreas de computación y cálculo numérico tradicional, prototipaje algorítmico, teoría de control automático, estadística, análisis de series temporales para el proceso digital de señal.

MATLAB dispone también en la actualidad de un amplio abanico de programas de apoyo especializados, denominados Toolboxes, que extienden significativamente el número de funciones incorporadas en el programa principal. Estos Toolboxes cubren en la actualidad prácticamente casi todas las áreas principales en el mundo de la ingeniería y la simulación, destacando entre ellos el 'toolbox' de proceso de imágenes, señal, control robusto, estadística, análisis financiero, matemáticas simbólicas, redes neuronales, lógica difusa, identificación de sistemas, simulación de sistemas dinámicos, etc.

Además también se dispone del programa Simulink que es un entorno gráfico interactivo con el que se puede analizar, hacer su modelo y simular la dinámica de sistemas no lineales.

4.3.2 SIMULINK

Simulink es una herramienta para el modelado computacional, análisis y simulación de una amplia variedad de sistemas físicos y matemáticos, inclusive aquellos con elementos no lineales y aquellos que hacen uso de tiempos continuos y discretos. Como una extensión de Matlab, Simulink adiciona muchas características específicas a los sistemas dinámicos, mientras conserva toda la funcionalidad de propósito general de Matlab. Así Simulink no es completamente un programa separado de Matlab, sino un anexo a él. El ambiente de Matlab está siempre disponible mientras se ejecuta una simulación en Simulink.

Simulink tiene dos fases de uso: la definición del modelo y la simulación del modelo. La definición del modelo significa construir el modelo a partir de elementos básicos

construidos previamente, tal como, integradores, bloques de ganancia o servomotores. Para el análisis del modelo debe contarse con la simulación, linealización y determinar las características del modelo previamente definido.

Para simplificar la definición del modelo Simulink usa diferentes clases de ventanas llamadas ventanas de diagramas de bloques. En estas ventanas se puede crear y editar un modelo gráficamente usando el mouse. Simulink usa un ambiente gráfico lo que hace sencillo la creación de los modelos de sistemas.

Después de definir un modelo este puede ser ejecutado seleccionando una opción desde los menús de Simulink o entrando comandos desde la línea de comandos de Matlab.

Simulink puede simular cualquier sistema que pueda ser definido por ecuaciones diferenciales continuas y ecuaciones de diferencias discretas. Esto significa que se puede modelar sistemas continuos en el tiempo, discretos en el tiempo o sistemas híbridos.

Simulink usa diagramas de bloques para representar sistemas dinámicos. Mediante una interface gráfica con el usuario se pueden arrastrar los componentes desde una librería de bloques existentes y luego interconectarlos mediante conectores y alambres. La ventana principal de Simulink se activa escribiendo Simulink en la línea de comandos de Matlab, y se muestran en la figura 4.1:

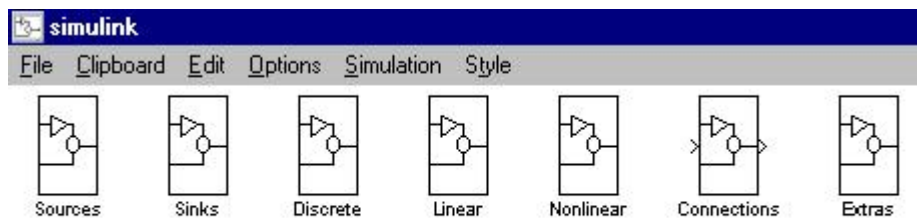


FIGURA 4.1 LIBRERIAS DE SIMULINK

4.4 SIMULACIÓN EN MATLAB – SIMULINK

Este trabajo describe una simulación basado en el ambiente de simulación MATLAB-SIMULINK, para simular un MRAC con 6 polos en el estor y 4 polos en el rotor.

Todas las simulaciones se encuentran completamente documentadas en el trabajo a través de diagramas de bloques, funciones y parámetros especiales de MATLAB para un fácil desarrollo del modelo.

Como de ha comentado anteriormente, las principales ventajas que presenta este simulador y en especial en el desarrollo del modelo del MRAC es:

- La ganancia de tiempo para el desarrollo y estudio de la simulación.
- La opción de varias técnicas de resolución numérica
- Como el programa contiene librerías especializadas, hace más sencillo integrar el estudio del motor con áreas de lógica difusa, procesamiento de señales, etc.

A continuación se muestra la forma de programación llevada a cabo para la simulación, en donde se presenta en forma desglosada.

4.4.1 PROGRAMACIÓN EN MATLAB

La programación en MATLAB, fue llevada a cabo, en base a un grupo de listados de programas, que tiene por fin desarrollar una función especial dentro de la simulación global, este grupo de programas consta de 5 partes, las cuales se mencionan a continuación.

1. principal: Este programa como su nombre lo menciona, es el alma de la simulación, dado que en el se cargan los valores característicos del motor además este programa brinda la información inicial para el desarrollo de la simulación. El nombre del programa es "inicio.m" y su desarrollo y comentarios se encuentran en los resultados obtenidos del trabajo.
2. Conmutación: Este programa permite realizar en forma correcta la conmutación que alimenta al MRAC, esto es permite determinar el momento de encendido y apagado de la fase del estator (θ_{on} y θ_{off} , lo cual sirve para controlar el funcionamiento general de motor; el listado del programa "conmutación.m", se muestra más adelante y se encuentra detalladamente comentado para su comprensión.

3. Inductancia: determina la corriente y la inductancia de fase del MRAC, en función de la posición del rotor (θ) y del flujo de fase ψ ; este programa se denomina "inductancia.m" y se comenta a detalle en los resultados de simulación obtenidos.
4. par: Este programa realiza el cálculo del par producido por el motor, esto con cálculos realizados en base a la posición del rotor (θ) y el valor de corriente I de las fases del estator; este programa se denomina "par.m", en los resultados se muestra y comenta el listado del programa.
5. pie: Este modulo nos ayuda a asegurar que la posición del rotor tenga una periodicidad de 2π , y regresar a cero, para que en la simulación tenga resultados correctos, este programa se denomina "pie.m", y su listado y comentarios se encuentran en los resultados de la simulación obtenidas.

4.4.2 Simulación basada en Simulink.

La simulación basada es SIMULINK, fue llevada cabo en forma estructurada, esto con ayuda de los programas realizados previamente en MATLAB, como se comentó anteriormente SIMULINK opera en forma de bloque, lo cual hace más fácil y didáctica la solución de la simulación.

La forma de comprender la forma de operación de SIMULINK, es sencilla; esto solo con observar el diagrama de bloques utilizado para la simulación, cada bloque esta debidamente nombrado y ligado con la programación de MATLAB, además acondicionan las entradas con el fin de poder comprender y seguir tanto las entradas como salidas de cada bloque de simulación.

La forma general de solución para este trabajo, se muestra más adelante en detalle en la sección de resultados obtenidos.

CAPITULO 5

RESULTADOS DE SIMULACION.

En este capítulo mostraremos los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas, para evaluar la caracterización del motor propuesto. Como se hace mención anteriormente, solo se trabaja con un modelo simplificado para fines prácticos. En la primera sección se hace referencia a los parámetros utilizados en el motor y al software con el que se realizó la simulación.

Posteriormente, en las siguientes secciones, se muestra los resultados obtenidos en la simulación, como es el caso de corriente, voltaje, inductancia y par de fase además de la velocidad del motor.

Cada una de estas secciones contiene los comentarios y análisis que ayudan a comprender mejor los resultados.

La siguiente parte, presenta la caracterización del motor que analizamos, mostrando algunas de las características descritas anteriormente y comparadas con motores de sus mismas dimensiones en diferentes categorías.

5.1 PARAMETROS DEL MRAC

El desempeño de la caracterización del motor MRAC fue realizado mediante simulaciones digitales. Para realizarlas, se utilizó el modelo lineal del motor con fines de simplicidad.

Los parámetros considerados para la simulación son: Números de polos del estator $N_r=6$, Números de polos en el rotor $N_s=4$; parámetros de la inductancia, $L_{min}=0.008$ [H], $L_{max}=0.06$ [H], resistencia de fase del estator, $r=1.3\Omega$; momento de inercia, $J=0.003$ kgm^2

Estos valores pueden en algún caso especial tomar otros valores para realizar estudios específicos.

El software de simulación que se utilizó para realizar las simulaciones fue MATLAB en su versión 5.2 y SIMULINK, en su versión 3.0. El simulador MATLAB-SIMULINK es un programa muy útil para resolver numéricamente ecuaciones diferenciales que puede ser usado para simular sistemas dinámicos que estén compuestos de varios subsistemas como a continuación se observará.

5.2 LISTADOS PARA LA SIMULACION EN MATLAB

A continuación se presenta los diferentes listados que fueron utilizados para la simulación dinámica del motor de reluctancia accionado por conmutación, como se podrá observar, cada bloque que fue utilizado, muestra sus respectivos comentarios para que sea didáctico.

5.2.1 LISTADO PARA EL PROGRAMA DE INICIO.

1. *inicio.m* Este programa en MATLAB, nos permite cargar los valores característicos del motor de reluctancia accionado por conmutación que deseamos simular, como se puede observar en los comentarios.

A continuación se presenta el listado:

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%inicio.m                                                    %
%Este programa sirve para poder cargar los valores del motor "MRAC"          %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

global TETAS TETAX TETAY TETAXY TETAON TETAOFF TETAQ V AUP BUP ADOWN BDOWN
DL A B LMIN LMAX

```

NS=6 %Este valor nos representa el numero de polos del MRAC en el estator.

NR=4 %Este valor nos representa el numero de polos del MRAC del rotor.

P=3; %Este valor nos representa el numero de fases de MRAC.

BETAS=30*(pi/180);

BETAR=30*(pi/180);

TETAS=(2*pi)*((1/NR)-(1/NS))

TETAX=(pi/NR)-((BETAR+BETAS)/2)

TETAY=(pi/NR)-((BETAR-BETAS)/2)

TETAZ=(BETAR-BETAS)/2

TETAXY=(TETAY+TETAZ+TETAS)

TETAON=0*(pi/180) %Este es el ángulo en donde se comienza la conmutación.

TETAOFF=30*(pi/180) %Este es el ángulo en donde se termina la conmutación.

TETAQ=60*(pi/180) %Este es el ángulo en donde se encuentra totalmente desalineado
%el polo del rotor y el estator

TETAON=.1*(pi/180)

V=100

R=1.30; %Resistencia de fase

J=0.003; %Valor de inercia

DELTAVMAX=150;

LMIN=8e-3; %Inductancia mínima

LMAX=60e-3; %Inductancia máxima

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Calculos que nos serviran para obtener la inductancia en diferentes posiciones del rotor      %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

G=(inv([TETAX 1;TETAY 1]))*([LMIN;LMAX]);
AUP=G(1);
BUP=G(2);
H=(inv([(TETAY+TETAZ) 1;TETAXY 1]))*([LMAX;LMIN]);
ADOWN=H(1);
BDOWN=H(2);
DL=AUP;

```

5.2.2 LISTADO PARA EL PROGRAMA DE CONMUTACIÓN.

3.- *conmutación.m* este programa de MATLAB nos permite asegurar la conmutación en el ángulo que nosotros necesitamos, en este caso se nombra un ángulo de encendido θ_{on} y el ángulo de apagado θ_{off} , los comentarios se encuentran descritos en el mismo programa que a continuación se presenta.

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Este programa sirve para poder decidir en donde comienza y termina la conmutación          %
%conmutacion.m                                                                           %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

function Va=f(TE); %En esta función de MATLAB se tiene la oportunidad de poder cargar
                  %el vector de entrada (voltaje y angulo)

```

```

E=TE';          %E es ahora el vector columna de entrada.
e=E(1);         %El primer termino representa la entrada de voltaje
teta=E(2);      %El segundo termino nos representa la entrada del angulo del rotor

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Aquí se comienza a cargar los comandos y valores generales del motor MRAC, que previamente %
%se determinaron. %
%Las variables de TETAON y TETAOFF como se observó, fueron definidas con anterioridad y que%
%fueron cargadas en el programa principal inicio.m el cual empezará a correr en este %
%momento. %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

global TETAS TETAX TETAY TETAXY TETAON TETAOFF TETAQ V AUP BUP ADOWN BDOWN
DL LMIN LMAX

```

```

if ((TETAON<= teta) & (teta <=TETAOFF))
    Va=V;
end;
if ((TETAOFF<teta)&(teta<=TETAQ))
    Va=-V;
end;
if (teta>TETAQ)
    Va=0;
end;

```

5.2.3 LISTADO PARA EL PROGRAMA DE INDUCTANCIA.

4.- *inductancia.m* con este programa podemos obtener el comportamiento de la inductancia de fase del motor en función del tiempo, como se vera a detalle se especifica las entradas y salidas que brinda este programa, esto en los comentarios del mismo.

Cabe destacar que además de obtener la inductancia, otra salida que brinda el programa es la corriente que es otro parámetro que es de suma importancia en la simulación.

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Este programa nos ayuda a calcular la inductancia del MRAC
%
%inductancia.m
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```
function U=f(TE); %TE es ahora nuestro vector de entrada.
```

```
E=TE'; %E es nuestro vector columna de entrada.
```

```
flux=E(1); %representa el flujo de entrada
```

```
teta=E(2); %representa la posición del rotor.
```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Aquí se realizan los cálculos para la obtención de la inductancia basandose en
%
%los parámetros determinados en inicio.m
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```
global TETAS TETAX TETAY TETAXY TETAON TETAOFF TETAQ V AUP BUP ADOWN BDOWN
DL LMIN LMAX
```

```
if((0 <= teta)&(teta <= TETAX))
```

```
U=[flux/LMIN,LMIN]; %Como se observa el primer termino representa la
%corriente y el segundo la inductancia.
```

```
end;
```

```
if ((TETAX < teta)&(teta <= TETAY))
```

```
U=[flux/((AUP*teta)+BUP),((AUP*teta)+BUP)];
```

```
end;
```

```
if((TETAY < teta) & (teta <= TETAXY))
```

```
U=[flux/((ADOWN*teta)+BDOWN),((ADOWN*teta)+BDOWN)];
```

```
end;
```

```
if(teta > TETAXY)
```

```
U=[flux/LMIN,LMIN];
```

```
end;
```

5.2.4 LISTADO PARA EL PROGRAMA DE PAR

5.- par.m como su nombre lo menciona, en este programa podremos obtener el comportamiento del par en el tiempo, el programa se encuentra comentados para la comprensión del mismo.

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Este programa sirve para obtener el par del MRAC
%par.m
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```
function T=f(TE); %Nuevamente TE es le vector de entrada
```

```
E=TE'; %E es nuevamente el vector columna de entrada
```

```
i=E(1); %representa la corriente
```

```
teta=E(2); %representa la posicion del rotor
```

