



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Facultad de Ciencias de la Electrónica

Maestría en Ingeniería Electrónica, Opción Instrumentación  
Electrónica

**Tesis para obtener el grado de:**

Maestro en ingeniería electrónica

---

**“Accionamiento eléctrico para un motor de inducción para alta eficiencia con estimación de la velocidad”**

---

Presenta:

Saúl Rodríguez Báez\*

Asesor: Dr. Gerardo Mino Aguilar

Co-asesor: Dr. Germán Ardul Muñoz Hernández

\*Becario CONACYT

PUEBLA, PUEBLA 31/01/2023

# Agradecimientos

*Agradezco al Consejo Nacional de Ciencias y Tecnología (CONACyT) por el apoyo económico que ha hecho posible la conclusión de mis estudios y del trabajo presentado. También agradezco a la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP), a la Facultad de Ciencias de la Electrónica (FCE), a la Maestría en Ingeniería en Electrónica por prestar todas las facilidades durante mi formación académica, a la Vicerrectoría de Investigación y Estudios de Posgrado (VIEP) por la beca otorgada para realizar la estancia fuera de México, por último pero no menos importante, al centro de investigación Motion Control and Industrial Application (MCIA) de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) por recibirme y brindarme los recursos técnicos para realizar mi estancia en España.*

*Mi reconocimiento y agradecimiento a mis directores de tesis: Dr. German Ardul Muñoz Hernández Y Dr. Gerardo Mino Aguilar por darme la oportunidad de participar en su proyecto de tesis, dándome asesoría, brindarme su tiempo tan valioso a pesar de su apretada agenda, gracias por transmitirme un poco de su conocimiento y facilitarme el acceso a los recursos necesarios para realizar el proyecto, gracias por hacer más fácil la comunicación a pesar de las dificultades por el nuevo modelo de trabajo a distancia debido a la pandemia. Gracias por su valiosa labor de orientarme de principio a fin durante este proyecto realizado.*

*Así también, agradecer a mis sinodales: Dr. Aldrin Barreto flores, Dr. Salvador E. Ayala Raggi y la Dr. Josefina Castañeda Camacho por sus comentarios y sugerencias sobre mis avances de tesis, ya que todo fue tomado en cuenta para mejorar. Gracias por su respeto y tolerancia.*

*Gracias a la plantilla de profesores de la maestría en ingeniería electrónica, opción instrumentación electrónica de la FCE por brindar sus cursos de manera tan profesional y siempre enfocados a dar lo mejor de sí. En especial a la M.C. Ana María Rodríguez Domínguez por brindarme su apoyo en los trámites de ingreso a la maestría, siempre tan amable y respetuosa haciendo todo más sencillo. Gracias al Dr. Alejandro Paredes Camacho por facilitar todo para realizar la estancia en MCIA; por recibirme tan bien y hacerme sentir como en casa, gracias por sus consejos, observaciones y charlas.*

*Gracias a Dios y a la vida, gracias a mis padres Vale y Trini por ser mi soporte en todo momento, gracias por su apoyo incondicional, por sus consejos y regaños, por guiarme siempre con amor, por su ejemplo de salir adelante con trabajo y esfuerzo, Gracias a mi novia Katy por apoyarme en todo momento, por siempre confiar en mis capacidades, por tus palabras de aliento, el tiempo brindado y esfuerzo que hiciste para quitarme obstáculos durante estos dos años de estudio, por tu amor y compañía incondicional, gracias a mis hermanos: Martha, Oscar y Arleth por apoyarme como siempre, por sus consejos, por hacerme la vida más divertida.*

# Dedicatoria

*A mis padres por brindarme educación a pesar de todas las dificultades que enfrentaron y que se note que su gran esfuerzo no fue en vano.*

*Quiero agradecer a mi novia Katy por su invaluable apoyo, su tolerancia y comprensión para que siguiera estudiando, cambiar días y tardes de distracción por tardes de estudio y trabajo, por aplazar nuestros planes para cumplir mis objetivos, gracias mi vida.*

*A mis hermanos Martha y Oscar porque siempre han sido mi ejemplo para seguir; a mi hermana menor Arleth para ser un ejemplo bueno para ti y a mis chicas picus: Mely, vale y aurora.*

*A mi abuelita Nachita por ser una mujer tan buena e inteligente que a pesar de las dificultades que la vida te ha presentado, supiste sacar adelante a tu familia.*

*A mis suegros; don Alfredo y Doña Adriana por brindarme un espacio en su casa cuando necesitaba tomar clases y apoyarme con el tiempo que a veces tenía justo.*

*A mis compañeros y amigos de maestría por acompañarme durante esta aventura, ser buenos estudiantes, buenos seres humanos y brindarme apoyo cuando necesité, especialmente a mi compita Manolo, a mi tocayo Saul, Adriana, Yaro, Efra, Alex, Osberto, Juan, Omar, Eric, Mike, Lalo.*

*Y a mis amigos de la carrera que sin ellos tampoco hubiera sido posible esto: Andrés, Yered, Poncho, Diego, Carlos, Sergio y nuevamente Manolito gracias por su amistad, deseándoles siempre lo mejor en la vida.*

## Índice

Capítulo 1. Introducción .....	11
1.1. Prólogo .....	11
1.2. Objetivos .....	17
1.2.1. General .....	17
1.2.2. Particulares.....	17
1.3. Justificación .....	17
1.4. Descripción .....	18
1.5. Diagrama de bloques .....	19
1.6. Resumen.....	19
Capítulo 2. Estado del arte .....	20
2.1. Antecedentes históricos.....	23
2.2. Control vectorial <i>directo</i> .....	24
2.2. Eficiencia de los motores de inducción trifásicos tipo jaula de ardilla .....	25
2.3. Trabajos similares.....	31
Capítulo 3. Marco teórico .....	33
3.1. Clasificación de los motores eléctricos .....	33
3.2. Motor de inducción tipo jaula de ardilla.....	35
3.3. Tipos de controles en el motor de inducción tipo jaula de ardilla.....	37
3.3.1. Control escalar .....	37
3.3.2. Control directo de torque .....	38
3.4. Modelo ideal del motor de inducción .....	38
3.5. Flujos electromagnéticos giratorios .....	41
3.6. Transformada de Clarke .....	42
3.7. Modelo matemático $\alpha$ - $\beta$ del MITJA .....	43
3.8. Transformada de Park .....	46
Capítulo 4. Desarrollo.....	49
4.1. Diagrama unifilar y gráfica de coordinación de protecciones.....	50
4.2. Modelo en Simulink de Matlab .....	53
4.2.1. Transformada de Park .....	55
4.2.2. Regulador de velocidad.....	55

4.2.3.	Regulador de flujo .....	56
4.2.4.	Regulador corriente $i_q$ .....	56
4.2.5.	Regulador de corriente $i_d$ .....	57
4.2.6.	Transformada inversa de Park .....	57
4.2.7.	Cálculo de pérdidas .....	58
4.2.8.	Lazo de optimización de eficiencia.....	58
4.3.	Diagrama de bloques de la bancada .....	59
4.4.	Cálculo de protección para motores .....	61
4.4.1.	Datos conocidos .....	61
4.4.2.	Máximos ajustes permitidos por el National Electrical Code (NEC, EUA).....	61
4.5.	Diagrama eléctrico .....	62
4.6.	Metodología .....	63
4.7.	Control escalar del motor de inducción con el variador de frecuencia .....	64
4.7.1.	Puesta en marcha con KP500 .....	66
4.7.2.	Interfaz con KP-232 .....	68
4.8.	Control vectorial del motor de inducción con la dSPACE.....	72
4.9.	Control vectorial en Simulink .....	89
Capítulo 5.	Resultados de las pruebas experimentales y simuladas .....	90
5.1.	Control escalar con variador Bonfiglioli .....	90
5.2.	Control vectorial directo con optimización de eficiencia en Simulink .....	91
5.3.	Control vectorial del motor de inducción con MATLAB y dSPACE.....	99
5.3.1	Arranque en escalón 100 RPM.....	100
5.3.2	Arranque en escalón 500 RPM.....	101
5.3.3	Arranque en escalón 1400 RPM.....	102
5.3.4	Arranque en rampa 1400 RPM.....	105
Conclusiones	.....	107
Trabajos futuros	.....	108
Referencias	.....	108

## Índice de tablas

Tabla 1.- Tipo de motores y sus aplicaciones.....	11
Tabla 2. Comparativa de motores de corriente directa vs motores de corriente alterna.....	22
Tabla 3. Eficiencia nominal a plena carga en porciento [21] .....	28
Tabla 4. Clasificación de las pérdidas en tres motores de distinta potencia [19].....	30
Tabla 5. Descripción de la bancada.....	59
Tabla 6. Valores nominales del motor .....	67
Tabla 7. Datos de la gráfica de corriente .....	103
Tabla 8. Datos de la gráfica de torque .....	103
Tabla 9. Datos del motor de inducción tipo jaula de ardilla 0.37 kW .....	103
Tabla 10. Comparativa .....	106

## Índice de figuras

Figura 1.- Esquema del estator de un MITJA [1] .....	14
Figura 2.- Rotor de un motor de jaula de ardilla [1].....	15
Figura 3.- Diagrama de vectores del eje q, d [5] .....	15
Figura 4.- Diagrama de bloques del proyecto .....	19
Figura 5.- Consumo de energía eléctrica, estimado por sector de utilización [20].....	25
Figura 6.- Principales acuerdos y normas de EE de motores eléctricos en el mundo [20] .....	27
Figura 7.- Clasificación de los motores eléctricos [23] .....	34
Figura 8.- Motor de inducción tipo jaula de ardilla [24].....	35
Figura 9.- Estator del motor de inducción tipo jaula de ardilla [24] .....	36
Figura 10.- Laminas del rotor del motor de inducción tipo jaula de ardilla [24].....	36
Figura 11.- Rotor del Motor de inducción tipo jaula de ardilla [24].....	37
Figura 12.- Control escalar [16] .....	37
Figura 13.- Control directo de par [16].....	38
Figura 14.- Modelo por fase de un motor de inducción [22] .....	39
Figura 15.- Flujos magnéticos a-b-c.....	41
Figura 16.- Eje de referencia a-b-c y eje de referencia $\alpha$ - $\beta$ .....	43
Figura 17.- coordenadas Alpha-beta del estator y del rotor .....	44
Figura 18.- Ejes giratorios d-q.....	47
Figura 19.- Transformada a-b-c a $\alpha$ - $\beta$ .....	48

Figura 20.-	Transformada $\alpha$ - $\beta$ a dq.....	48
Figura 21.-	Transformada dq a $\alpha$ - $\beta$ y de $\alpha$ - $\beta$ a abc.....	49
Figura 22.-	Diagrama unifilar para protección del motor de inducción.....	50
Figura 23.-	Grafica de coordinación de protecciones.....	52
Figura 24.-	Modelo del control vectorial directo en Simulink.....	54
Figura 25.-	Transformada de Park en Simulink.....	55
Figura 26.-	Regulador de velocidad.....	55
Figura 27.-	Regulador de flujo.....	56
Figura 28.-	Regulador corriente iq.....	56
Figura 29.-	Regulador de corriente id.....	57
Figura 30.-	Transformada inversa de Park.....	57
Figura 31.-	Cálculo de pérdidas.....	58
Figura 32.-	Lazo de optimización de eficiencia.....	58
Figura 33.-	Diagrama de bloques de la bancada de los motores.....	59
Figura 34.-	Diagrama eléctrico de protecciones del motor.....	62
Figura 35.-	Metodología de los experimentos.....	63
Figura 36.-	Placa de datos del motor.....	64
Figura 37.-	Variador Bonfiglioli Vectron ACTIVE ACT400.....	65
Figura 38.-	Unidad de control KP-500.....	65
Figura 39.-	Puesta en marcha del variador.....	66
Figura 40.-	Consigna de datos del motor.....	66
Figura 41.-	Consigna PAidE.....	67
Figura 42.-	Función de seguridad.....	67
Figura 43.-	Mensaje de listo.....	68
Figura 44.-	KP-500 run y stop.....	68
Figura 45.-	Interfaz KP-232.....	69
Figura 46.-	Puesta en marcha de la bancada con unidad de control e interfaz KP-232.....	69
Figura 47.-	Reconocimiento del dispositivo.....	70
Figura 48.-	Parametrización de datos del motor.....	70
Figura 49.-	Comunicación exitosa.....	71
Figura 50.-	Interfaz gráfica editable para el motor.....	71
Figura 51.-	dSPACE módulo de periféricos, I/O analógicas y digitales.....	72
Figura 52.-	Control vectorial en Simulink y dSPACE.....	73

Figura 53.-	Módulo ADC dSPACE .....	73
Figura 54.-	Módulos ADC y encoder de dSPACE .....	74
Figura 55.-	Escala de Corrientes de entrada.....	74
Figura 56.-	Escala de lectura de velocidad y posición .....	75
Figura 57.-	Módulo del PWM dSPACE .....	75
Figura 58.-	Generación del SVM para el módulo PWM.....	76
Figura 59.-	Configuración frecuencia del PWM.....	76
Figura 60.-	Activación del enable y breaking resistance del inversor .....	77
Figura 61.-	Parámetros de simulación.....	77
Figura 62.-	Solver .....	78
Figura 63.-	Advanced.....	79
Figura 64.-	Real-Time-Workshop.....	79
Figura 65.-	Construcción del modelo .....	79
Figura 66.-	Consola de Simulink con mensaje de éxito .....	80
Figura 67.-	Nuevo layout .....	80
Figura 68.-	Cargar Aplicación.....	81
Figura 69.-	Carga de descriptor del Sistema.....	82
Figura 70.-	Guardar el archive layout.....	83
Figura 71.-	Model Root.....	83
Figura 72.-	Interfaz gráfica en ControlDesk.....	83
Figura 73.-	Nuevo experimento.....	84
Figura 74.-	Archivo guardado .....	84
Figura 75.-	Vinculación de variables.....	85
Figura 76.-	Carpeta del proyecto.....	85
Figura 77.-	Interfaz 1 .....	86
Figura 78.-	Interfaz señales de control.....	86
Figura 79.-	Banda del motor y sondas de corriente .....	87
Figura 80.-	Bus DC e inversor .....	87
Figura 81.-	Comunicación por fibra óptica .....	88
Figura 82.-	dSPACE y ordenador.....	88
Figura 83.-	Maqueta completa del control.....	89
Figura 84.-	Modelo del control en Simulink .....	89
Figura 85.-	Corrientes en el estator del motor .....	90

Figura 86.-	Voltajes en el estator .....	91
Figura 87.-	Voltaje en el estator .....	92
Figura 88.-	Zoom de la figura 2.....	92
Figura 89.-	Velocidad real VS velocidad de referencia.....	92
Figura 90.-	Zoom de la figura 4.....	93
Figura 91.-	Torque de referencia VS torque real.....	93
Figura 92.-	Corriente en el estator .....	94
Figura 93.-	Voltaje en el estator sin optimización de eficiencia.....	94
Figura 94.-	Corriente en el estator .....	95
Figura 95.-	Velocidad real VS velocidad de referencia sin optimización de eficiencia.....	95
Figura 96.-	Torque real VS torque de referencia.....	96
Figura 97.-	Corriente en el estator zoom .....	97
Figura 98.-	Flujo magnético en el rotor .....	97
Figura 99.-	Flujo magnético en el rotor zoom .....	98
Figura 100.-	Arranque en escalón de 10 rpm a 80 rpm.....	98
Figura 101.-	parámetros generales de la nueva velocidad .....	99
Figura 102.-	Corrientes, velocidad y torque a 100 rpm.....	100
Figura 103.-	Flujo estático y señales de control.....	101
Figura 104.-	Corriente, velocidad y torque a 500 rpm .....	102
Figura 105.-	Corriente, velocidad y torque a 1400 rpm .....	102
Figura 106.-	Comparación de la eficiencia con control y sin control a 3 diferentes velocidades	104
Figura 107.-	Corriente, velocidad y torque en arranque en rampa a 1400 rpm .....	105



## Capítulo 1. Introducción

### 1.1. Prólogo

En general el ahorro de energía es de mucha importancia para las actuales y nuevas generaciones, es tiempo de hacer un cambio en los malos hábitos que repercuten en el aumento del consumo energético, sin embargo, si vamos a fondo de la problemática, los principales consumidores de la energía eléctrica son las industrias, por esta razón se debe trabajar en este tema. Los motores eléctricos en general son los principales consumidores, en el caso más específico los motores de inducción tipo jaula de ardilla.

*Tabla 1.- Tipo de motores y sus aplicaciones*

<b>Tipo</b>	<b>Nombre</b>	<b>Aplicación</b>
CD	Motores en conexión serie	El inducido y el devanado inductor o de excitación van conectados en serie. La conexión forma un circuito en serie en el que la intensidad es absorbida por el motor al conectarlo a la red es la misma, tanto para la bobina conductora (del estator) como para la bobina inducida (del rotor). El voltaje aplicado es constante mientras que el campo de excitación aumenta con la carga.
CD	Motores en conexión paralelo o shunt	Cuyo bobinado inductor principal está conectado en derivación o paralelo con el circuito formado por los bobinados inducido e inductor auxiliar. En este tipo de motores la velocidad se mantiene prácticamente constante para cualquier carga. De toda la corriente absorbida por el motor, una parte circula por las bobinas inducidas y la otra por la inductoras.
CD	Motor de excitación independiente	Obtienen la alimentación del rotor y del estator de dos fuentes de tensión independientes. El campo del estator es constante al no depender de la carga del motor, y el par de fuerza es prácticamente constante también. Las variaciones de velocidad al aumentar la carga se deberán a la disminución de la fuerza electromotriz por aumentar la caída de tensión en el rotor.
CA	Reluctancia	Dispositivos de señalización, dispositivos de control, reguladores automáticos, dispositivos de grabación, relojes, impresoras tele, gramófonos, contadores eléctricos analógicos, vehículos eléctricos, herramientas eléctricas como taladros, sierras de cinta y prensas
CA	asíncronos	Aplicaciones industriales (velocidad constante y variable) para potencias entre 1 kW y 10 MW (jaula de ardilla): Grupos de bombeo, ventiladores, cintas transportadoras, elevadores. Grupos de bombeo en centrales hidroeléctricas. Potencias

		superiores a los 100 MW (rotor bobinado).
CA	síncronos	Trituradoras, molinos y cintas transportadoras en la minería y las canteras; ventiladores, bombas y compresores en la siderurgia; extrusoras en la industria del papel; astilladoras y descortezadoras en la transformación de la madera; bombas en el tratamiento de aguas residuales; compresores y ventiladores de alta capacidad en las industrias química y petroquímica; molinos y trituradoras en las fábricas de cemento; y bombas de inyección de agua en plataformas petrolíferas flotantes.

En los motores de inducción existen bajas eficiencias, un problema puntual es el sobredimensionamiento que se tiene en las aplicaciones en general, esto se refiere a que no se tiene una ingeniería bien planteada para poner en operación el motor adecuado para cada actividad, esto conlleva a una baja eficiencia en su potencia lo que significa que hay un mayor consumo energético.

Aun no existe algo bien documentando de que problemas surgen con exactitud de trabajar con cargas menores de las nominales en los motores de inducción tipo jaula de ardilla de potencias bajas. No obstante, se deduce el alto consumo energético y la baja eficiencia, por otro lado, se tiene en cuenta que los motores de inducción presentan una alta eficiencia cuando operan a carga completa o potencia nominal.