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
global TETAS TETAX TETAY TETAXY TETAON TETAOFF TETAQ V AUP BUP ADOWN DL LMIN
LMAX
```

```
if((0<=teta)&(teta<=TETAX))
```

```
    T=[0,0]; %el resulta que obtenemos en el primer termino es el par
```

```
end;
```

```
if((TETAX<teta)&(teta<=TETAY))
```

```
    T=[0.5*(DL)*(i*i),DL];
```

```
end;
```

```
if((TETAY<teta)&(teta<=TETAXY))
```

```
    T=[-0.5*(DL)*(i*i),-DL];
```

```
end;
```

```
if(teta>TETAXY)
```

```
    T=[0,0];
```

```
end;
```

5.3. SIMULACIÓN EN SIMULINK

A continuación se presenta el esquema de simulación basado en SIMULINK ver 2.0, lo que se puede apreciar a primera vista, es que se trata de un sistema de bloques sistematizado, el cual brinda la idea sencilla de funcionamiento, como se observa algunos bloques son funciones que llevan implícita una función de MATLAB, en este caso se trata de la llamada de un programa o lista de programación (inicio.m, conmutación.m, inductancia.m, par.m, pie.m) los cuales son piezas fundamentales para el desarrollo de la simulación dinámica del motor de reluctancia accionado por conmutación.

Se observa claramente las rutas lógicas de simulación, con lo cual podemos seguir paso a paso el desarrollo y simulación del motor.

Además cabe resaltar que la simulación se realiza en forma monofásica, con los resultados obtenidos podremos inferir los resultados para una simulación trifásica, pero el objetivo primordial de este trabajo, es de caracterizar el motor; por lo que con la simulación monofásica nos da la solución para poder obtener los parámetros primordiales que nos ayuden a realizar nuestro objetivo.

Con este modelo de simulación monofásica obtenemos la corriente, inductancia, tensión aplicada a la fase, par, velocidad del rotor.

Cada respuesta obtenida de los parámetros obtenidos se discute en la sección de resultados y conclusiones.

La figura 5.1, representa el esquema de simulación en base al programa SIMULINK ver. 2.0, que a continuación se presenta.

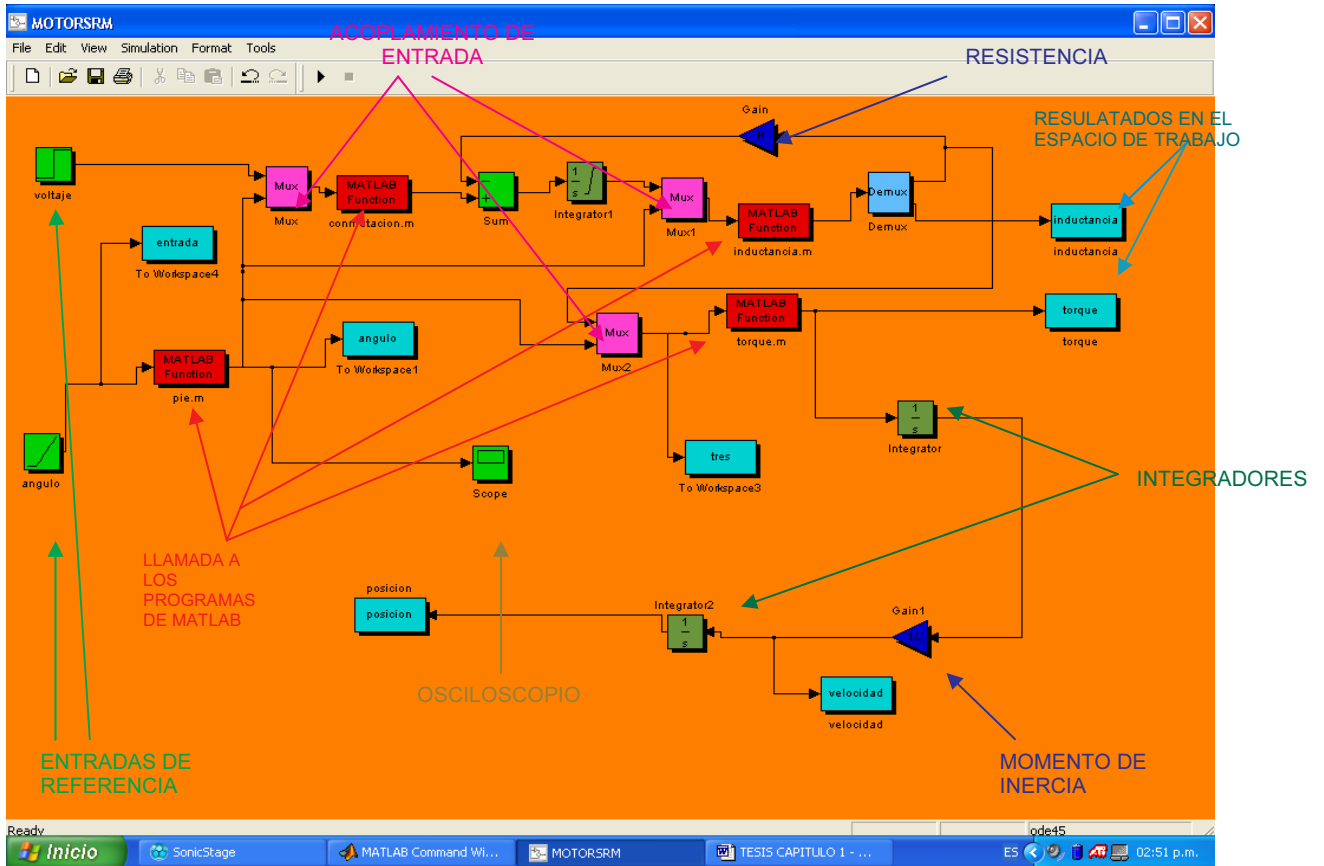


FIGURA 5.2 ESQUEMA DETALLADO DEL ESQUEMA DE SIMULACIÓN EN SIMULINK

5.4 RESULTADOS DE SIMULACIÓN.

A continuación se muestra los resultados obtenidos en la simulación, se presentan gráficas como es el caso de la corriente, inductancia, tensión de alimentación, par, velocidad del motor.

Como se puede observar los resultados se presentan en tiempo real, esto es, las gráficas obtenidas son tomadas en el osciloscopio que incluye en el programa de SIMULINK.

Como se podrá observar, los resultados obtenidos en el programa SIMULINK, carecen de una flexibilidad en su presentación, esto es que la rotulación de la gráfica, ejes coordenados, diseño (forma y colores) presentan una limitación para poder presentar los resultados.

Esperamos que este programa avance en la forma de presentación de resultados, siendo más amistosa y atractiva para la gente que labora en esta área.

5.4.1 INDUCTANCIA.

La figura 5.3 que a continuación se muestra, es la curva de inductancia de fase del motor de reluctancia accionado por conmutación, que se obtuvo en la simulación, esto con los parámetros descritos anteriormente.

Como se mencionó anteriormente, los resultados obtenidos no presentan una gran diversidad en utilerías de presentación.

Cabe mencionar que en las gráficas obtenidas las unidades del eje "X" son segundos [s] y en el eje "Y" Henry [H].

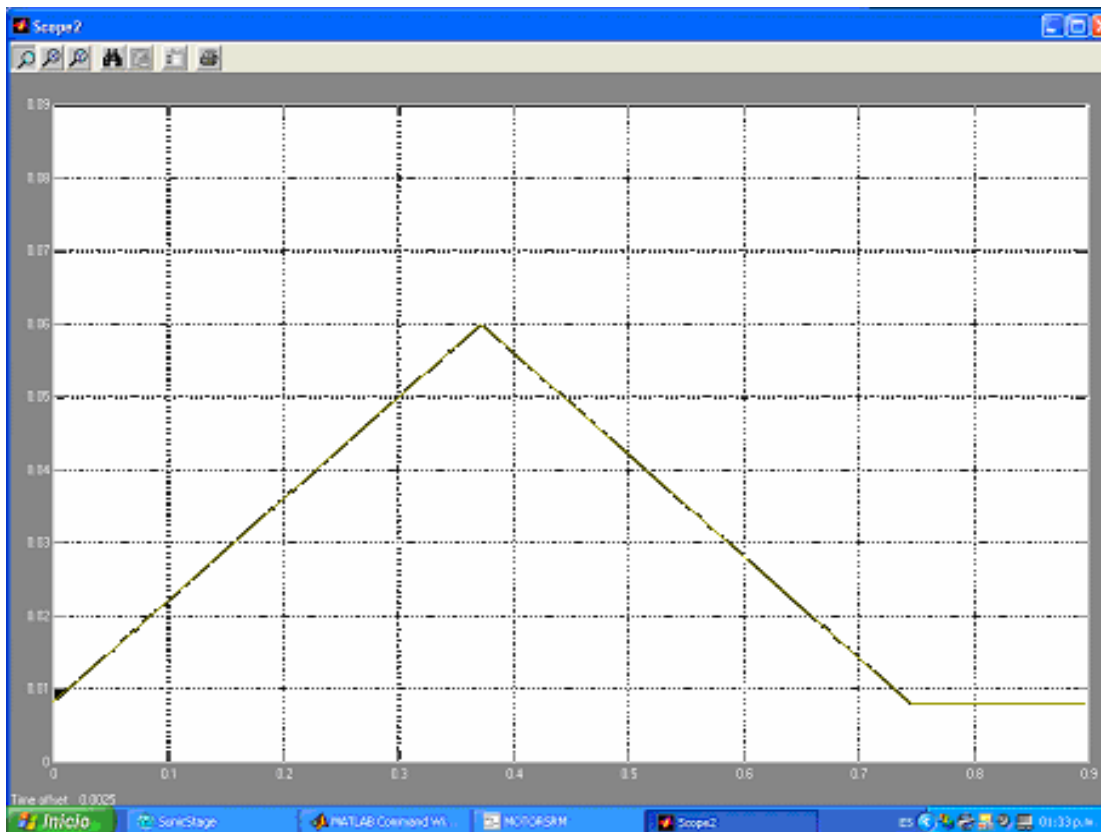


FIGURA 5.3 INDUCTANCIA DE FASE

Como podemos observar, la gráfica que obtenemos tiene valores que esperábamos ($L_{min}=0.008$ [H] y $L_{max}=0.06$ [H], esto) es que por este punto, nos brinda la idea que la gráfica obtenida contiene valores reales.

El resultado obtenido, fue debidamente comparado, con los resultados obtenidos en otras simulaciones.

Lo sorprendente, fue ver que la gráfica obtenida coincide correctamente con resultados obtenidos de otros trabajos, esto tomando en cuenta que algunas simulaciones son hechas tomando en cuenta, el modelo matemático general, que toma en cuenta todas las variables descritas.

Ante todo, es importante comprender los resultados obtenidos, esto para ser capaces de comprender la situación física del evento en estudio.

A continuación se muestra en la figura 5.4 un acercamiento de la gráfica anterior, esto para poder observar y visualizar mejor los resultados.

Como se podrá apreciar, la gráfica se puede dividir en 2 zonas de operación, que son unas de las partes más importantes de este estudio las cuales son:

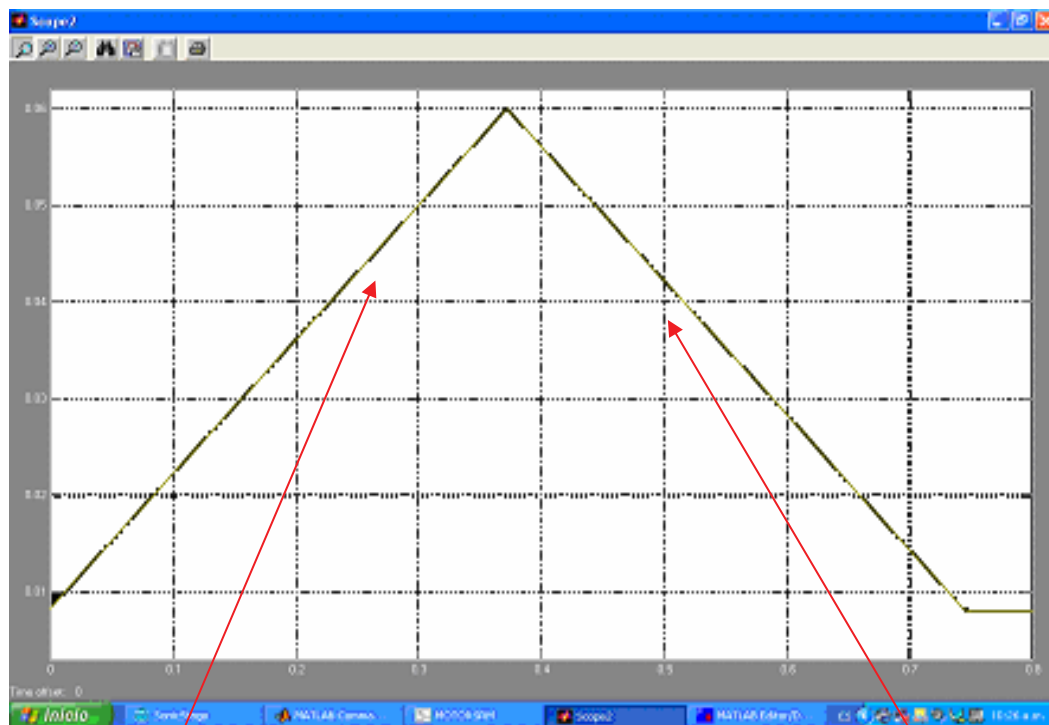


FIGURA 5.4 ACERCAMIENTO DE LA GRÁFICA 6.3

ZONA 1

ZONA 2

Como se observa en la figura 5.4, existen 2 zonas de operación, a continuación describiremos cada una de estas zonas:

- Zona 1. En esta zona se lleva a cabo el encendido del conmutador, esto para llevar a cabo la alineación del polo del rotor y estator, este proceso se podrá ver más adelante.
- Zona 2. Esta zona representa el momento en que empieza el desalineamiento de los polos del rotor y estator, una vez que el proceso de la zona 1 ha sido completado.

La figura 5.5, nos ayudará a vincular mejor la gráfica obtenida anteriormente, con la situación real del motor MRAC.

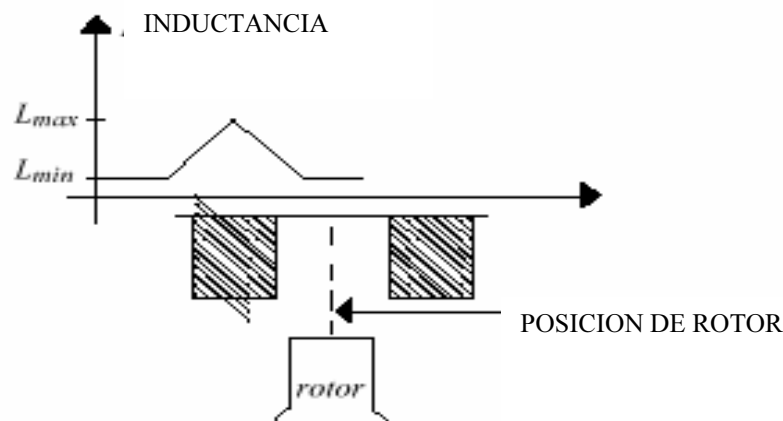


FIGURA 5.5 INDUCTANCIA EN LOS MRAC

5.4.2 TENSIÓN DE ALIMENTACION.

La figura 5.6 fue obtenida en la simulación y nos entrega la forma de la señal de tensión que se alimenta al MRAC.

Como se puede observar, la señal de tensión que proponemos, es una señal particular para el conmutador que elegimos, esto quiere decir, que para otros modelo de conmutadores la señal de pueden variar de forma o sentido de alimentación.

Antes de presentar la gráfica resultante, es impotente mencionar que en el eje "X" se maneja segundos [s] y en el eje "Y" se maneja volts [V]

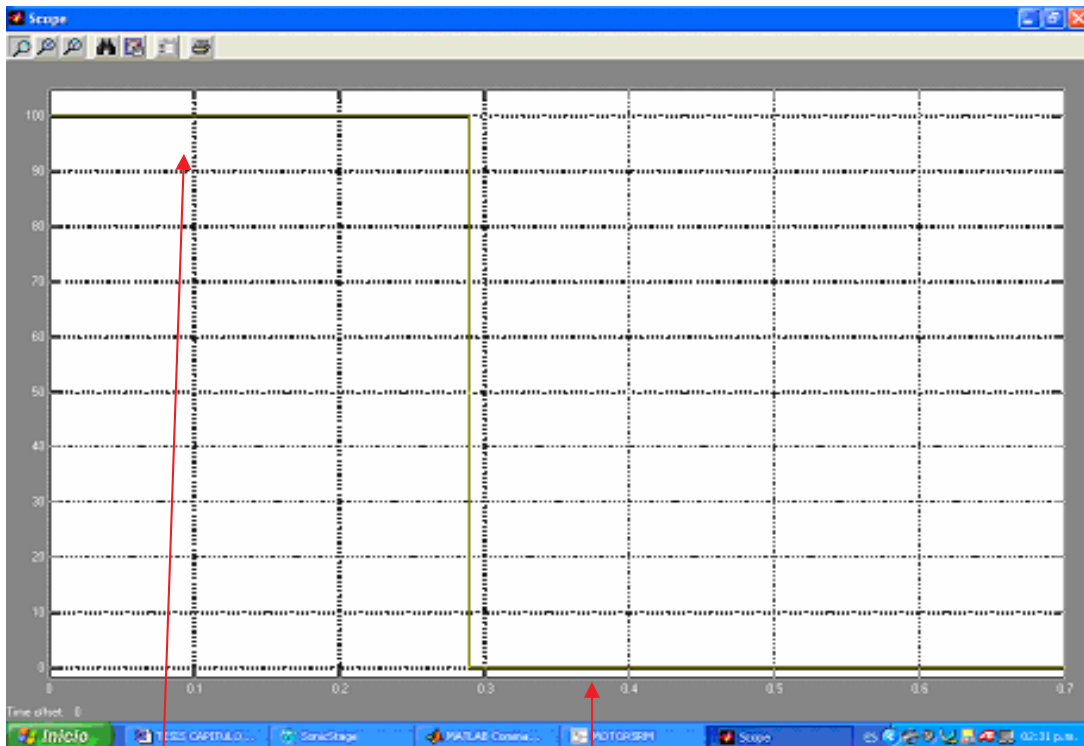


FIGURA 5.6 TENSIÓN DE ALIMENTACIÓN DEL MRAC

$t=0$ [s] (inicio de la conmutación)

$t=.29$ [s] es el termino de la conmutación

Con la gráfica anterior, observamos que en el tiempo $t=0$, la conmutación empieza a llevarse a cabo; mientras que en el tiempo $t=.29$ s, la conmutación llega a su fin en esa fase.

La conmutación empieza cuando el polo del rotor y estator se encuentran desalineados, y la conmutación termina cuando el polo del rotor y estator se encuentran alineados nuevamente.

5.4.3 CORRIENTE

La corriente, es uno de los parámetros primordiales, que se buscan en la simulación.