El costo energético incrementa con el transcurso del tiempo, esto afecta directamente a la economía en general de una sociedad, empresa o región, siguiendo con el tema de la eficiencia energética existe una alternativa para aumentarla y disminuir el consumo energético. Los motores de inducción tienen un factor de potencia, este es el indicador en porcentaje de que tan eficientes son, lo ideal sería hacer este factor más cercano a la unidad para tener como resultado un ahorro energético mayor que traduce también a un ahorro económico.

En el mercado existen motores de eficiencia estándar, alta y premium, muchas de las industrias están optando por cambiar su maquinaria vieja por maquinaria con estas nuevas tecnologías. Sin embargo, muchas otras no lo hacen por la gran inversión que esto representa.

En general el consumo energético en las industrias el 70% lo representan los motores, a nivel mundial esto representa el 30%. Algunos países con una industrialización alta operan sus motores a una eficiencia menor o igual al 40% debido al sobredimensionamiento como lo son Alemania, Reino Unido, EUA, China, India, etc.

Los problemas más comunes que se enfrenta al usar a los motores de inducción es su complejidad para controlarlos, ya que por su principio de funcionamiento, el modelo dinámico suele ser complicado, debido a esto los controles comunes como es V/F son los más fáciles de aplicar, sin embargo, no se obtiene un control preciso, además de que no se

puede usar para aplicaciones en las que se requiera rapidez en su respuesta dinámica como sucede al usar el motor de corriente directa que son más precisos y fáciles de controlar.

La importancia de trabajar con motores de inducción es mucha, ya que por su robustez en comparación con los motores de corriente directa los hace más competitivos y con un control vectorial que aplica en ellos, se obtiene mayor potencia y una precisión igual a la de un motor de corriente directa, por esta razón se incrementa el interés de trabajar sobre este tema.

Además de que existe una gran oportunidad de trabajar con este tipo de motores, ya que por su principio de funcionamiento son relativamente fáciles de producir y baratos respecto a la potencia que ofrecen, a diferencia de otros (cd) , estos no tienen escobillas lo que reduce las pérdidas por fricción que estas generan, también el mantenimiento es bajo ya que no hay un constante rozamiento con piezas que deban remplazarse, agregando que, los motores de inducción tienen una aplicación tanto doméstica como industrial.

El objetivo del proyecto a realizar es aportar una solución para aumentar la eficiencia energética, haciendo una mejora en el control vectorial directo usando una estrategia de optimización de eficiencia.

Actualmente las máquinas eléctricas rotativas son la parte fundamental en la industria, usando la energía eléctrica como fuente de alimentación, convirtiéndola en energía mecánica mediante motores eléctricos de corriente alterna (CA) o de corriente continua (CD), entre los tipos de motores de CA se encuentran los denominados motores de inducción y en particular con rotor tipo jaula de ardilla (MITJA). Hoy en día, los motores de inducción trifásicos son muy utilizados en los procesos industriales debido a su robustez (relación peso/potencia), larga vida, facilidad de operación, bajo costo y menos piezas comparado con otros [15]. Por otro lado, todas las aplicaciones industriales requieren de variaciones de velocidad y un control preciso del motor, para que el resultado sea eficiente y ágil, logrando así el resultado esperado del proceso. En particular el presente trabajo se basa en el control vectorial directo sin sensor de velocidad, que es una técnica que se centra en el principio de funcionamiento del motor de corriente directa (CD) combinada con la robustez del MITJA, dando como resultado un buen desempeño en el trabajo del motor y bajo costo en el control de velocidad, dado que la velocidad de rotor del MITJA se puede calcular usando un modelo dinámico [13].

Los MITJA también son conocidos como máquinas eléctricas asíncronas, denominadas así debido a que su velocidad de giro  $N$  es diferente a la velocidad de sincronismo  $N_s$ . Al circular una corriente por un cable se genera un campo magnético, siguiendo este principio al aplicar una corriente alterna trifásica a los devanados del estator se genera un campo magnético giratorio que se le conoce como velocidad de sincronismo  $N_s$ , este a su vez induce una corriente eléctrica a las espiras del rotor (de ahí el nombre de motor de

inducción) generando un par mecánico que hace que gire el rotor a una velocidad  $N$ , ligeramente menor a la velocidad de sincronismo  $N_s$ .

$N$ = velocidad del rotor

$N_s$ = velocidad de sincronismo

$N < N_s$

De aquí se obtiene

$$S = \frac{N_s - N}{N_s} \times 100 \quad (1.1)$$

$S$ = Deslizamiento.

Es común representar el deslizamiento en porcentaje a la velocidad de sincronismo y siempre se encuentra entre el 2 y 5%.

El motor asíncrono consta de dos partes fundamentales que son el estator y el rotor. El estator es la parte fija del motor que se conforma por una carcasa en la que está fija una corona de chapas diseñada con ranuras. Desde el punto de vista constructivo, es también muy simple y semejante al de un generador síncrono trifásico, en el cual se alojan uno o más grupos de tres bobinas conectadas en estrella o en triángulo, como puede observarse en la figura 1[11].

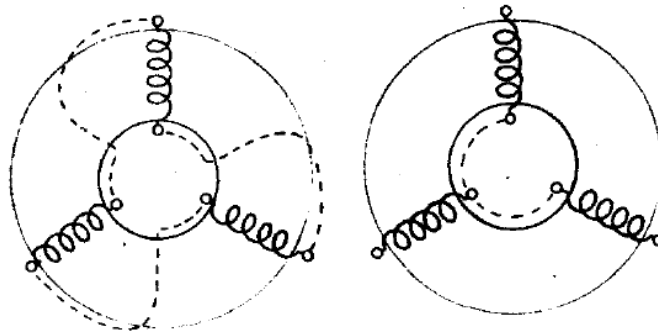


Figura 1.- Esquema del estator de un MITJA [1]

Por otro lado, el rotor es la parte móvil del motor, se encuentra en el interior del estator que está formado por un apilamiento de láminas de acero, formando así un cilindro sólido con la jaula de ardilla. Entre los tipos más utilizados se distinguen el rotor de jaula de ardilla y el rotor bobinado, en este caso se usará el primero [11].

El rotor de jaula de ardilla (rotor en cortocircuito) consta de un cierto número de barras de cobre o aluminio apiladas en ranuras previamente construidas en el rotor, paralelamente a su eje y puestas todas en cortocircuito en ambos extremos por medio de dos anillos

metálicos. El conjunto tiene el aspecto de una jaula de ardilla, de donde proviene el nombre de este tipo de rotor. Las láminas apiladas paralelamente a los dos anillos extremos hacen más sólido al rotor. (figura 2) [12].

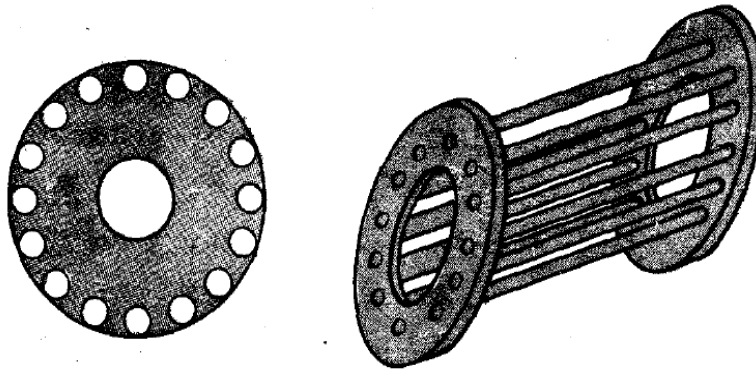


Figura 2.- Rotor de un motor de jaula de ardilla [1]

En este tipo de motores se pueden aplicar distintas técnicas de control, en particular se utilizará el control vectorial directo por campo orientado, esta técnica consiste en un control independiente del flujo magnético del estator y del par electromagnético del rotor, este proceso se hace minimizando el modelo no lineal del motor de inducción a un modelo ortogonal de dos ejes “d-q” que permite modelar al motor de inducción como un motor de (CD) de excitación independiente. El sistema trifásico se transforma a un sistema bifásico usando vectores espaciales y el sistema  $\alpha$  y  $\beta$  transformarlo a un sistema de ejes d, q, logrando controlar el flujo magnético mediante la regulación de la componente de corriente del eje d, mientras que el par electromagnético es controlado mediante la regulación de corriente asociada al eje q de cuadratura [15].

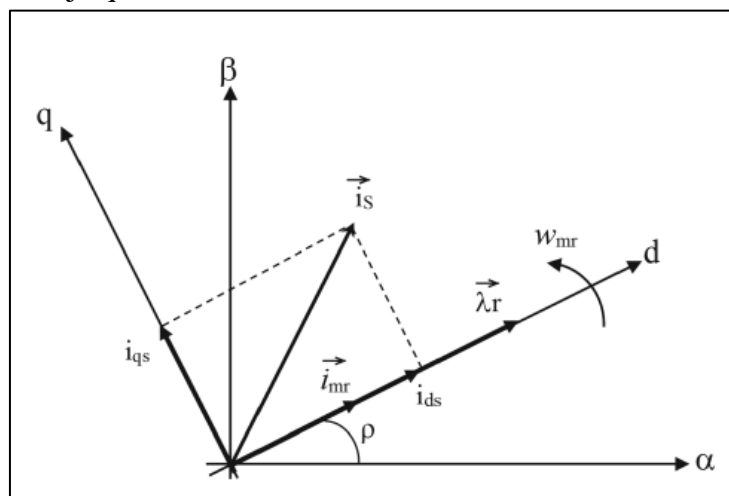


Figura 3.- Diagrama de vectores del eje q, d [5]

Para lograr el control vectorial directo se debe modelar el motor en ejes del flujo magnético del rotor haciendo un cambio de variable no lineal, al hacer el modelado de la máquina eléctrica asíncrona da como resultado un sistema de ecuaciones no lineales y dependientes del tiempo, entonces se deben transformar estas en ecuaciones lineales e independientes del tiempo, ya transformado el sistema en lineal e independiente del tiempo se puede controlar aplicando técnicas de control lineal clásico para buscar que realice una linealización entrada-estado. Este tipo de control solo incluye en las ecuaciones de linealización los términos no lineales y dependientes del tiempo de las ecuaciones de estado de las variables eléctricas del motor y se considera la velocidad del rotor como un parámetro. Para generar un desacoplo del par mecánico y del flujo electromagnético es necesario mantener al flujo constante ya que la ecuación del par mecánico es una relación no lineal entre el flujo y la corriente del par del motor de inducción tipo jaula de ardilla [11].