A continuación se muestra la figura 5.7 obtenida para la corriente. Los resultados obtenidos fueron discutidos y comparados con otros resultados hechos por diversos trabajos.

Como se puede ver la forma de la onda resultante, presenta algunas alteraciones, esto debido a la forma en como el MRAC opera. La señal resultante diferencia mucho de la señal ideal que se esperaba (cuadrada).

Los ejes que la gráfica presentan tiene en el eje "X" tiempo en segundos [s] y en el eje "Y" presenta amperes [A]

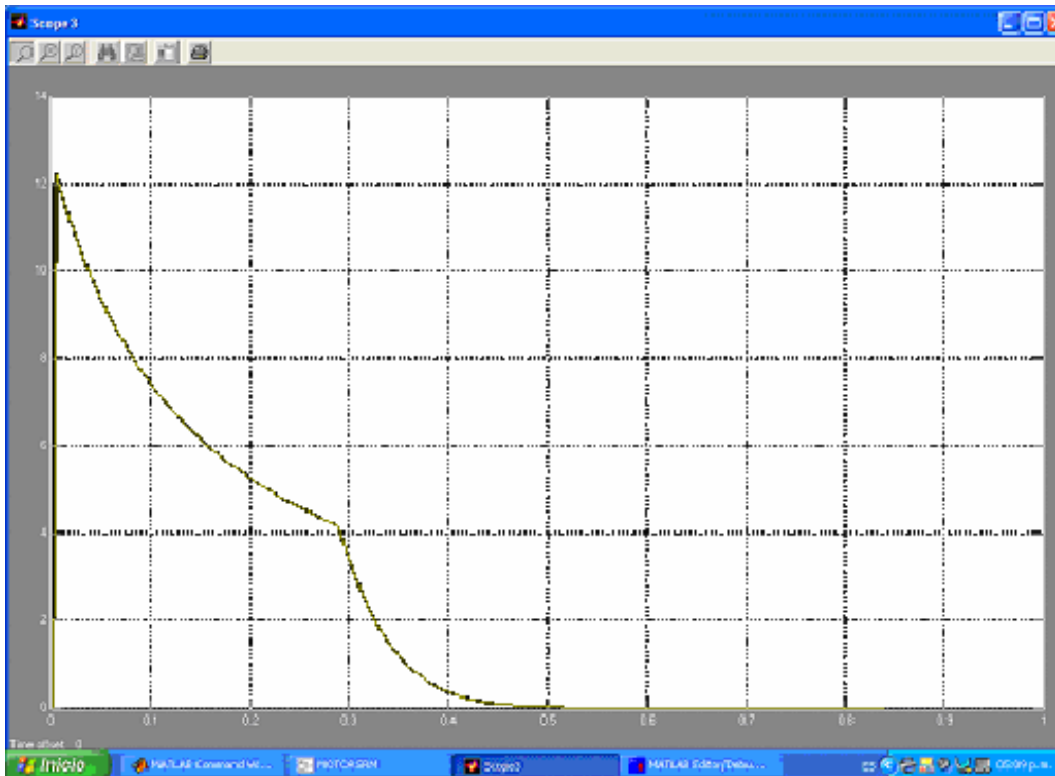


FIGURA 5.7 CORRIENTE DE FASE DEL MRAC.

La figura 5.8 que a continuación se presenta, es una acercamiento para mejor apreciación de la figura 5.7

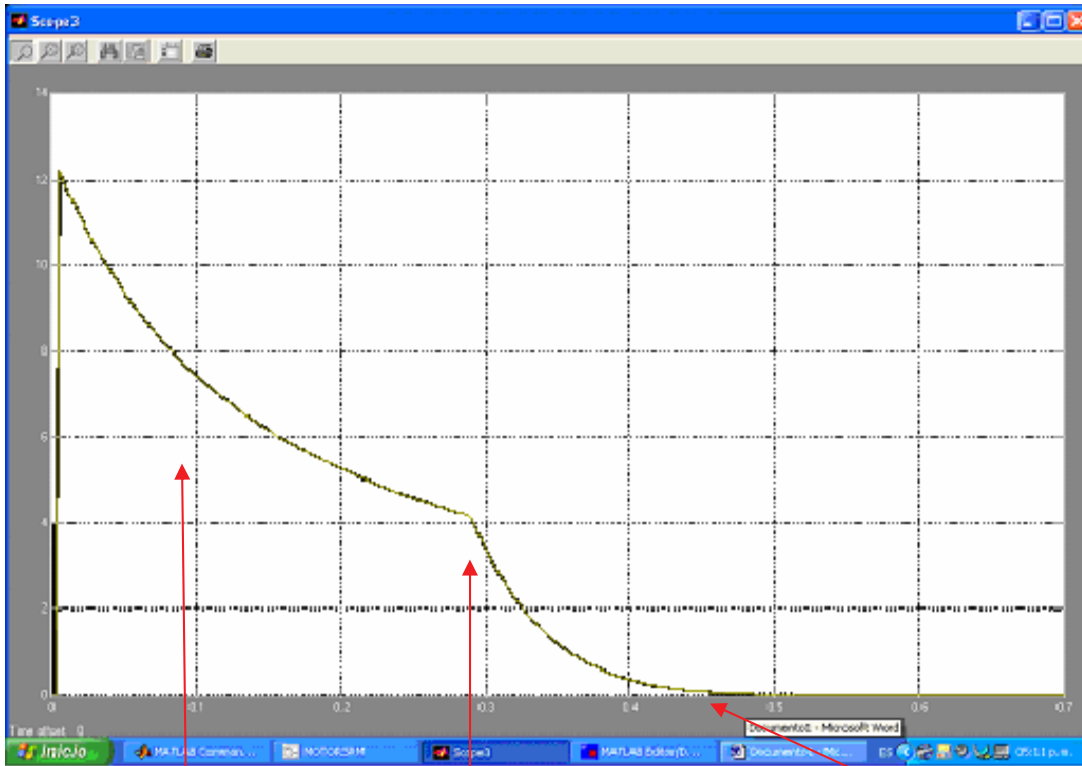


FIGURA 5.8 ACERCAMIENTO DE LA GRÁFICA 6.7

ZONA 1

ZONA 2

ZONA 3

Corriente cuando el conmutador Se encuentra encendido	Punto en donde termina la conmutación	Corriente, un tiempo después que el conmutador se apagó
--	--	--

Como se puede ver, la forma de la corriente obtenida, durante el funcionamiento del conmutador, presenta una forma distinta a la teórica (cuadrada). Esto influye fuertemente, en el diseño del control que se desarrolla para este tipo de motores.

Como se observa en la zona 2, se presenta el apagado del conmutador, y como esperabamos, se presenta un cambio notorio en la trayectoria de la gráfica.

En la zona 3, el conmutador se encuentra apagado, y como se observa existe un flujo de corriente aún por las espiras del rotor, que influirá fuertemente en el desarrollo del par; este punto será tratado posteriormente.

En la zona 3 es un punto de interés profundo, por el hecho de desarrollar un control que tome en cuenta esta característica particular del MRAC.

Un valor importante obtenido en la simulación, es el valor pico de la corriente que se obtiene y en este caso resulta ser de 12.1 [A], dado las características propias del motor simulado.

5.4.4 PAR

A continuación mostraremos la figura 5.9 obtenida para el par del MRAC simulado. Esta curva está determinada por las ecuaciones de motor determinadas anteriormente y que se encuentran listadas en los programas de MATLAB.

La curva obtenida fue sometida a comparación con otros tipos de simuladores, resultando ser parecida en la forma obtenida.

Los parámetros descritos por la gráfica en el eje "X" representa tiempo [s], y en el eje "Y" se presenta Newton metro [Nm]

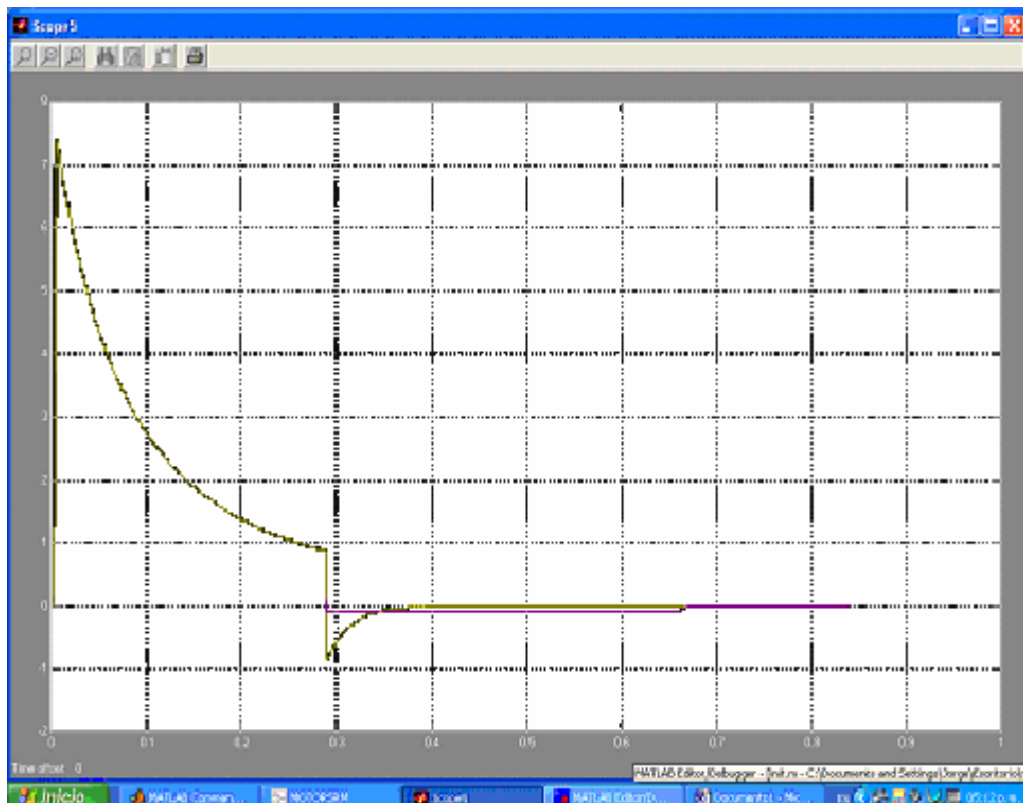


FIGURA 5.9 PAR OBTENIDO DEL MRAC

A continuación se muestra un acercamiento de la curva anterior que se puede apreciar en el figura 5.10.

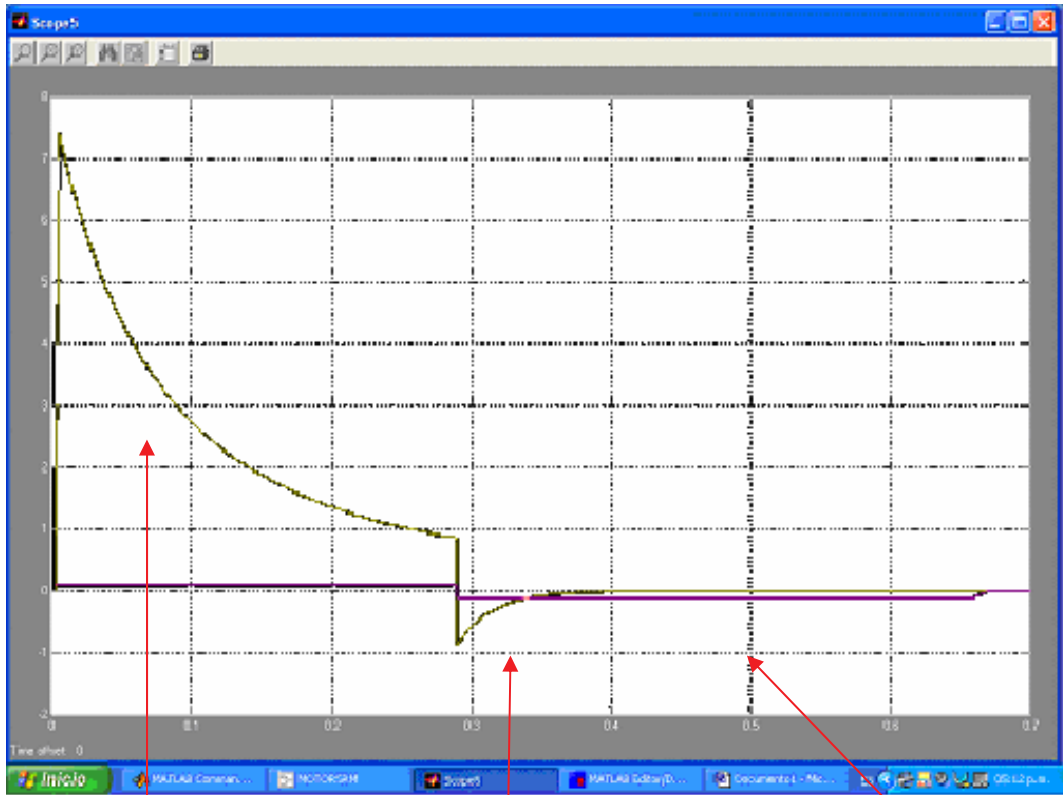


FIGURA 5.10 ACERCAMIENTO DE LA CURVA 6.9

ZONA 1

ZONA 2

ZONA 3

Entrada en funcionamiento
Del conmutador

Momento de apagado
del conmutador

Tiempo después
del apagado.

Como se puede observaren la zona 1, es el momento en que se encuentra encendido el conmutador, y la forma de onda es un poco distorsionada de la forma teórica o esperada.

En la zona 2 es el momento en que se presenta el apagado del conmutador, y tal como se esperaba, se presenta un cambio importante en la tendencia de la curva que describe el comportamiento del par.

La zona 3 es posiblemente la más importante de este punto, dado que como se puede observar, se presenta un par en sentido contrario, un tiempo después de ser apagado el conmutador, esto influye fuertemente en el desarrollo y funcionamiento del MRAC, dado que esto hace que el motor una vez apagado la fase que lo alimente, el rotor tiende a girar en sentido contrario al giro natural de funcionamiento, esto debido a la presencia de corriente en los devanados del estator, un tiempo después de ser apagado el conmutador.

Este zona es un punto de relevante importancia para ser desarrollada por el controlador, dado que este comportamiento hace que el MRAC baje su rendimiento y operación.

5.4.5 VELOCIDAD

A continuación se muestra en la figura 5.11 el resultado de la simulación para la velocidad que el MRAC presenta.

Como se podrá observar, la curva es característica del motor que se ha simulado, esto quiere decir que esta determinada en base a los datos cargados previamente.

La curva que a continuación se presenta, fue discutida y comparada en detalle con las curvas obtenida en otras simulaciones, dando como resultado valores coincidentes y semejantes, tal como se esperaba.

En el eje "X" se presenta segundos [s], y en el eje "Y" se presenta Radianes/segundo [rad/s]

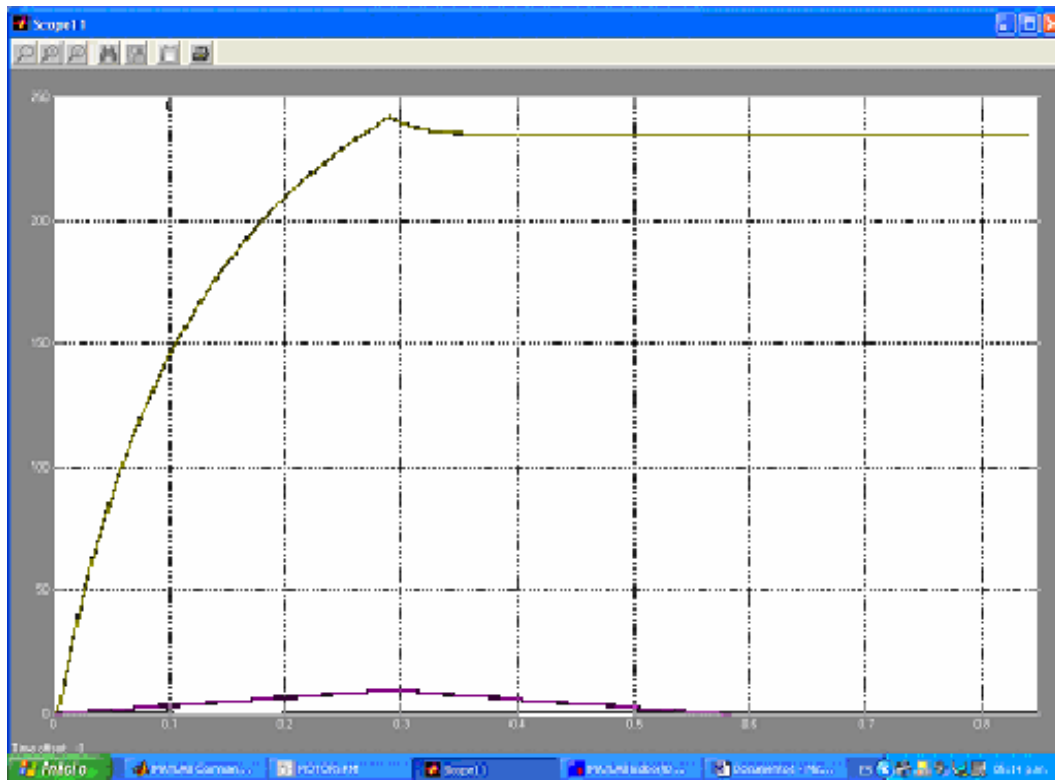


FIGURA 5.11 VELOCIDAD DEL MRAC.

A continuación se muestra en la figura 5.12 un acercamiento de la curva anterior.

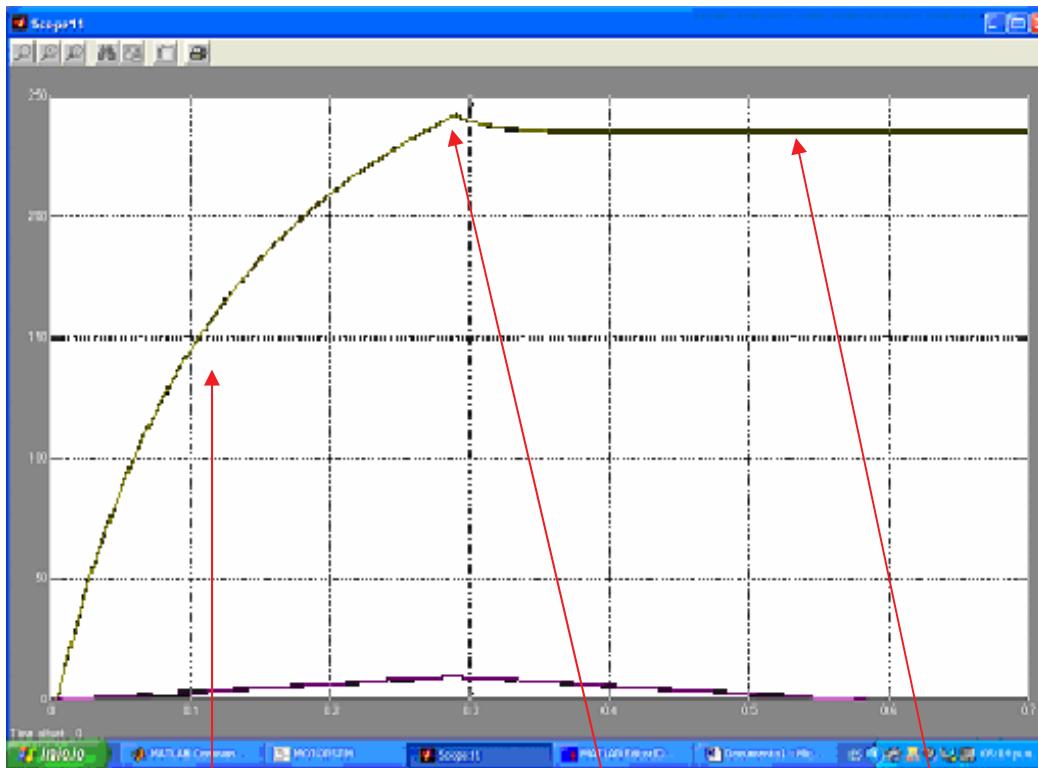


FIGURA 5.12 ACERCAMIENTO DE LA FIGURA 6.11

ZONA 1

ZONA 2

ZONA 3

Se presenta el comienzo de la conmutación

Se presenta el apagado del conmutador

Un tiempo después de apagado del conmutador.

La zona 1 representa el tiempo en que el conmutador se enciende y se empieza el funcionamiento del motor, como se observa la forma en como se comporta la velocidad que desarrollo el motor en función del tiempo.

La zona 2 representa el momento en que se apaga el conmutador, y como se puede observar existe una variación en la tendencia que la curva presenta, lo más importante es observar que los efectos de la corriente influyen en el desarrollo de la velocidad del motor, esto esta mostrado en la forma en como varía la velocidad en el momento en que es apagado el conmutador (zona 2) y esto determina claramente en el desarrollo del motor.

Esta forma de comportamiento es un reflejo de lo sucedido con la corriente y par que se comentó anteriormente.

Lo más importante que se puede obtener de la curva anterior, es poder ver que el motor que se determinó con las características propuestas puede desarrollar una velocidad de 230 [rad/seg], que es un punto importante en el desarrollo de la caracterización del MRAC en estudio.

5.5 CARACTERIZACIÓN DEL MRAC

En esta sección, se realiza la caracterización del MRAC que se está estudiando, esto con ayuda de los parámetros determinados antes de la simulación, además de los resultados obtenidos de la simulación. A continuación se hace una comparación de las características que los MRAC presentan en comparación con motores de las mismas dimensiones, pero de diferentes tipos (categorías).

5.5.1 OBTENCIÓN DE LA POTENCIA DEL MRAC.