Al modelar la máquina asíncrona para la aplicación del control vectorial directo se tiene como objetivo principal obtener un mejor desempeño del motor y hacer el sistema más económico omitiendo el sensor de velocidad en la máquina. El concepto de control vectorial para el control de velocidad y par de los accionamientos de motores asíncronos ha ganado una popularidad significativa, ya que ha sido posible combinar la robustez clásica del MITJA con la simplicidad y eficiencia de control de un motor de corriente continua (CD). En las aplicaciones industriales se requiere de precisión en los procesos y esto se logra con motores de CD ya que son más fáciles de controlar en comparación con los motores de CA. Sin embargo, aplicando la técnica de control previamente mencionada se pueden reemplazar los motores CD por motores de inducción sin sensor de velocidad, logrando combinar buenas características de desempeño y un bajo costo en el sistema [13]. En los sistemas sin sensor, la velocidad del rotor del motor de inducción a menudo se calcula utilizando un modelo dinámico, la velocidad se puede calcular a partir de la frecuencia de deslizamiento.

La invención del control vectorial inicio a principios de la década de 1970, y la demostración de que un motor de inducción puede ser controlado como un motor de corriente continua (CD) excitado por separado, trajo un renacimiento en el alto rendimiento, el control vectorial también se conoce como control vectorial de desacoplamiento, ortogonal o trance. Sin lugar a duda, el control vectorial y el correspondiente procesamiento de señales de retroalimentación para el control vectorial sin sensor moderno acabará con el control escalar y será aceptado como el control estándar de la industria para variadores de frecuencia [14].

Este proyecto se llevará a cabo aplicando un control vectorial directo al MITJA, haciendo su caracterización y modelándolo para una potencia de 10KW, al omitir el uso de sensor de

velocidad es necesario el diseño de un algoritmo para la estimación de esta usando el método de control vectorial directo y procesarlo en un DSP ideal para esta aplicación.

## 1.2. Objetivos

### 1.2.1. General

Diseñar un accionamiento eléctrico para un MITJA empleando un control vectorial de campo orientado directo sin sensor de velocidad y con optimización de eficiencia.

### 1.2.2. Particulares

- Investigar el estado del arte sobre accionamientos para los MITJA.
- Determinar el modelo matemático de la máquina eléctrica.
- Analizar las pérdidas de potencia en un accionamiento eléctrico para MITJA.
- Analizar métodos de optimización de eficiencia y diseñar el adecuado para esta tesis.
- Implementar el algoritmo de control vectorial directo (FOC).
- Simular el sistema completo para comprobar su funcionamiento.

## 1.3. Justificación

Los problemas principales en los motores de inducción surgen como se ha dicho antes, cuando se operan a una carga o capacidad menor a su capacidad nominal o completa. Esto se debe a que su eficiencia baja considerablemente respecto cuando trabaja a su máxima capacidad también surge problemas con el paso del tiempo, tanto eléctricos como mecánicos un ejemplo es en sus rodamientos ya que se desgastan y generan mayor fricción al girar, por otro lado, el devanado en el estator sufre un daño térmico por las altas temperaturas que existen cuando se encuentra en operación.

El motor de inducción tipo jaula de ardilla puede mejorar en diferentes áreas, como en su eficiencia energética, también mecánica o térmicamente, además de que se pueden hacer cambios en su construcción como, por ejemplo, sustituir el rotor convencional que es de aluminio por un rotor de cobre, etc. Sin embargo, al hacer estos cambios se pueden generar cambios negativos en el costo de su producción y lo que se pretende es incrementar su eficiencia sin cambios negativos en la parte económica.

Por esta razón el aporte de este trabajo es hacer una contribución en la eficiencia energética, teniendo en cuenta que existen distintos métodos para lograr esto, eligiendo el que mejor convenga para esta problemática, además de aplicarlo en un control vectorial directo que como objetivo principal es combinar la robustez del motor de inducción tipo jaula de ardilla y las ventajas del control del motor de corriente continua, ya que con este control se

desacoplan las corrientes de flujo y corrientes de torque tal como una máquina de corriente directa.

Aproximadamente el 90% de los procesos industriales son automatizados y necesitan de una etapa de control para los motores. Por esta razón es necesario generar alternativas de control automático, que sean más eficientes y económicas respecto a lo que el mercado ofrece.

Se pretende atacar el problema principalmente por el hecho que la parte fundamental en todos los procesos industriales son los motores y que periódicamente se debe de dar mantenimiento eléctrico y mecánico, en este caso los motores de inducción magnética tienen una ventaja muy grande ya que su mantenimiento es casi nulo, además de que una máquina asíncrona es muy económica, tiene amplias aplicaciones industriales, ahorrándose recursos económicos que muchas veces son necesarios para que no se lleve a cabo el recorte de personal que año con año se da comúnmente. El control vectorial directo es un método de control aplicable a los motores de inducción, teniendo presente que estas máquinas tienen características muy buenas. Sin embargo, son difíciles de controlar, por esta razón con el método de control propuesto se pretende lograr un buen desempeño de la máquina a un bajo costo ya que no será necesario el uso de sensor de velocidad, sino que con un algoritmo se hará el control.

Es muy importante el aporte de este trabajo, ya que los motores CD son muy fáciles de controlar tanto su posición como su velocidad. Sin embargo, no tienen la misma potencia que un MITJA; además, de que estos últimos no necesitan de tanto mantenimiento haciéndolos más económicos en su utilización. A medida que la tecnología avanza los nuevos métodos de control de velocidad han tomado mayor relevancia, en particular el control vectorial por campo orientado en conjunto con su respectivo procesamiento de señales de retroalimentación para el control vectorial directo sin sensor acabará con el control escalar y será aceptado como el control estándar de la industria para variadores de frecuencia [14].

#### 1.4. Descripción

Esta tesis, tiene por objetivo principal controlar un MITJA, este tipo de máquina eléctrica tiene muchos años de ser conocida, sigue siendo ampliamente utilizada, su robustez y su nulo mantenimiento la hacen ideal para toda aplicación industrial. Por tanto, para que se logre un buen control de ella es necesario realizar una caracterización y modelarla para una potencia de 0.5kW. Para este control deberá diseñarse un variador de velocidad, implementando un control vectorial directo, también diseñar un algoritmo para la optimización de eficiencia, empleando el modelo del motor y, por último, para omitir el uso de un sensor de velocidad, es requerido el diseño de un algoritmo para la estimación de la velocidad.

## 1.5. Diagrama de bloques

La figura 4 muestra el diagrama de bloques del proyecto, tomando en cuenta las etapas más importantes, transformadas, estimadores de flujo y velocidad, transformadas inversas, controles PI, señales de control de MOSFET, Inversor y motor de inducción.

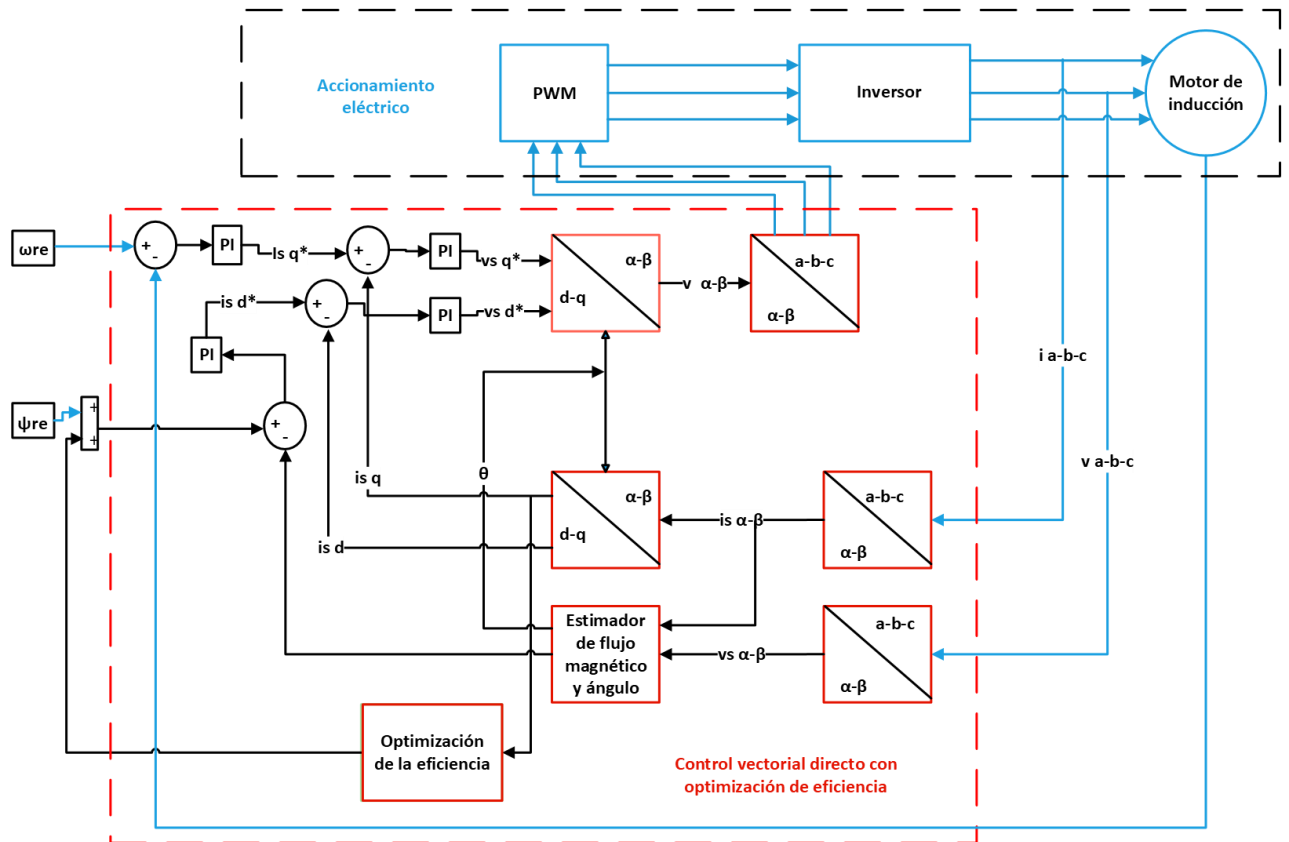


Figura 4.- Diagrama de bloques del proyecto

## 1.6. Resumen

En el presente documento se describen los diferentes tipos de control en un motor de inducción tipo jaula de ardilla (MITJA) los cuales tienen distintas topologías, ventajas y desventajas en relación con los otros, esto como parte fundamental del marco teórico para plasmar las bases del porqué se usa el control vectorial directo en este trabajo de tesis, además de que trabajos existen en la literatura que hablen sobre este tema.

Por otro lado, se profundiza en el principio de funcionamiento del motor de inducción tipo jaula de ardilla (MITJA), sus partes fundamentales, características eléctricas y las ventajas de usarlo en aplicaciones industriales. Así también se describe el control vectorial directo.

Al final de este capítulo se agrega una primera parte del diseño y simulación de un convertidor de voltaje CD/CA, los componentes que usa y su funcionamiento, esto con ayuda de Simulink de Matlab.

Cabe recalcar que los objetivos que se tienen son optimizar la eficiencia del accionamiento eléctrico, para esto se debe caracterizar el motor para obtener sus parámetros eléctricos a plena carga y en vacío, también se debe eliminar el sensor de velocidad debido a que el control vectorial directo lo permite ya que con la aproximación del flujo magnético se pueden obtener otras variables físicas que se derivan de este.

## Capítulo 2. Estado del arte

Con los motores eléctricos se realizan diferentes aplicaciones, ya sean industriales, agrónomas, residenciales, además hoy en día son muy comunes las aplicaciones en los autos eléctricos. En los motores de inducción se pueden mejorar muchos aspectos tanto constructivos como también detección de fallos como son los cortos circuitos en las bobinas del estator, además de nuevas tecnologías para puestas en marcha, nuevas topologías de inversores, filtros, nuevas topologías en los controles adicionando protecciones o métodos para detención de fallas como se menciona antes y así tener en cuenta protecciones para evitar una destrucción total en el motor. [3] Consiste en un control vectorial sin sensores de una carga conmutada con un inversor para controlar un motor de alta potencia en el rango de los mega watts teniendo en cuenta la potencia activa y reactiva, mostrando sus ventajas como lo son los filtros LCL que se usan para una mejor calidad de la energía añadiendo el control vectorial para una mejor precisión en el control y una mayor eficiencia. Sin embargo, se encuentran con desventajas tal como que en velocidades bajas el control no es tan preciso y baja eficiencia.

Hoy en día se encuentran muchas aplicaciones para los diferentes motores eléctricos tales como los de inducción, de imanes permanentes y los de reluctancia magnética, en el ámbito de autos eléctricos. [6] Se hace una comparación entre ventajas y desventajas de cada uno de ellos, por ejemplo el motor de imanes permanentes por su topología no lo hace rentable ya que es muy caro por el tipo de material de sus imanes permanentes, en otro caso los motores de inducción no requieren de imanes permanentes además de su robustez y su tipo de construcción lo hace relativamente barato, sin embargo, como desventaja que tiene es que sufre calentamiento en su estator y rotor que se traducen como pérdidas, también se tiene el de reluctancia magnética que no depende de imanes permanentes además de contar también con una robustez y ser tolerante a ambientes hostiles y a fallos en operación, no obstante, como desventaja tiene el alto ruido acústico y su bajo factor de potencia que lo hace menos eficiente.

En la literatura se encuentran distintos temas respecto a motores trifásicos de corriente alterna, en el caso específico de los motores de inducción tipo jaula de ardilla, uno de ellos

habla a cerca de métodos para arranque de los MITJA, un método consta de aumentar el torque mientras está en proceso el arranque al mismo tiempo de controlar la corriente de alimentación, sin embargo, esto más adelante repercute a la operación del motor ya que el consumo de energía aumenta en estado estacionario que se deriva en un coste mayor y la vida útil del motor disminuye.

La mayoría de arrancadores busca un arranque suave del motor que se refiere a que va aumentando su potencia gradualmente hasta llegar a la potencia nominal o deseada para evitar que las corrientes transitorias y de rotor bloqueado no sean tan grandes, en este artículo también se hace una comparación de distintos métodos para puesta en marcha como el DOL que es el voltaje directo de línea como ventaja tiene que si la carga está calculada para el tamaño correcto del motor funciona perfectamente sino e así entonces corre el riesgo de no arrancar.

Otro tipo de arranque es por autotransformador que por su característica de relación de transformación se va aumentando gradualmente el voltaje a la entrada del motor, su aplicación ocurre cuando se tiene una línea de alimentación de baja.

El tercer método consiste en un arrancador de estado sólido reductor de voltaje que es usado para limitar la potencia y las corrientes, basándose en controlar una parte de la onda senoidal.

El cuarto método es el más conocido que es el variador de voltaje o variador de frecuencia VFD, en este se pueden usar distintos métodos de control, desde el más común hasta el más sofisticado, sin embargo, estos aumentan su costo conforme aumenta de complejidad y precisión el control. Este tiene muchas ventajas ya que se puede programar por tiempos, y un arranque suave en rampa que limitan las corrientes de arranque. Por último, se tienen métodos de arranque por resistencias y por capacitores, estos normalmente se usan para motores de baja potencia ya que reducen la demanda de potencia eléctrica.

[1]Se centra en comparar los motores de inducción y los motores de SynRM, tanto ventajas como desventajas, enfocándose principalmente a los SynRM ya que pueden ser más eficientes en aplicaciones de trenes, debido que al no tener un rotor tipo jaula de ardilla tienen un sistema cerrado de refrigeración que enfría al estator. Sin embargo, las potencias que ofrece son menores respecto a las que ofrece el motor de inducción tipo jaula de ardilla en el rango de las mismas corrientes y voltajes, analizando desde la perspectiva de eficiencia energética esta desventaja se compensa con las pérdidas que existen en el entrehierro del motor de inducción.

[2]Se enfoca en hacer un análisis en pruebas de módulos educativos donde se emplean sistemas de control para motores de inducción, tales como el V/F o SC y el FOC, este último es el más complejo pero más preciso, se dice que el IFOC es el más usado a nivel industrial que el DFOC, ya que el IFOC puede medir por medio de un sensor la posición de flujo, que este parámetro sirve para tener un control desacoplado de corrientes de flujo y corriente de torque, además de usar técnicas de sintonización para los controladores PI y así hacer más rápido el sistema y un mejor control dinámico del motor inducción, el método de

sintonización experimental de Lucas Nulle simplifica los ajustes de PI mejorando el porcentaje de error de hasta por debajo del 0.3%.

La siguiente tabla muestra una comparativa de los motores de corriente directa contra los motores de corriente alterna, mostrando algunas ventajas y desventajas de cada uno.

*Tabla 2. Comparativa de motores de corriente directa vs motores de corriente alterna*

MOTORES CD	MOTORES CA
Es necesario aplicar corriente continua en el inducido y en el inductor.	Trabaja a partir de la aplicación de corriente alterna.
La velocidad aumenta con la tensión aplicada.	Para regular su velocidad de giro se hace a través de variadores electrónicos de frecuencia.
Par motor proporcional a la corriente del inducido y al flujo del campo magnético del inductor.	Par motor depende del campo giratorio.
Par de arranque fuerte.	Par de arranque escaso.
Partes básicas: inductor, inducido y colector.	Partes básicas: estator y rotor.
Velocidad variable.	Trabaja a velocidades fijas y no pueden operar a bajas velocidades.
Más caros de fabricar.	Más baratos de fabricar
Son motores monofásicos.	Pueden ser monofásicos o trifásicos.
Utilizados en trabajos precisos	Utilizados en trabajos pesados

## 2.1. Antecedentes históricos

El motor de inducción a pesar de sus amplias ventajas en operación respecto a la eficiencia, costo, mantenimiento y robustez, no podía competir con los motores de corriente directa debido a que la operación dinámica del motor de inducción tipo jaula de ardilla se consideraba compleja e inadecuada, por lo tanto al intentar hacer variable su velocidad esto se volvía muy complicado por lo que era más fácil usar la máquina de corriente continua a pesar de tener en cuenta todos los problemas que esta contiene como su mantenimiento constante por su colector frágil, el desgaste de las escobillas que por lo mismo deben ser remplazadas y por los costos que todo esto genera. Sin embargo, era el dispositivo adecuado para las aplicaciones de variación de velocidad, ya que en el motor cc solo dos corrientes se regulan, la corriente de armadura y la corriente de campo por lo cual se deduce que estas están desacopladas entre sí, esto quiere decir que ambas son independientes de la otra [28].