Con los valores obtenidos podremos inferir los valores característicos propios del MRAC que simulamos.

Primero obtendremos la potencia del MRAC.

Utilizaremos la formula que proporciona la potencia en el eje de cada motor.

$$P(WATT) = \tau(N.m)\omega(rad / s)$$

Con los valores obtenidos en la simulación obtenemos:

$$P(WATT) = 7.4(N.m)230(rad / s)$$

Con lo que obtenemos $P= 1702 [W]$

Que representa $P=1.7 [kW]$.

También podemos representar la potencia del motor en HP (caballos de potencia), como se muestra a continuación.

Sabemos que $1HP=745.69 [W]$

Con lo anterior tenemos

$$P=1.7 [kW]= 2.28 HP.$$

Con los datos anteriores podremos construir la siguiente tabla de caracterización.

TABLA No 2 CARACTERIZACIÓN DEL MRAC SIMULADO

PARAMETRO	VALOR	UNIDADES
NUMERO DE FASES EN EL ESTATOR	6	-----
NUMERO DE FASES EN EL ROTOR	4	-----
MAXIMA INDUCTANCIA	.06	[H]
MINIMA INDUCTANCIA	.008	[H]
VOLTAJE DE ALIMENTACIÓN	100	[V]
CORRIENTE DE FASE	12.1	[A]
VELOCIDAD	2197 230	[r.p.m] [rad/s]
PAR	7.4	[N.m]
MOMENTO DE INERCIA	.0013	[kgm ²]
RESISTENCIA DE FASE	1.30	[Ω]
POTENCIA	2.28 1.7	[Hp] [kW]

5.6 PEQUEÑO MOMENTO DE INERCIA. (GRAN RESPUESTA DINÁMICA)

Como se podrá observar el motor de reluctancia accionado por conmutación posee un momento de inercia pequeño, esto es debido a que el rotor esta hecho de una sola pieza metálica que tiene ausencia de masa en los huecos de los dientes del rotor.

Con lo anterior se puede observar que el rotor está hecho únicamente por el eje y un conjunto de chapas o polos salientes, (no posee ningún bobinado en esta parte).

En la siguiente tabla 3 podremos observar la comparación de momentos de inercia de distintos motores eléctricos de proporciones semejantes. En este caso hablaremos de un motor asincrono normal, un motor asincrono optimizado y nuestro motor de reluctancia accionado por conmutación.

Como se observa el motor de reluctancia accionado por conmutación aventaja claramente a sus competidores.

TABLA No 3 COMPARACION DE MOMENTOS DE INERCIA DE DISTINTOS MOTORES ELÉCTRICOS DE PROPORCIONES SEMEJANTES

	MOTOR DE RELUCTANCIA ACCIONADO POR CONMUTACIÓN	MOTOR ASINCRONO (OPTIMIZADO) MODELO (ACHA 128)	MOTOR ASINCRONO (NORMAL) MODELO (1LA4180)
MOMENTO DE INERCIA	0.0013 Kgm ² 56%	.0016 Kgm ² ** 69%	.0023 Kgm ² * 100%

De la tabla anterior podemos obtener una representación gráfica para poder visualizar más fácilmente lo descrito y que se presenta en la figura 5.13:

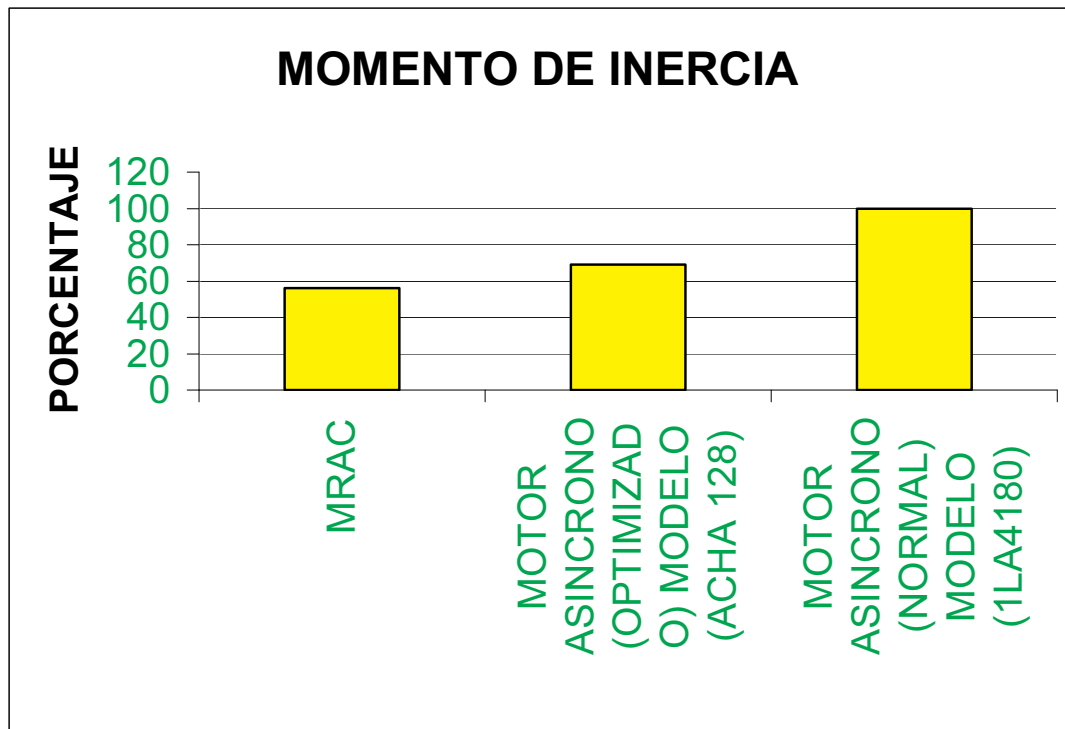


FIGURA 5.13 REPRESENTACION GRAFICA DE LOS MOMENTOS DE INERCIA

5.7 MRAC MEJOR APROVECHAMIENTO PARA BAJAS REVOLUCIONES.

En la figura 5.14 se representa el máximo par motor permitido en régimen permanente, referido respecto al momento de inercia en un intervalo de revoluciones desde 0 hasta 4200 r.p.m.

El motor de reluctancia accionado por conmutación se presenta con los parámetros inicialmente destinados para la simulación.

Si nos basamos en la curva característica par-velocidad anteriormente descrita podremos construir la curva propia del motor MRAC simulado.

Las líneas características y los valores de los motores asíncronos han sido tomados de las hojas de datos [2] y [8] proporcionados vía e-mail por grupos de investigación de los fabricantes. El volumen, dimensiones externas y el tamaño del rotor son en sus diferentes características semejantes.

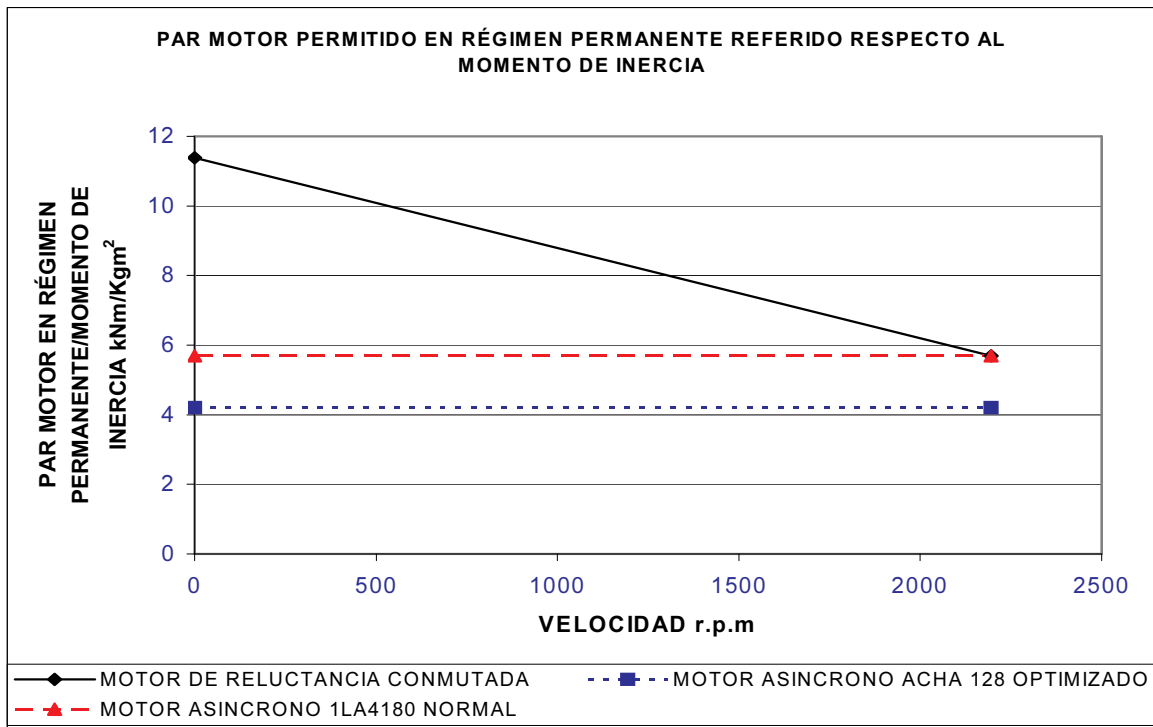


FIGURA 5.14 MÁXIMO PAR MOTOR PERMITIDO EN RÉGIMEN PERMANENTE, REFERIDO RESPECTO AL MOMENTO DE INERCIA

5.8 CONSUMO DE ENERGÍA.

Un punto importante dentro del estudio de los motores eléctricos, es el poder saber el consumo de energía eléctrica que estos tienen, como se presenta más adelante, se realiza una comparación entre los motores eléctricos más comunes con respecto al MRAC simulado, como se podrá comprender, la comparación entre motores es muy difícil, esto debido a que existe una diferencia importante entre tecnologías y formas de funcionamiento, pero la idea principal de este punto es poder visualizar en forma general el comportamiento de consumo energético entre diversos equipos de similares características, en este caso se basa principalmente en la potencia de los motores.

TABLA No 4 CORRIENTE ELÉCTRICA A PLENA CARGA DE MOTORES ELÉCTRICOS

TIPO DE MOTOR	POTENCIA [HP] [kW]	VOLTAJE DE ALIMENTACIÓN [V]	CORRIENTE [A].
MOTOR DE RELUCTANCIA ACCIONADO POR CONMUTACIÓN SIMULADO (6 POLOS EN EL ESTATOR Y 4 EN EL ROTOR)	2.28 1.7	100	12.1
MOTOR DE CORRIENTE DIRECTA.	2 1.49	120	17*
MOTOR MONOFÁSICO DE C.A	2 1.49	127	22**

* Valor obtenido de la tabla 430-147 de la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEDE-1999 Instalaciones Eléctricas [12]

** Valor obtenido de la tabla 430-148 de la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEDE-1999 Instalaciones Eléctricas[12]

A continuación se presenta una comparación en forma gráfica lo comentado anteriormente en la tabla y que se presenta en la figura 5.15.

Esto se hace con el fin de poder visualizar en forma más sencilla las ventajas que los MRAC tienen en este rubro con respecto a otros motores de características similares, el cual como se podrá observar aventaja en forma clara a su similares

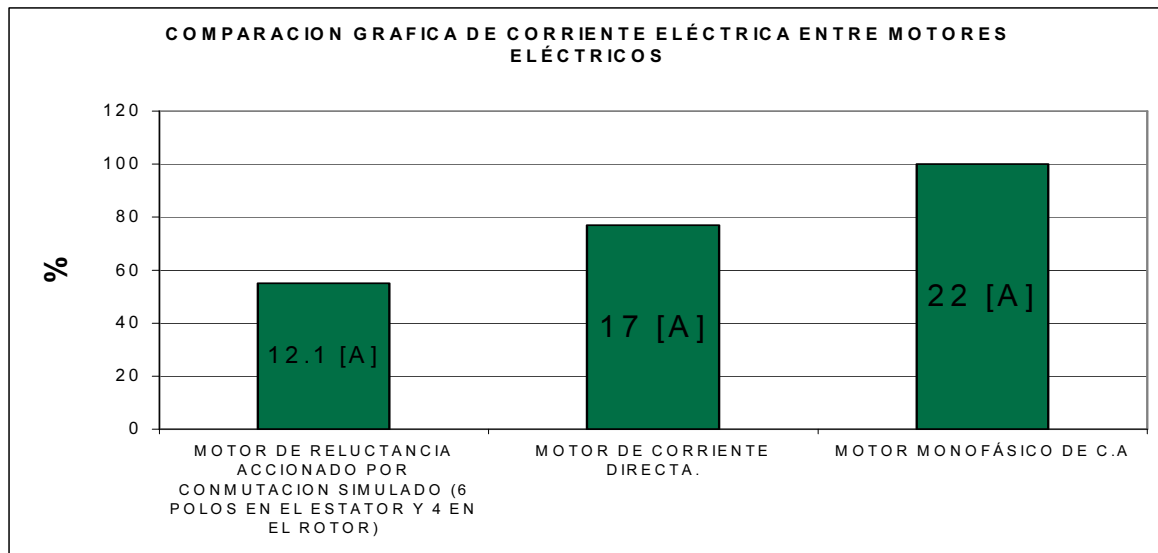


FIGURA 5.15 COMPARACIÓN GRÁFICA DE CORRIENTE ELÉCTRICO ENTRE MOTORES ELÉCTRICOS

Con la información anterior, es preciso mostrar o comparar el ahorro en \$/año que estos motores pueden darnos en comparación con los motores utilizados hoy en día.

Para obtener esta comparación se utilizó las tarifas que CFE, nos brinda en sus servicios, esto en baja y media tensión.

La comparación hecha se presenta en la tabla 5 que a continuación se presenta.

TABLA No 5 CONSUMO Y AHORRO DE ENERGÍA ENTRE MOTORES ELÉCTRICOS

TIPO DE MOTOR	POTENCIA (FUENTE DE ALIMENTACIÓN)	TIEMPO DE UTILIZACIÓN (HORAS AL AÑO)	ENERGÍA (kW-hr)	PRECIO DEL PESOS EN PESOS (\$)	CONSUMO ANUAL EN (\$)	DIFERENCIA (\$/AÑO)
MOTOR DE RELUCTANCIA ACCIONADO POR CONMUTACIÓN	1.21 kW	1560	1887.6	\$27.60	\$52,097	-----
MOTOR DE CORRIENTE CONTINUA	2.04 kW	1560	3182.4	\$27.60	\$87,834	\$35,737
MOTOR MONOFÁSICO DE CORRIENTE ALTERNA. (valores eficaces)	1.42 kW	1560	2223.7	\$27.60	\$61,376	\$9,279

* obtenida de la página en internet de CFE www.cfe.gob.mx

Como se observa el ahorro que se obtiene con el uso de MRAC, es significativo, cerca de \$36,000/año y \$10,000/año dependiendo del tipo de motor a utilizar, el cual los hace una herramienta interesante para poder ahorrar energía eléctrica.