Añadiendo que el control del torque del motor de corriente continua es simple ya que es proporcional a la corriente de la armadura contrastando con el caso del motor de corriente alterna tipo jaula de ardilla debido a que la magnetización y la corriente de torque son controlados únicamente por la tensión del estator. Lo anterior conlleva a que al realizar un control desacoplado del flujo y del torque se necesita controlar la magnitud y la fase del voltaje aplicado al estator por lo cual se hace uso de modelos matemáticos avanzados [28].

Para la ciencia no fueron un impedimento los problemas anteriores, ya que aparecieron los controles escalares por lo que fue posible tener más aplicaciones del motor de corriente alterna ya que se podía regular su velocidad con los dispositivos de electrónica de potencia como los transistores BJT, que son conmutar de forma forzada durante lapsos de tiempo determinados, logrando cambiar la frecuencia y voltaje de las señales que alimentan al estator, no obstante se generaron muchos inconvenientes en este control ya que no se logró alcanzar una respuesta rápida de la maquina como se lograba fácilmente con el motor de corriente continua, debido a que el control escalar mejor conocido como V/F solo puede regular la magnitud del voltaje mas no la fase, como consecuencia no se desacopla el control de la corriente de torque y la corriente del flujo magnético.

El control vectorial fue desarrollado por Hasse y Blaschke a finales de los 60 hasta 1972. En los años 70's el desarrollo en microprocesadores era limitado esto imposibilitaba la implementación de los sistemas de control, para los 80's surgieron los primeros microprocesadores como el INTEL 8080,8085 y el ZILONG Z80, con ayuda de estos se hizo posible la implementación de los primeros controles vectoriales que fueron de desarrollados por investigadores de origen alemán [25].

## 2.2. Control vectorial *directo*

El control vectorial directo por campo orientado es una técnica que consiste en un control independiente del flujo magnético del estator y del par electromagnético del rotor, este proceso se hace minimizando el modelo no lineal del motor de inducción a un modelo ortogonal de dos ejes “d-q” que permite modelar al motor de inducción como un motor de (CD) de excitación independiente. El sistema trifásico se transforma a un sistema bifásico usando vectores espaciales y el sistema  $\alpha$  y  $\beta$  transformarlo a un sistema de ejes d, q, logrando controlar el flujo magnético mediante la regulación de la componente de corriente del eje d, mientras que el par electromagnético es controlado mediante la regulación de corriente asociada al eje q de cuadratura [15].

Para lograr el control vectorial directo se debe modelar el motor en ejes del flujo magnético del rotor haciendo un cambio de variable no lineal, al hacer el modelado de la máquina eléctrica asíncrona da como resultado un sistema de ecuaciones no lineales y dependientes del tiempo, entonces se deben transformar estas en ecuaciones lineales e independientes del tiempo, ya transformado el sistema en lineal e independiente del tiempo se puede controlar aplicando técnicas de control lineal clásico para buscar que realice una linealización entrada-estado. Este tipo de control solo incluye en las ecuaciones de linealización los términos no lineales y dependientes del tiempo de las ecuaciones de estado de las variables eléctricas del motor y se considera la velocidad del rotor como un parámetro. Para generar un desacoplo del par mecánico y del flujo electromagnético es necesario mantener al flujo constante ya que la ecuación del par mecánico es una relación no lineal entre el flujo y la corriente del par del motor de inducción tipo jaula de ardilla [11].

Al modelar la máquina asíncrona para la aplicación del control vectorial directo se tiene como objetivo principal obtener un mejor desempeño del motor y hacer el sistema más económico omitiendo el sensor de velocidad en la máquina. El concepto de control vectorial para el control de velocidad y par de los accionamientos de motores asíncronos ha ganado una popularidad significativa, ya que ha sido posible combinar la robustez clásica del MITJA con la simplicidad y eficiencia de control de un motor de corriente continua (CD). En las aplicaciones industriales se requiere de precisión en los procesos y esto se logra con motores de CD ya que son más fáciles de controlar en comparación con los motores de CA. Sin embargo, aplicando la técnica de control previamente mencionada se pueden reemplazar los motores CD por motores de inducción sin sensor de velocidad, logrando combinar buenas características de desempeño y un bajo costo en el sistema [13]. En los sistemas sin sensor, la velocidad del rotor del motor de inducción a menudo se calcula utilizando un modelo dinámico, la velocidad se puede calcular a partir de la frecuencia de deslizamiento.

La invención del control vectorial inicio a principios de la década de 1970, y la demostración de que un motor de inducción puede ser controlado como un motor de corriente continua (CD) excitado por separado, trajo un renacimiento en el alto rendimiento, el control vectorial también se conoce como control vectorial de desacoplamiento, ortogonal o trance. Sin lugar a duda, el control vectorial y el correspondiente procesamiento de señales de retroalimentación para el control vectorial sin sensor moderno acabará con el control escalar y será aceptado como el control estándar de la industria para variadores de frecuencia [14].

En la parte introductoria se habla a cerca de la construcción y componentes básicos del motor de inducción tipo jaula de ardilla, en esta parte se explica más a fondo su principio de funcionamiento.

## 2.2. Eficiencia de los motores de inducción trifásicos tipo jaula de ardilla

Como se dijo antes, los motores de inducción tipo jaula de ardilla han tomado mucha relevancia en el ámbito industrial, por lo cual el consumo de energía eléctrica a nivel mundial alcanza más del 40%. Por esta razón es necesario mejorar el rendimiento eléctrico de los accionamientos para motores, se estima que entre el 20 y 30% pueden mejorar su eficiencia, lo cual es de gran relevancia ya que representa entre el 8 y 12 % del consumo energético mundial, ayudando a combatir el efecto invernadero.

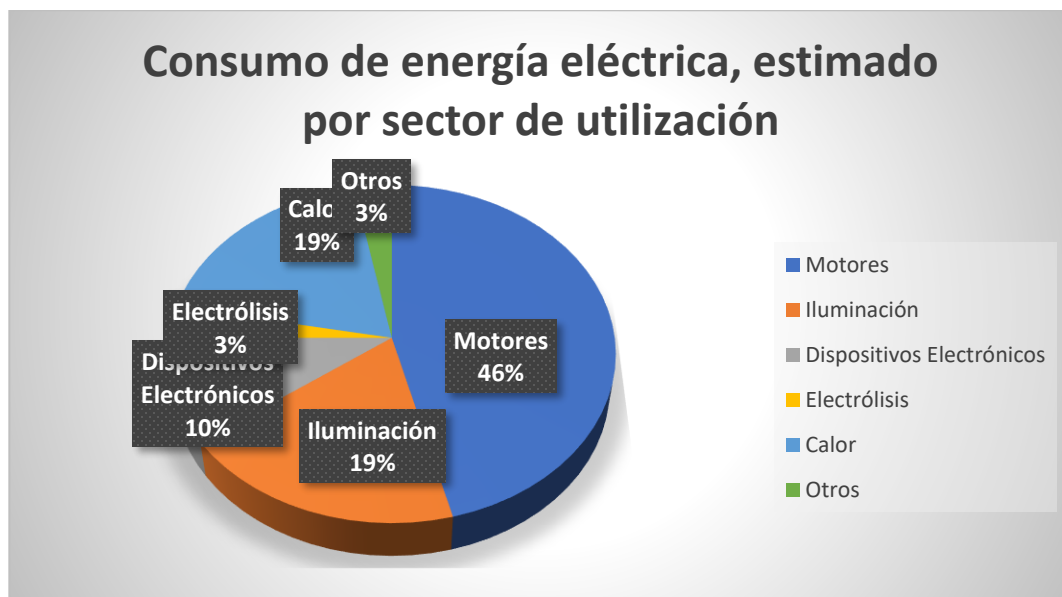


Figura 5.- Consumo de energía eléctrica, estimado por sector de utilización [20]

Se dice que desde que se optó por la alternativa de accionamientos eléctricos para los motores de inducción tipo jaula de ardilla en el sector industrial, el incremento de la energía eléctrica se ha visto modificado ya que entre el 80 y 90% de la energía consumida por la industria es demandada por estos motores. Sin embargo, estos porcentajes varían dependiendo de país y del continente en que se encuentren, no obstante, se puede notar que estas máquinas asíncronas son las consumidoras de energía eléctrica por excelencia, por tanto, al generar nuevos diseños de control es necesario tomar en cuenta el rendimiento o la optimización de la eficiencia en cada accionamiento para que dé a poco el consumo energético mundial disminuya [19].

Hay más datos acerca del consumo energético, se dice que en China se consume el 60% de energía eléctrica total generada por motores de inducción, por su parte Estado Unidos de América consume el 75% y que Canadá consume el 80% [19].

Por otro lado, en Latinoamérica debido al grado de industrialización menor, el consumo energético en las industrias disminuye un ejemplo claro lo vemos en Brasil que consume el 50% y argentina el 47.5, aun así, es de gran relevancia tratar de disminuir estos consumos ya que la mayoría de los países en América latina están en desarrollo, por tanto, les ayudaría a crecer de manera más rápida.

Por consiguiente, para mejorar el rendimiento de los motores es necesario conocer sus parámetros y caracterizarlos de manera correcta para así poder hacer mejoras en los accionamientos y reducir las pérdidas que se generan durante su operación. Debido a esto existen distintas normas para obtener la eficiencia o rendimiento de las maquinas eléctricas rotativas, en este caso a motores eléctricos de corriente alterna, trifásicos, de inducción, tipo jaula de ardilla, en potencia nominal de 0,746 kW hasta 373 kW, con tensión eléctrica nominal de hasta 600 V, abiertos o cerrados, de una sola frecuencia de rotación, de posición de montaje horizontal o vertical y régimen continuo.

Existen diferentes normas y estándares para la fabricación de motores de inducción tipo jaula de ardilla como lo son:

NEMA (National Electrical Manufacturers Association) en esta norma se establecen los niveles de eficiencia mínimos para los motores de inducción de distintas capacidades de potencia y velocidades, así también como a sus diferentes tipos de construcción. Para 2001 NEMA publicó el Premium Motors Estándar para los motores de alta eficiencia, Standard MG-1-1993 [20].

European Committee of Manufacturers of Electrical Machines and Power Electronics (CEMEP) en 2001 publicó su propio estándar para eficiencia de motores de inducción en sus diferentes potencias, además, definiéndolos en eficiencia estándar (Eff3), alta (Eff2) y premium (Eff1).

En relación con esto por su parte la International Electrotechnical Comision (IEC) en 2008 hizo pública su norma IEC 60034-30 para las maquinas eléctricas rotativas. En el apartado 30 menciona la eficiencia en los motores de inducción monofásicos y trifásicos de jaula de ardilla, unificando así las normas NEMA Y CEMEP para dar una nueva clasificación la cual es la siguiente [19].

- Standard Efficiency (IE1)
- High-Efficiency (IE2)
- Premium Efficiency (IE3)

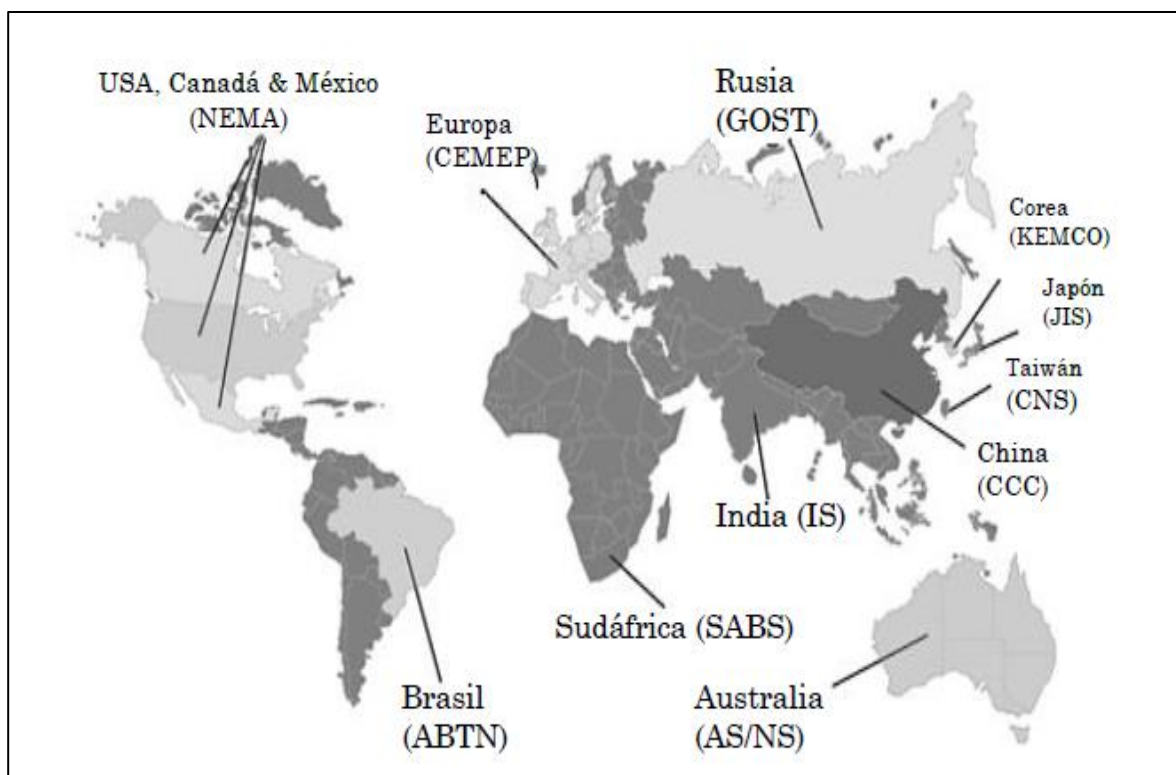


Figura 6.- Principales acuerdos y normas de EE de motores eléctricos en el mundo [20]

Por otro lado, hablando de México existe una norma que rige la eficiencia de los motores de inducción tipo jaula de ardilla llamada “Norma Oficial Mexicana Nom-016-Ener-2010, eficiencia energética de motores de corriente alterna, trifásicos, de inducción, Tipo Jaula De ardilla, en potencia nominal de 0,746 A 373 kW”. Se basa principalmente en que se lleve a cabo la eficiencia nominal marcada en la placa de datos de los motores que se vendan y sean utilizados en la industria mexicana, teniendo en cuenta que se puede calcular la eficiencia de estas máquinas eléctricas rotativas de diferentes formas y las cuales son válidas.

La eficiencia está definida como la razón de la potencia de salida respecto a la potencia de entrada de un motor de inducción y se expresa en porcentaje de 0 a 100.

- $[\text{Potencia de salida} / \text{potencia de entrada}] \times 100$ .
- $[(\text{Potencia de entrada} - \text{pérdidas}) / \text{potencia de entrada}] \times 100$ .
- $[\text{Potencia de salida} / (\text{potencia de salida} + \text{pérdidas})] \times 100$ .

En la siguiente tabla se muestra el rendimiento nominal de los motores de inducción de diferentes números de polos, tipo de construcción (abierta o cerrada) y cada potencia que va desde 0.370 kW hasta 373 kW.

*Tabla 3. Eficiencia nominal a plena carga en porciento [21]*

Potencia nominal kW	Potencia nominal CP	Motores cerrados				Motores abiertos			
		2 polos	4 polos	6 polos	8 polos	2 polos	4 polos	6 polos	8 polos
0.370	0.5	64	66	59.7	49.7	63.9	66	59.8	49.7
0.746	1	77.0	85.8	82.5	74.0	77.0	85.5	82.5	74.0
1.119	1.5	84.0	86.5	87.5	77.0	84.0	86.5	86.5	75.5
1.492	2	85.5	86.5	88.5	82.5	85.5	86.5	87.5	85.5
2.238	3	86.5	89.5	89.5	84.0	85.5	89.5	88.5	86.5
3.730	5	88.5	89.5	89.5	85.5	86.5	89.5	89.5	87.5
5.595	7.5	89.5	91.7	91.0	85.5	88.5	91.0	90.2	88.5
7.460	10	90.2	91.7	91.0	88.5	89.5	91.7	91.7	89.5
11.19	15	91.0	92.4	91.7	88.5	90.2	93.0	91.7	89.5
14.92	20	91.0	93.0	91.7	89.5	91.0	93.0	92.4	90.2
18.65	25	91.7	93.6	93.0	89.5	91.7	93.6	93.0	90.2
22.38	30	91.7	93.6	93.0	91.0	92.4	94.1	93.6	91.0
29.84	40	92.4	94.1	94.1	91.0	93.0	94.1	94.1	91.0
37.30	50	93	94.5	94.1	91.7	93.6	94.1	94.1	91.7
44.76	60	93.6	95.0	94.5	91.7	93.6	94.5	94.1	91.7
45.95	75	93.6	95.4	94.5	93.0	93.6	95.0	94.5	92.4
74.60	100	94.1	95.4	95.0	93.0	94.1	95.0	94.5	93.6
93.25	125	95	95.4	95.0	93.6	94.1	95.4	95.0	93.6
111.9	150	95	95.8	95.8	93.6	95.0	95.4	95.0	93.6
149.2	200	95.4	96.2	95.8	94.1	95.0	95.8	95.4	93.6

186.5	250	95.8	96.2	95.8	94.1	95.4	95.8	95.4	93.6
223.8	300	95.8	96.2	95.8	-----	95.4	95.8	95.4	94.5
261.1	350	95.8	96.2	-----	-----	95.8	95.8	95.4	-----
298.4	400	95.8	96.2	-----	-----	95.8	95.8	95.4	-----
335.7	450	95.8	96.2	-----	-----	95.8	96.2	-----	-----
373	500	95.8	96.2	-----	-----	95.8	96.2	-----	-----

Para obtener la eficiencia más exacta es necesario considerar las pérdidas que existen durante la transformación de energía eléctrica a energía mecánica debido a que existen diversas pérdidas y que estas pueden dividirse en dos tipos en los motores de inducción, las pérdidas fijas y las pérdidas variables. Las pérdidas fijas son las que existen independientemente de la carga que se le aplique al motor, las pérdidas en el hierro, por ventilación y roce entran en este grupo. Por otro lado, las pérdidas variables son las que existen directamente por el nivel de carga que se le aplique al motor.

Sin embargo, hay otras clasificaciones para las pérdidas de potencia en los motores de inducción [19] las cuales pueden desglosarse en:

Perdidas en el cobre del estator. En los devanados del estator se generan pérdidas por el efecto joule debido a las corrientes que circulan por él, y se calcula como:

$$P_{cus} = 3 \cdot R_s \cdot I_s^2 \quad (2.2.1)$$

Donde la variable  $R_s$  es la resistencia del devanado del estator por cada fase e  $I_s$  es la corriente del estator, debido a que las corrientes pueden tomar valores que varían desde que el motor trabaja en vacío hasta el motor a plena, las pérdidas pueden resultar aproximadamente proporcionales al cuadrado del nivel de carga.