Investigando más sobre la implementación de los MRAC en los sistemas directamente productivos, como se ha mencionado anteriormente, las lavadoras NEPTUNE de MAYTAG modelo MAH7500 , presentan un ahorro significativo de energía eléctrica, esto debido en mayor medida al motor MRAC actuante.

El ahorro que presentan es considerable, por lo anterior en los estándares para el ahorro de energía del gobierno de los Estados Unidos de América, presenta a el modelo MAH7500 como uno de los que más ahorra en su categoría.

A continuación en la figura 5.16, se presenta la hoja de especificación de ahorro de energía que se obtuvo gracias al departamento de comercialización de la empresa MAYTAG, esto vía e-mail.

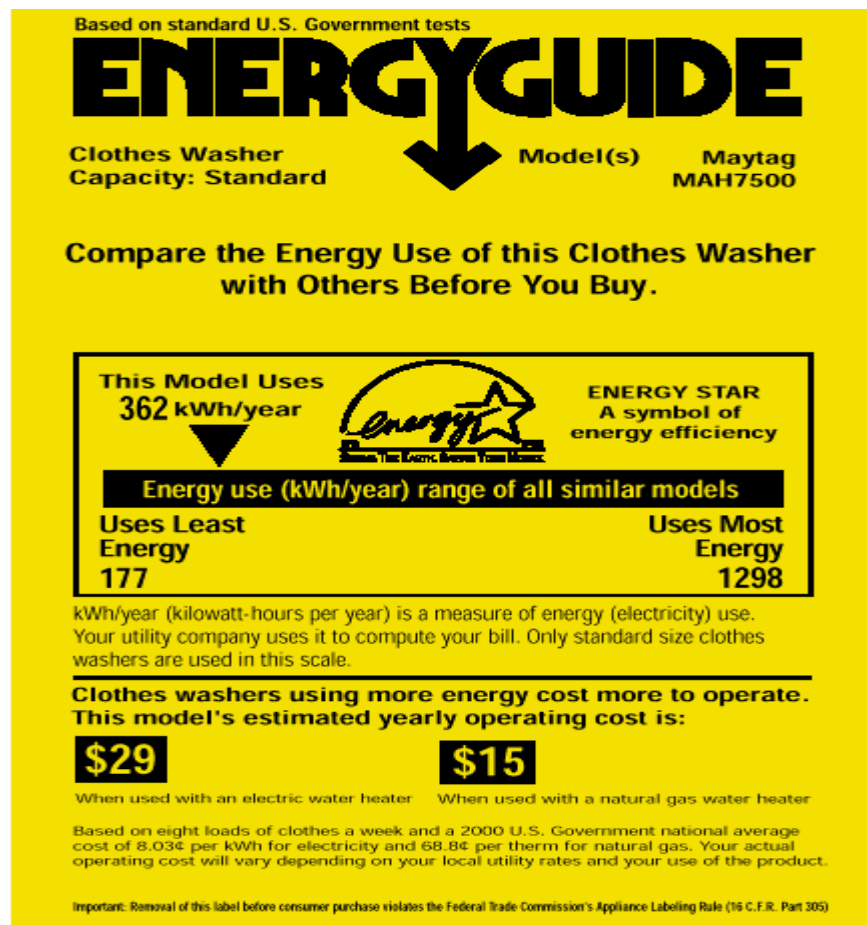


FIGURA 5.16 HOJA DE ESPECIFICACIÓN DE AHORRO DE ENERGÍA PARA EL MODELO MAH7500 DE MAYTAG

Como sabemos los estándares mencionados anteriormente, presentan una serie de normalizaciones a seguir, esto para el caso de el gobierno de los EUA.

Para el caso de México suponemos que la normalización debe de ser sin grandes variaciones, y esto esta representado por la NORMA Oficial Mexicana NOM-005-ENER-2000 [13], Eficiencia energética de lavadoras de ropa electrodomesticas. Límites, método de prueba y etiquetado. que se presenta como material anexo a este trabajo.

5.9 COSTOS EN LOS MOTORES ELECTRICOS.

Con la comparación anteriormente hecha, nos muestra la ventaja que los MRAC presenta con respecto a motores de similares características, esto nos lleva a pensar en lo siguiente ¿Los MRAC son igualmente económicos en su fabricación?.

En primera instancia nos brinca a la vista pensar que sí, pero con la siguiente comparación dará una respuesta convincente a la pregunta hecha.

La investigación que se realizó, se basó principalmente, en la consulta de precios de motores eléctricos monofásicos tanto de CA, como de CD, los datos obtenidos son para uso de menudeo exclusivamente, y se realizó con las principales distribuidoras de equipo y motores eléctricos y resultados obtenidos se presentan en la tabla 6

TABLA No 6 COSTO EN MOTORES ELÉCTRICOS

TIPO DE ALIMENTACION	MARCA	MODELO	POTENCIA	VOLTAJE DE ALIMENTACIÓN	R.P.M	COSTO
CORRIENTE DIRECTA	BALDOR	L3605T	2 HP	115 [V]	1800	\$489 UDS
CORRIENTE ALTERNA (MONOFÁSICO)	SIEMENS		2 HP	127 [V]	1800	\$1655
MOTOR DE RELUCTANCIA ACCIONADO POR CONMUTACION	EMERSON	----- DESTINADO PARA LA LAVADORA NEPTUNE DE MAYTAG (MAH 7500)	2 HP*	162[V]* EN FUENTE CONMUTADA.	500*	\$180 UDS*

* INFORMACIÓN PROPORCIONADA POR EL DEPARTAMENTO DE REFACCIONES DE MAYTAG EN LOS EUA.

Como se puede observar, el costo del MRAC es menor al motor de corriente continua, pero es más caro que el motor de corriente alterna, esto nos hace pensar ¿Realmente los MRAC tiene un mayor costo?, con la información anteriormente mostrada, nos haría pensar que sí, pero hay que resaltar, que la empresa que los fabrica (EMERSON), incluye un valor agregado esto debido al desarrollo de tecnología que han desarrollado con los MRAC.

Para poder ejemplificar lo anterior, pondremos como ejemplo aparatos electrónicos actuales, tal es el caso de los televisores de pantalla plana, al principio en su introducción, los precios eran sumamente elevados para los consumidores finales, con el tiempo y la competencia los precios se han ido bajando considerablemente para su adquisición, tal es el caso de los MRAC, que se observa que el precio es elevado pero con el tiempo esperamos que el costo baje.

5.9.1 ESTIMACION DE MANUFACTURA.

Con lo descrito anteriormente, se realizó una sencilla estimación de manufactura de un MRAC de características similares al descrito en la simulación.

La investigación se llevo a cabo pensando en lugares que sirvieran para este fin, como el caso de casas de embobinados de motores eléctricos, herrería (semi especializada).

Los datos mencionados en la tabla 7, pueden representar amplias variaciones, debido al diseño y taller de fabricación.

TABLA No 7 COSTOS DE MANUFACTURA DE UN MRAC (SIMULADO)

PIEZA	MATERIAL	COSTO
CARCAZA USADA (POLOS SALIENTES)	ACERO	\$250*
EMBOBINADO	COBRE	\$350*
ROTOR (FABRICACIÓN)	ACERO	\$400**
	SUMA	\$1,000

*precio proporcionado por taller de embobinados de motores al sur de la ciudad de México

**precio proporcionado por un taller de herrería al sur de la ciudad de México.

Como se puede observar, la elaboración artesanal de un MRAC es muy económica y viable para poder empezar a desarrollar algún tipo de investigación en nuestro país.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

En la actualidad no se dispone de un estudio profundo en nuestro país sobre el tema de los Motores de Reluctancia accionados por Conmutación (MRAC), por lo que este trabajo de tesis aporta un estudio parcial a partir de trabajos previos, experiencias además de opiniones que investigadores y grupos corporativos internacionales especializados en el ramo nos pudieron brindar.

El estudio de los Motores de reluctancia accionado por conmutación (MRAC) que se llevo a acabo en base a una simulación digital estructurada en el lenguaje de programación Matlab y simulado con Simulink, nos brinda la información con la cual podemos concluir lo siguiente.

Debido a la simplicidad física de la máquina, el momento de inercia de rotor, presenta una disminución del 44% con respecto a otros motores de tecnologías convencionales de similares características y dimensiones.

Como se puede concluir el motor de reluctancia accionado por conmutación (MRAC) presenta un pequeño momento de inercia, esto debido a que el rotor esta hecho de una sola pieza metálica que tiene ausencia de masa en los huecos del rotor.

Esto repercutirá directamente en el costo de fabricación que es un punto de suma importancia en la selección de un motor.

Ahorro en el consumo de energía eléctrica del 16% en consumos promedios con respecto a tecnologías de motores convencionales utilizados actualmente.

El ahorro de energía eléctrica anteriormente mencionado, es una señal importante para voltear la mirada a este tipo de tecnología, y brindar la oportunidad de poderse desarrollar y demostrar sus beneficios.

Ahorro en la construcción de los motores de reluctancia accionados por conmutación (MRAC) del orden del 30% con respecto a otras tecnologías convencionales funcionando actualmente.

Con la información anterior obtenemos un panorama completo de las virtudes que los MRAC nos pueden brindar, y como se puede observar, sus beneficios son potencialmente útiles para el desarrollo y economía de cualquier proceso en donde sean requeridos.

Investigando sobre este punto, pudimos encontrar que en el sector industrial (productivo-comercial) existe actualmente el desarrollo por parte de la empresa EMERSON del (MRAC), esto en estudios e implementaciones a productos electrodomésticos, tal es el caso de la lavadora de ropa marca MAYTAG modelo MAH 7500.

Como se puede observar los motores de reluctancia accionados por conmutación (MRAC) son hoy una realidad y actualmente es una opción que responde a la necesidad de ahorrar y usar eficientemente la energía eléctrica, con el fin primordial de abatir emisiones contaminantes a la atmósfera y poder prolongar la vida de los recursos no renovables.

En la sección de recomendaciones, podremos mencionar las siguientes:

Se recomienda un estudio detallado sobre los sistemas de control que sirvan para los MRAC dado que este tema es actualmente la mayor limitante para el desarrollo de esta división de máquinas eléctricas.

Esperamos que con los resultados obtenidos en este trabajo de tesis abra la puerta para que gente o grupos de investigación de México, especialmente la

UNAM, se interesen por el estudio y desarrollo de esta naciente y prometedora tecnología.

Se recomienda la construcción física de un MRAC, para comparar los resultados del modelo físico contra los resultados obtenidos en este trabajo de tesis y así poder mejor comprender las bondades y restricciones, que esta división de máquinas eléctricas presenta.

BIBLIOGRAFÍA.

[1] Buckley George W, "Switched Reluctance Motor", Emerson Electric Co. St. Louis, Missouri, 2001

[2] Catálogo "Tracción eléctrica" Siemens AG.

[3] C.R. Elliot, J.M. Stephenson et M.L. McClelland, "*Advances in switched reluctance drive systems dynamic simulation*", Proc.of EPE 1995, Vol.3

[4] Chapman, Stephen J. "Máquinas Eléctricas" McGraw Hill, Segunda Edición, Colombia 1993.

[5] DiRenzo Michael T, Texas Instruments, , "*Switched Reluctance Motor Control - Basic Operation and Example Using the TMS320F240*" SPRA420A, Febrero 2000.

[6] Dubrovsky, Hilda. "Tecnología de la electricidad", Curso latinoamericano de posgrado en economía, San Carlos de Bariloche, Argentina 1997.

[7] Franceschini G., Pirani S., Rinaldi M., Tassoni C., "*SPICE assisted simulation of controlled electric drives: an application to switched reluctance drives*", IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. IA-27, No. 6. Nov/Dic 1991

[8] Hoja de datos "Motores eléctricos" en tracción eléctrica. Elbtalwerk GmbH.

[9] J.Nascimento, L. Rolim, P. Heidrich et al, "*Design and simulation aspects of a switched reluctance drive*", Proc. of 4° Brazilian Power Conference (COBEP96).

[10] MANUAL MATLAB® ver 5.2 1990 - 1999 by The MathWorks, Inc.
<http://www.mathworks.com>

[11] MANUAL SIMULINK Dynamic System Simulation for MATLAB® ver 2.0 1990 - 1999 by The MathWorks, Inc. <http://www.mathworks.com>

[12] Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEDE-1999, Instalaciones Eléctricas (utilización), Diario Oficial de la Federación, 19 de abril de 1999.

[13] NORMA Oficial Mexicana NOM-005-ENER-2000, Eficiencia energética de lavadoras de ropa electrodomésticas. Límites, método de prueba y etiquetado. Diario Oficial de la Federación el 20 de septiembre y 29 de octubre de 1999, respectivamente.

[14] O. Ichinokuta, T. Onda, M. Kimura, T. Watanabe, T. Yanada and H.J. Guo, "*Analysis of Dynamic Characteristics of Switched Reluctance Motors Based on SPICE*", IEEE Transactions on Magnetics, Vol.34, No 4.1998

[15] P.O. Rasmussen, G. Andersen, L. Helle, J.K. Pedersen, F. Blaabjerg, "*Switched reluctance Motors drives*", IEEE Transaction on Industry Applications, 1996 (ALBORG university Denmark)

[16] Skvarenina, Wasynczuk, Krause, "*Simulation of a Switched Reluctance Generator/More Electric Aircraft Power system*", Proc, of 1996 IECEC, paper 96398

[17] Stephen J. Fedigan, Ph.D. and Charles P. Cole "A Variable-Speed Sensorless Drive System for Switched Reluctance Motors" Texas Instruments SPRA600 - October 1999

[18] Técnicas de Conservación Energética en la Industria, (Fundamentos y ahorro en operaciones). Ministerio de Industria y Energía, Madrid España 1999

[19] Wolff J, Spath, H. "*Switched reluctance motor with 16 stator poles and 12 rotor teeth*". Proceeding of the 7th European Conference on Power Electronics and Applications, Vol.3 1997

[20] X. Radun, "*Switched Reluctance Starter/Generator Modeling Results*", Proc. of SAE Aerospace Atlantic Conference, 1995, paper 951407

APENDICE I

SIMULACIÓN DE SISTEMAS DINÁMICOS CON MATLAB Y SIMULINK

INTRODUCCION:

Matlab es al mismo tiempo un entorno y un lenguaje de programación que junto a Simulink representa una herramienta elemental para el desarrollo de una simulación dinámica. Este apéndice tiene por objetivo principal introducir al modelado y simulación de sistemas dinámicos empleando Matlab.y Simulink.

Inicialmente se desarrollará la forma de trabajo de Matlab y consecuentemente la forma en como Simulink realiza su simulación.

Para el caso de Matlab, podemos fácilmente crear nuestras propias funciones y programas especiales (conocidos como archivos-M) en código Matlab. Los podemos agrupar en Toolbox: colección especializada de archivos-M para trabajar en clases particulares de problemas.

La manera más fácil de visualizar Matlab es pensar en él como en una calculadora totalmente equipada, aunque, en realidad, ofrece muchas más características y es mucho más versátil que cualquier calculadora. Matlab es una herramienta para hacer cálculos matemáticos. Es una plataforma de desarrollo de aplicaciones, donde conjuntos de herramientas inteligentes como es el caso de Simulink, nos ayuda para la resolución de problemas en áreas de aplicación específica

Entre las diversas utilidades que MATLAB presenta, se encuentran:

- ✓ Cálculo matricial y Algebra lineal.
- ✓ Polinomios e interpolación.
- ✓ Regresión.
- ✓ Ajuste de funciones.
- ✓ Ecuaciones diferenciales ordinarias.
- ✓ Integración.
- ✓ Funciones.
- ✓ Gráficos bi y tridimensionales.

MATEMATICA UTILIZADA POR MATLAB :

Aquí se muestra el entorno de trabajo con el cual Matlab opera.

VECTORES

Para crear un vector fila se utilizan corchetes dentro de los cuales los elementos deben estar separados por espacios o comas:

```
a = [1 2 3 4 5 6 9 8 7]
```

Matlab retorna:

```
a =
1 2 3 4 5 6 9 8 7
```

Nota de utilidad: si se desea que la variable creada no se muestre en pantalla, se debe ejecutar el comando con un ; final.

```
a = [1 2 3 4 5 6 9 8 7];
```

MATRICES

La creación de matrices en Matlab es similar a la de vectores (de hecho estos son un caso particular de matrices), sólo que cada fila de elementos debe separarse con un ; o *return*:

```
B = [1 2 3 4; 5 6 7 8; 9 10 11 12]
```

```
B =
```

```
1 2 3 4
```

```
5 6 7 8
```

```
9 10 11 12
```

```
B = [ 1 2 3 4
```

```
5 6 7 8
```

```
9 10 11 12]
```

```
B =
```

```
1 2 3 4
```

```
5 6 7 8
```

```
9 10 11 12
```

Matlab no tiene en cuenta los espacios.

El punto y coma al final de la línea le dice a Matlab que evalúe la línea, pero que no nos diga la respuesta.

Si la sentencia es demasiado larga para que quepa en una línea, una elipsis consistente en tres puntos (...) seguido por **Enter** indica que la sentencia continúa en la línea siguiente.

Operaciones con matrices

MATLAB puede operar con matrices por medio de **operadores** y por medio de **funciones**. Se han visto ya los operadores *suma* (+), *producto* (*) y *traspuesta* ('), así como la función *invertir* **inv()**.

Los operadores matriciales de MATLAB son los siguientes:

+ adición o suma

– sustracción o resta

* multiplicación

' traspuesta

- ^ potenciación
- \ división-izquierda
- / división-derecha
- .* producto elemento a elemento
- ./ y .\ división elemento a elemento
- .^ elevar a una potencia elemento a elemento

Estos operadores se aplican también a las variables o valores escalares, aunque con algunas diferencias

Matlab ofrece las siguientes operaciones básicas para elementos escalares:

OPERACION	SIMBOLO
Suma, a+b	+
Resta, a-b	-
Multiplicación, a*b	*
División, a%b	/ o \
Potencia, a^b	^

OTRAS CARACTERISTICAS :

A.' es la transpuesta de la matriz **A**. La transpuesta compleja conjugada de la matriz **A** se escribe como **A'**.

d=eig(A) devuelve los valores propios asociados con la matriz cuadrada **A** como un vector columna.

[V,D]=eig(A) devuelve los vectores propios en la matriz **V** y los valores propios como los elementos diagonales en la matriz **D**.

[L,U]=lu(A) calcula la factorización **LU** de la matriz cuadrada **A**.

[Q,R]=qr(A) calcula la factorización **QR** de la matriz **A**.

[U,S,V]=svd(A) calcula la descomposición en valores singulares de la matriz **A**.

rank(A) devuelve el rango de la matriz **A**.

cond(A) devuelve el número de condición de la matriz **A**.

norm(A) calcula la norma de la matriz **A**. Admite el cálculo de norma-1, norma-2,

norma-F y norma.

poly(A) encuentra el polinomio característico asociado con la matriz cuadrada **A**.

polyvalm(v,A) evalúa el polinomio característico **v** usando la matriz cuadrada **A**.

EL ESPACIO DE TRABAJO DE MATLAB:

Para comprobar el valor de una variable, hay que preguntar a Matlab por ello introduciendo su nombre a continuación del indicativo de petición de orden.

Para obtener una lista de las variables usamos la orden: **who**.

Para recordar órdenes previas, usamos las teclas de cursor del teclado.

ALMACENAR Y RECUPERAR DATOS :

Matlab puede guardar y cargar datos de los archivos del computador. En el menú **File**, la opción **Save Workspace as...** guarda todas las variables actuales; y **Load Workspace...** carga variables de un espacio de trabajo guardado previamente.

ACERCA DE LAS VARIABLES :

Por defecto, Matlab almacena resultados en la variable **ans**.

Las variables son sensibles a las mayúsculas y pueden contener hasta 19 caracteres.

Deben comenzar con una letra.

Matlab tiene algunas variables especiales:

VARIABLE	VALOR
ans	Nombre por defecto de la variable usada para los resultados
pi	Razón de una circunferencia a su diámetro
eps	Número más pequeño tal que, cuando se le suma 1, crea un número en coma flotante en el computador mayor que 1
inf	Infinito
NaN	Magnitud no numérica
i y j	$i = j = \sqrt{-1}$
realmin	El número real positivo más pequeño que es utilizable
realmax	El número real positivo más grande que es utilizable

FUNCIONES MATEMATICAS COMUNES :

A continuación se muestra una tabla con las funciones matemáticas en Matlab:

FUNCIONES MATEMATICAS ESPECIALES	
abs (x)	Valor absoluto o magnitud de un número complejo
acos (x)	Inversa del coseno
acosh (x)	Inversa del coseno hiperbólico
angle (x)	Angulo de un número complejo
asin (x)	Inversa del seno
asinh (x)	Inversa del seno hiperbólico
atan (x)	Inversa de la tangente
atan2 (x,y)	Inversa de la tangente en los cuatro cuadrantes
atanh (x)	Inversa de la tangente hiperbólica
ceil (x)	Redondea hacia más infinito
conj (x)	Complejo conjugado
cos (x)	Coseno
cosh (x)	Coseno hiperbólico
exp (x)	Exponencial
fix (x)	Redondea hacia cero
floor (x)	Redondea hacia menos infinito
imag (x)	Parte imaginaria de un número complejo
log (x)	Logaritmo natural
log10 (x)	Logaritmo decimal
real (x)	Parte real de un número complejo
rem (x,y)	Resto después de la división
round (x)	Redondea hacia el entero más próximo
sign (x)	Devuelve el signo del argumento
sin (x)	Seno
sinh (x)	Seno hiperbólico
sqrt (x)	Raíz cuadrada
tan (x)	Tangente
tanh (x)	Tangente hiperbólica

Matlab sólo opera en radianes.

NUMEROS COMPLEJOS :

Matlab sigue el convenio usual, donde un número complejo se escribe como $a+bi$. La terminología con los dos caracteres **i** y **j** sólo funciona con números simples, no con expresiones.

Las operaciones matemáticas sobre números complejos se escriben de la misma forma que con números reales.

Las funciones **real**, **imag**, **abs** y **angle** son útiles para la conversión entre las formas polar y rectangular.

OPERACIONES RELACIONALES Y LÓGICAS :

Como entradas a todas las expresiones relacionales y lógicas, Matlab considera que cualquier número distinto de cero es verdadero, y es falso si es igual a cero.

La salida produce 1 si es verdadero, y 0 si es falso.

OPERADORES CONDICIONALES :

OPERADOR	DESCRIPCION
<	Menor que
<=	Menor que o igual a
>	Mayor que
>=	Mayor que o igual a
==	Igual a
~=	No igual a

La salida de las operaciones lógicas se pueden utilizar también en operaciones matemáticas.

OPERADORES LÓGICOS :

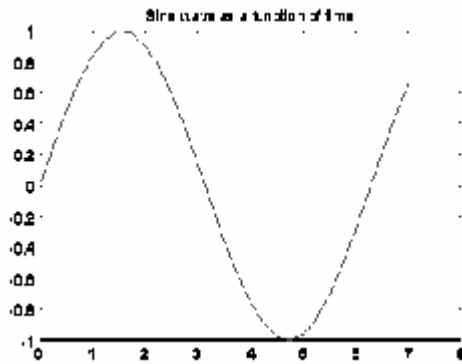
Los operadores lógicos proporcionan un medio de combinar o negar expresiones condicionales

OPERADOR	DESCRIPCION
&	AND
	OR
~	NOT

GRAFICACION

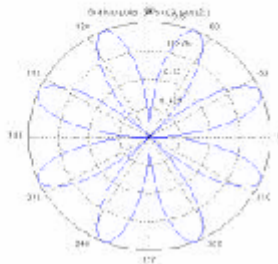
Graficar en Matlab es muy sencillo y presenta una variedad de alternativas. El comando que permite “mostrar” en una figura los elementos de una variable es *plot* (o su versión tridimensional *plot3*). Un ejemplo sencillo es:

```
t=0:0.25:7;
y = sin(t);
plot(t,y)
```



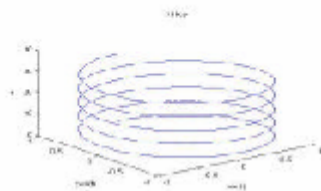
también se pueden realizar graficas polares

```
>> t=0:.01:2*pi;
>> r=sin(2*t).*cos(2*t);
>> polar(t,r)
>> title('Gráfico polar de sin(2t)cos(2t)')
```



y gráficas tridimensionales como por ejemplo:

```
>> t=0:pi/50:10*pi;
>> plot3(sin(t),cos(t),t)
>> title('Hélice'),xlabel('sin(t)'),ylabel('cos(t)'),zlabel('t')
```



APENDICE II

ELEMENTOS BÁSICOS DE SIMULINK

La biblioteca de Simulink.

Simulink proporciona un entorno gráfico al usuario que facilita enormemente el análisis, diseño y simulación de sistemas (de control, electrónicos, etc.), al incluir una serie de rutinas que resuelven los cálculos matemáticos de fondo, junto con una sencilla interfaz para su uso.

Proporciona un entorno de uso gráfico que permite dibujar los sistemas como diagramas de bloques tal y como se haría sobre un papel.

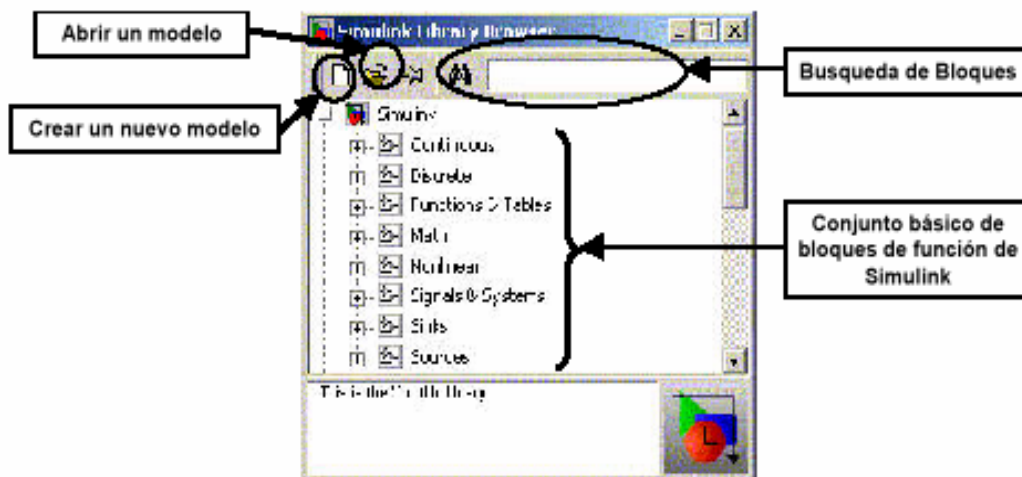
El conjunto de componentes incluidos junto al programa Simulink, incluye bibliotecas de fuentes de señal, dispositivos de presentación de datos, sistemas lineales y no lineales, conectores y funciones matemáticas. En caso de que sea necesario, se puede crear nuevos bloques a medida del usuario.

El programa Simulink se inicia desde el boton "Simulink Library Browser" (Biblioteca de Simulink) de la ventana de comandos de Matlab, o desde la línea de comandos mediante la orden:

```
>>simulink
```

Una vez iniciado el programa, el entorno de trabajo queda dividido en tres partes.

- ✓ La ventana de comandos de Matlab (Matlab command window); desde la que se puede ejecutar cualquier comando del mismo, dar valores a variables y controlar la ejecución de las simulaciones.



- ✓ La ventana de la biblioteca de Simulink (Simulink Library Browser); desde la que se seleccionan los componentes que se van a insertar el sistema a simular.
- ✓ La o las ventanas de los modelos: en las que se realizan dibujos de modelos y se realizan y controlan las simulaciones. Estas ventanas aparecen cuando se abre un modelo. para ello, se pueden utilizar los botones de la ventana de la librería de Simulink.

Todos los componentes básicos de Simulink, se pueden encontrar en su biblioteca de componentes. A continuación se describe los componentes básicos de la biblioteca de Simulink.

Continuous: Bloque que puede ser representado como una función continua del tiempo.

Derivative: La salida del bloque corresponde con la derivada de la entrada.

Integrator: La salida del bloque corresponde con la integral de la entrada. Los parámetros del bloque permiten controlar el valor inicial de la salida, así como la existencia de límites superiores e inferiores en la salida.

Transfer Fcn: Permite expresar una función de transferencia mediante su expresión en la variable compleja s . Sus parámetros son los polinomios del numerador y del denominador de la función, expresados con valores fila.

Transport Delay: La salida del bloque corresponde con la entrada del mismo retrasada una cantidad de tiempo, que se fija como parámetro en el bloque.

Zero-pole. Función de transferencia expresada en función de ganancia en régimen permanente, y la visualización de los polos y ceros del sistema.

Math: Bloques que realizan operaciones matemáticas sobre las entradas.

Abs: Calcula el valor absoluto de su entrada.

Gain: Aplica una ganancia constante a la entrada.

Math Function: Este bloque incluye la mayor parte de las funciones matemáticas típicas, con la excepción de las funciones trigonométricas.

Product: Calcula el producto escalar de sus entradas. Un parámetro del bloque permite regular el número de entradas del mismo.

Sing: Calcula el signo de la entrada +1 indica positivo, -1 negativo y 0 valor nulo.

Sum: Calcula la suma de todas las entradas, y si estas deben ser invertidas antes de la suma. Ejemplo: un valor para el parámetro "++-+" indicaría que el bloque tiene 4 entradas, y la tercera de ellas debe ser invertida antes de sumarse.

Trigonometric Fuction: En este bloque se incluyen todas las funciones trigonométricas típicas.

Nolinear: Bloque no lineal.

Dead Zone: Incluye una zona muerta en el sistema, centrada en torno a cero. El sistema no responde ante estos valores. La magnitud de la zona muerta puede ser modificada, y echa asimétrica por medio de los parámetros del sistema.

Relay: La salida pasa al estado on=1 cuando la entrada supera un valor umbral, y a un estado off=0 cuando cae por debajo del valor umbral distinto. El estado inicial es off.

Saturation. La señal de salida no se rebasa un valor umbral, configurable con los parámetros del bloque.

Switch.: Una entrada del sistema permite escoger cual de las entradas se presenta en la salida.

Signal & Systems: Manejo de sistemas y señales.

Subsystems: Permite la realización de sistemas jerárquicos. Al abrir el subsistema, nos permite incluir en su interior, nuevos bloques constructivos, e incluso anidar nuevos subsistemas.

In1: Por defecto un subsistema no contiene entradas. Por cada entrada que se desee añadir se le debe incluir uno de estos bloques.

Out1 :Por defecto un subsistema no contiene salidas. por cada entrada que se desee añadir se le debe incluir un de estos bloques.

Mux: Permite la inclusión de un conjunto de señales en una única línea de transmisión (que transmite datos vectoriales). Parámetros número de entradas, admite tanto entradas escalares como vectoriales.

Demux; permite la descomposición de los datos puesto en forma vectorial en una línea mediante un multiplexor. Parámetros, número de de salidas.

Data store memory: define una variable del entorno de trabajo que se va a usar como lugar de almacenamiento de datos útil para evitar tener que hacer conexiones complejas que compliquen el diagrama de bloques que se está usando.

Data Stores Read: lee el valor actual de una variable de almacenamiento, que debe estar previamente definida mediante el bloque Data Store Memory.

Data Store Write: Cambia el valor actual de una variable de almacenamiento que debe estar previamente definida mediante un bloque Data Store Memory.

Sinks: Sumideros de señales.

Display: Representa numéricamente el valor de una variable.

Scope: Representa gráficamente la evolución en el tiempo de una variable.

To Workspace: Guarda el valor de la señal de una variable del entorno de trabajo del Matlab. Se puede escoger el nombre de la misma, y limitar su tamaño.

To File: Guarda en un fichero de tipo ".mat" los datos de la señal de entrada al bloque.

Stop Simulation: Detiene la simulación si el valor de la entrada es distinto de 0.

Sources:Fuentes de Señales

Chirp Signal. Genera una señal senoidal, modulada en frecuencia, entre un valor inicial y un valor final.

Clock: tiempo que se leva de simulación.

Constant: Proporciona una señal de valor constante.

From Workspace. Proporciona una secuencia de datos tomadas del entorno de trabajo del Matlab. La variable elegida debe contener una matriz indicando los valores de la señal, y los instantes en los que la señal toma estos valores.

From File: Proporcionan datos tomados de un fichero ".mat" en el que debe estar el valor de la variable, junto a los instantes de tiempo en que toma cada valor.

Pulse Generator. Genera una onda cuadrada, de la que se puede controlar la amplitud, el periodo y el tiempo de duty (relación entre el tiempo que la onda toma su valor máximo y el tiempo en que toma el valor mínimo).

Ramp: Genera una señal de tipo rampa.

Random Number. Genera números aleatorios distribuidos según una función normal.

Signal Generator. Simula un generador de señales electrónico, permitiendo generar ondas dientes de sierra, ondas cuadradas y senoidales.

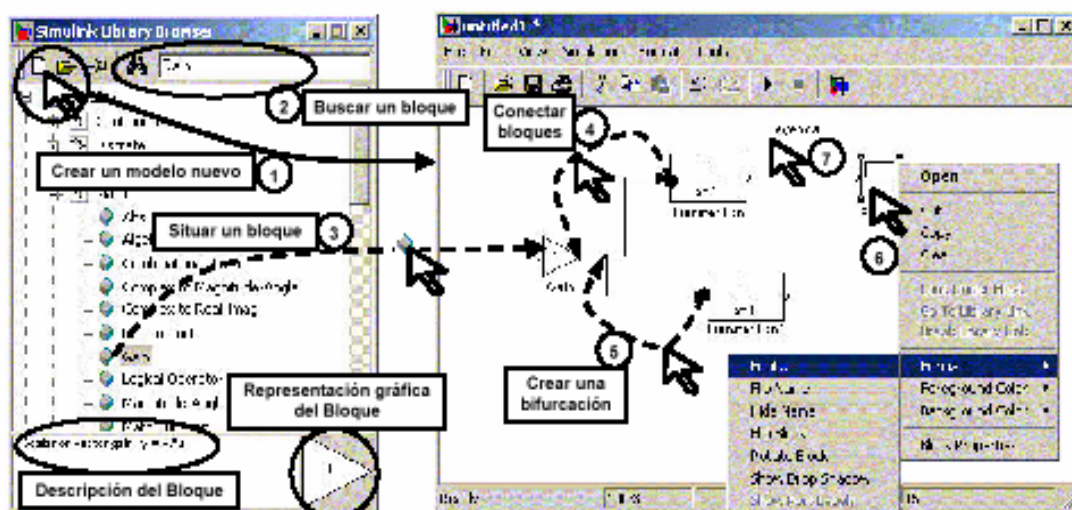
Sine Wave: Generador de ondas senoidales.

Step: Genera una señal de tipo escalón.

Uniform Random Number. Genera números aleatorios distribuidos según una función uniforme.

Creación de un modelo.

Para simular un sistema, se deben insertar en las ventanas de simulación los distintos componentes con los que se va a construir el modelo. SE pueden seguir los siguientes pasos:



- 1) Crear un nuevo modelo: Para abrir una ventana de simulación se debe pulsar el botón "nuevo modelo".
- 2) Buscar un bloque: Se puede buscar un bloque expandiendo el árbol de la biblioteca o buscando directamente por su nombre en la ventana de búsqueda. En este caso, si hay más de un bloque que pueda corresponder a ese nombre, irán apareciendo a medida que se pulsa la tecla "enter".
- 3) Situar un bloque: Para situar a un bloque, se mantiene pulsado el botón izquierdo del ratón sobre el icono en forma de rombo que hay junto al nombre del bloque y se arrastra hacia la posición deseada en la ventana de simulación.
- 4) Conectar bloques: En cada bloque, los puntos de salida aparecen indicados mediante una flecha saliente del bloque ">", mientras que los puertos de entrada de cada bloque se indican con una flecha entrante al mismo ">". Se conecta la entrada de un bloque a la salida del otro, manteniendo pulsado el botón izquierdo del ratón mientras se arrastra desde el símbolo de entrada de uno de los bloques hacia el de salida de otro o viceversa.
- 5) Crear una bifurcación: Si se desea llevar la salida de un bloque a la entrada de mas de uno se necesita crear una bifurcación en la conexión. Para hacerlo, se arrastra con el

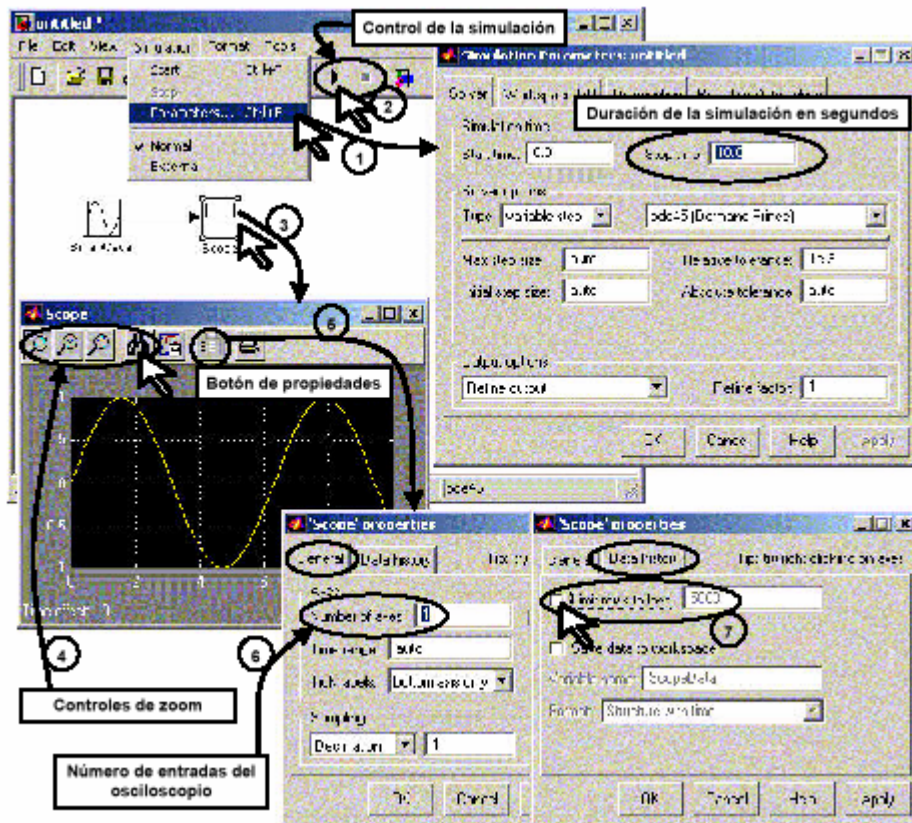
ratón desde la entrada del nuevo bloque a conectar hasta la línea de la conexión que se va a bifurcar.

- 6) Modificar los bloques: Se pueden rotar o aplicar simetrías a los bloques usados, según convenga la colocación de entradas/salidas para el esquema que se esté realizado pulsando sobre él botón derecho del ratón y utilizando los menús desplegables o mediante la opción "Formar" del menú principal ("Format/Flip Block", "Format/Rotate Block", etc.) También mediante los menús o haciendo doble click sobre el bloque, se pueden modificar sus parámetros.
- 7) Inserción de textos: Se puede incluir un texto aclaratorio o informativo en cualquier parte de la ventana del modelo, haciendo doble click en la zona libre y escribiendo directamente el texto.

También se pueden cambiar los nombres y posiciones de los bloques que se empleen para la simulación antes o después de conectarlos. Asimismo los enlaces de las conexiones pueden moverse o modificarse para eliminar cualquier elemento basta con seleccionarlo con un click y eliminarlo con la tecla "sup." o "delete", o utilizar algunos de los menús.

Conviene guardar ("File/Save as") periódicamente el modelo, incluso antes de terminarlo, para evitar perder el trabajo realizado.

Un ejemplo trivial incluiría la selección de dos componentes: "Simulink/Sources/SineWave" y "simulink/Links/Scope" de la ventana "Simulink Library Browser", y el arrastre de los mismos hasta la ventana de dibujo. En el caso de nuestro ejemplo básico, para conectar el generador de señales y el osciloscopio, simplemente se debe situar el ratón sobre el punto de salida del generador, pulsar el botón izquierdo, arrastrar el ratón hasta el punto de entrada del osciloscopio y soltar el botón del ratón.



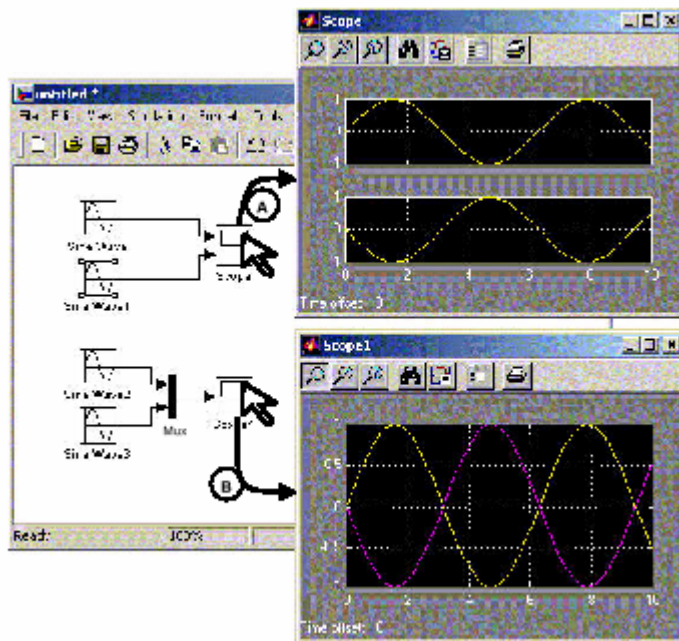
Control de la simulación y visualización de resultados.

Antes de poder ejecutar la simulación, es necesario seleccionar los parámetros apropiados para la misma (1). Desde el menú: "Simulation/Parametres", se puede desplegar un cuadro de dialogo, en el que se controlan parámetros de la simulación de entre los cuales el que se modifica más habitualmente es el tiempo final de la simulación. (Otros parámetros accesibles son el tiempo de inicio de la simulación, el método matemático que se empleará para llevarla a cabo, o las variables que se tomarán/guardarán de/en el espacio de trabajo). La simulación se puede poner en marcha o detener mediante el menú anterior o los botones de la ventana (2).

Para visualizar los resultados de la misma son muy útiles los bloques que se encuentran en el grupo "Sinks" de la biblioteca de Simulink. De entre ellos, quizá el más útil es el bloque "Scope" que simula el comportamiento de un osciloscopio. Tras realizar una

simulación se pueden ver los resultados que ha registrado haciendo un doble click sobre él (3). Para ver correctamente los resultados se utilizan los controles de zoom (4), siendo conveniente pulsar siempre tras una simulación el botón de autoescala (el de los binoculares) para ver el total de los datos registrados. los otros tres botones de zoom permiten respectivamente ampliar un área señalada con arrastre del ratón, ampliar el eje "X" de la misma manera o ampliar el eje "Y".

El bloque "Scope" tiene una serie de propiedades a las que se accede a través del botón correspondiente de la ventana "Scope" (5). Dos de las más útiles son la que permite elegir el número de entradas que se desean para el osciloscopio (6) "Number of axes" (que será también el número de gráficos que representará) y la que determina si el osciloscopio almacena todos los datos de la simulación o sólo los últimos obtenidos (7) "Limits rows to last". Respecto a este último control, es conveniente eliminar la marca "♦" del cuadrilátero blanco para que el osciloscopio mantenga todos los datos registrados durante la simulación completa.



- Si se desea visualizar más de una señal en un osciloscopio, existen dos posibilidades:
- A) Aumentar el número de entradas del osciloscopio como se comentó anteriormente.
 - B) B) Utilizar un bloque "Mux" para que ambas señales aparezcan en el mismo gráfico.