Perdidas en el rotor. En el devanado del rotor en conjunto con las barras en jaula de ardilla y anillos que las sostienen pierden o disipan potencia en forma de calor y estas pérdidas se representan como:

$$P_{cur} = 3 \cdot R'_s \cdot I_s'^2 \quad (2.2.2)$$

Donde  $R'_s$  es la resistencia del rotor e  $I_s'$  es la corriente en el devanado del rotor y como en el caso anterior las pérdidas resultan proporcionales al nivel de carga del motor al cuadrado.

Perdidas en el hierro. Son las que se originan debido a la excitación alterna del núcleo magnético del motor de inducción que además de esto se subdividen en dos tipos de

perdidas por histéresis y por corrientes parasitas. Las perdidas por histéresis, por un lado, se representan por la siguiente ecuación:

$$P_h = \alpha \cdot f \cdot B^\gamma \quad (2.2.3)$$

Teniendo en cuenta que  $\alpha$  y  $\gamma$  son coeficientes de las propiedades físicas que constituyen al material, donde  $f$  es la frecuencia de la red eléctrica y  $B$  es el valor mas alto de la inducción magnética en el circuito.

Por otro lado, las perdidas por corrientes parásitas se representan por:

$$P_{cp} = \beta \cdot f^2 \cdot B^2 \quad (2.2.4)$$

Donde  $\beta$  es una constante del material, además se tiene en cuenta que el valor de la inducción magnética se mantiene constante para cualquier magnitud de carga que sea aplicada al motor, debido a esto se asegura que las perdidas en el hierro son constantes.

Perdidas por ventilación y perdidas por roce: ambas están asociadas o tienen algo en común ya que se consideran constantes debido a que las velocidades varían entre 2 y 3% en vacío y a plena carga de la velocidad de sincronismo porque dependen de la velocidad del rotor.

Hay otra clasificación de pérdidas que se les llama como adicionales, sin embargo, están relacionadas con la geometría del motor, devanados, corrientes inducidas en toda la carcasa, ejes, rodamientos etc.

En la siguiente tabla tomada del artículo, “*High Efficiency Electric Motors: Economic and Energy Advantages*” [19] se toman muestras de las pérdidas que se originan en 3 motores de diferentes potencias, baja, media y alta, en esta se observa como los motores de baja y media potencia tienen mayor perdidas en los devanados del rotor y estator, mientras que en los motores de alta potencia las perdidas en sus devanados es baja, no obstante la cuestión cambia, ya que los motores de mayor potencia tienen mayores pérdidas por ventilación y roce respecto a los de baja y media potencia.

Tabla 4. Clasificación de las pérdidas en tres motores de distinta potencia [19]

<b>P [kW]</b>	<b><math>P_{cus}</math></b>	<b><math>P_{cur}</math></b>	<b><math>P_{ad}</math></b>	<b><math>P_{he}</math></b>	<b><math>P_{r+v}</math></b>
3	50	20	3	24	3
30	36	22	7	25	10
250	25	23	12	25	15

Ya presentadas las pérdidas en el motor de inducción tipo jaula de ardilla se puede representar la ecuación de eficiencia dada en esta máquina eléctrica rotativa.

$$\eta = \frac{P_{sal}}{P_{sal}+P_{cus}+P_{cur}+P_{fe}+P_{r+v}+P_{ad}} \cdot 100[\%] \quad (2.2.5)$$

Donde:

- $P_{sal}$  es la potencia transmitida a la salida del eje del motor.
- $P_{cus}$  es la pérdida de potencia en el cobre del estator.
- $P_{cur}$  es la pérdida de potencia en el cobre del rotor.
- $P_{fe}$  es la pérdida de potencia en el hierro del núcleo magnético.
- $P_{r+v}$  es la pérdida por roce y ventilación.
- $P_{ad}$  son las pérdidas adicionales mencionadas previamente.

Sin embargo, la ecuación de la eficiencia anterior es una aproximación solamente, debido a las condiciones ambientales al hacer las pruebas, los instrumentos de medición que algunas veces no están calibrados adecuadamente y por el hecho de que es casi imposible medir las pérdidas adicionales [19], no obstante, existen diferentes normas que ejemplifican el método para calcular la eficiencia de esta máquina como se explica en [21].

### 2.3. Trabajos similares

En el presente subtema se habla a cerca de los distintos trabajos de tesis o artículos que se encuentran en la literatura relacionados con el tema de investigación en cuestión el diseño de un accionamiento eléctrico utilizando el control vectorial directo (FOC) sin sensor de velocidad y con optimización de eficiencia. Hay diversos trabajos publicados que ayudan a la línea de investigación actual, aportando distintos resultados y métodos en el control vectorial.

M. R. Diana Fernanda, V.S. Jorge Olmedo, “Diseño de un Controlador de Velocidad para un Motor de Inducción utilizando Control Vectorial” [24]. Habla sobre del control vectorial directo aplicado en un motor de inducción, muestra el modelo dinámico del motor y sus características, es un trabajo muy completo respecto al control vectorial. Sin embargo, no toma en cuenta la eficiencia del accionamiento. Además, de que no muestra el diseño del inversor por otro lado, da énfasis al controlador, que es algo que diferencia del presente trabajo de tesis.

M. Gallo Nieves, J. Diaz Rodriguez and J. González Castellanos, *Speed estimation of an induction motor with sensorless vector control at low-speed range using neural networks*. [15]. Este artículo se basa en la estimación de la velocidad de un motor de inducción, también usando el control vectorial sin sensor de velocidad, este trabajo aporta el método de estimación de velocidad para la retroalimentación del controlador implementado en el sistema de la tesis actual.

Alzate. Gomes. A., *Control vectorial de la máquina de inducción.*, [11]. Es un artículo que habla sobre las ventajas que tiene el control vectorial respecto a los otros controles, hace pruebas en el laboratorio donde pone distintas cargas variando la velocidad y observando el comportamiento del torque. Da énfasis en el control vectorial indirecto.

Roberto Arnanz, F. Javier García, Luis J. Miguel,” Métodos de control de motores de inducción: síntesis de la situación actual” [25]. Este trabajo describe y analiza la situación actual de los métodos de control de motores de inducción que se aplican en la industria, desde los métodos clásicos hasta los más modernos. Además, se da una visión general de las tendencias de control actuales en cada uno de los métodos.

Marco A. Gallegos Lara Ricardo Álvarez Salas, Jaime A. Moreno, Gerardo Espinosa Pérez,” Control Vectorial de un Motor de Inducción con Carga Desconocida Basado en un Nuevo Observador No Lineal” [26]. Trata sobre el control vectorial sin sensores mecánicos para un motor de inducción, el cual puede trabajar en un amplio rango de velocidades. El controlador se basa en un nuevo algoritmo de observación de bajo orden que estima simultáneamente los flujos y la velocidad del rotor en presencia de par de carga constante y desconocido. El desempeño del controlador por campo orientado sin sensores mecánicos propuesto. Se verifica mediante simulaciones numéricas y resultados experimentales. Se realiza el seguimiento de trayectorias de velocidad variable, que incluyen la velocidad cero, y se comparan con resultados obtenidos para el mismo esquema de control basado en un observador adaptable por modelo de referencia.

Luis Enrique Avendaño González, Juan Pablo González Tamayo, “Simulación de control vectorial a un motor de inducción” [27]. Se muestran los resultados obtenidos al implementar la simulación de un control vectorial a un motor de inducción. Se realiza la

comparación entre el control tensión-frecuencia y el control vectorial para las mismas variaciones de torque en la carga y velocidades de referencia.

Dr.Roberto Cárdenas Dobson, Control Vectorial de Máquinas de Inducción Jaula de Ardilla, Departamento de Ingeniería Eléctrica,Universidad de Chile, Septiembre 2011 [28]. Es un compendio del desarrollo completo del control vectorial, tiene fundamentos matemáticos y electromagnéticos, además del desglose del funcionamiento del motor de inducción tipo jaula de ardilla, su modelo dinámico y transformadas de Clarke y Park. Este manual está fundamentado por distintos trabajos reconocidos por la IEEE que lo hacen muy completo y funcional para la teoría del FOC.

Con estos documentos y otros más, el presente trabajo de tesis se fundamenta, además de agregar la parte eficiencia en el accionamiento eléctrico acoplándolo con el no uso de un sensor de velocidad, teniendo en cuenta siempre el funcionamiento óptimo de la máquina de inducción tipo jaula de ardilla que lo diferencia de los trabajos mencionados.

## Capítulo 3. Marco teórico

### 3.1. Clasificación de los motores eléctricos

La energía eléctrica es de las más utilizadas a nivel mundial, debido a su demanda, se generaron muchos métodos para obtener este tipo de energía para ser utilizada principalmente por maquinas rotativas, que son el corazón principal del movimiento, estas convierten la energía eléctrica en energía mecánica rotativa, esto se aprovecha para realizar diferentes tipos de trabajos y procesos no solo industriales sino también en el hogar, agrícolas, marítimos, etc.

Existen dos tipos de motores, los de corriente continua CD y los de corriente alterna AC. En cada clasificación existen otros más de diferente funcionamiento en los motores de corriente directa encontramos los de excitación independiente, excitación en serie y los de excitación en paralelo, mientras que en los de corriente alterna se encuentran de dos tipos respecto a su alimentación: monofásicos y trifásicos, dentro de los trifásicos se encuentran otras subclasificaciones; los de reluctancia variable (conmutados, a pasos), los síncronos (de rotor devanado, de reluctancia y de imanes permanentes) y los asíncronos (de rotor devanado y los tipo jaula de ardilla) este último es el que se utiliza para el propósito de la presente tesis, que por su nulo mantenimiento, eficiencia entre peso/potencia y fácil operación lo hacen muy viable para su aplicación en distintos procesos. Sin embargo, no son tan sencillos de controlar como lo son los motores de corriente directa, por esta razón la ciencia ha tratado de llevar a cabo distintos métodos de control.

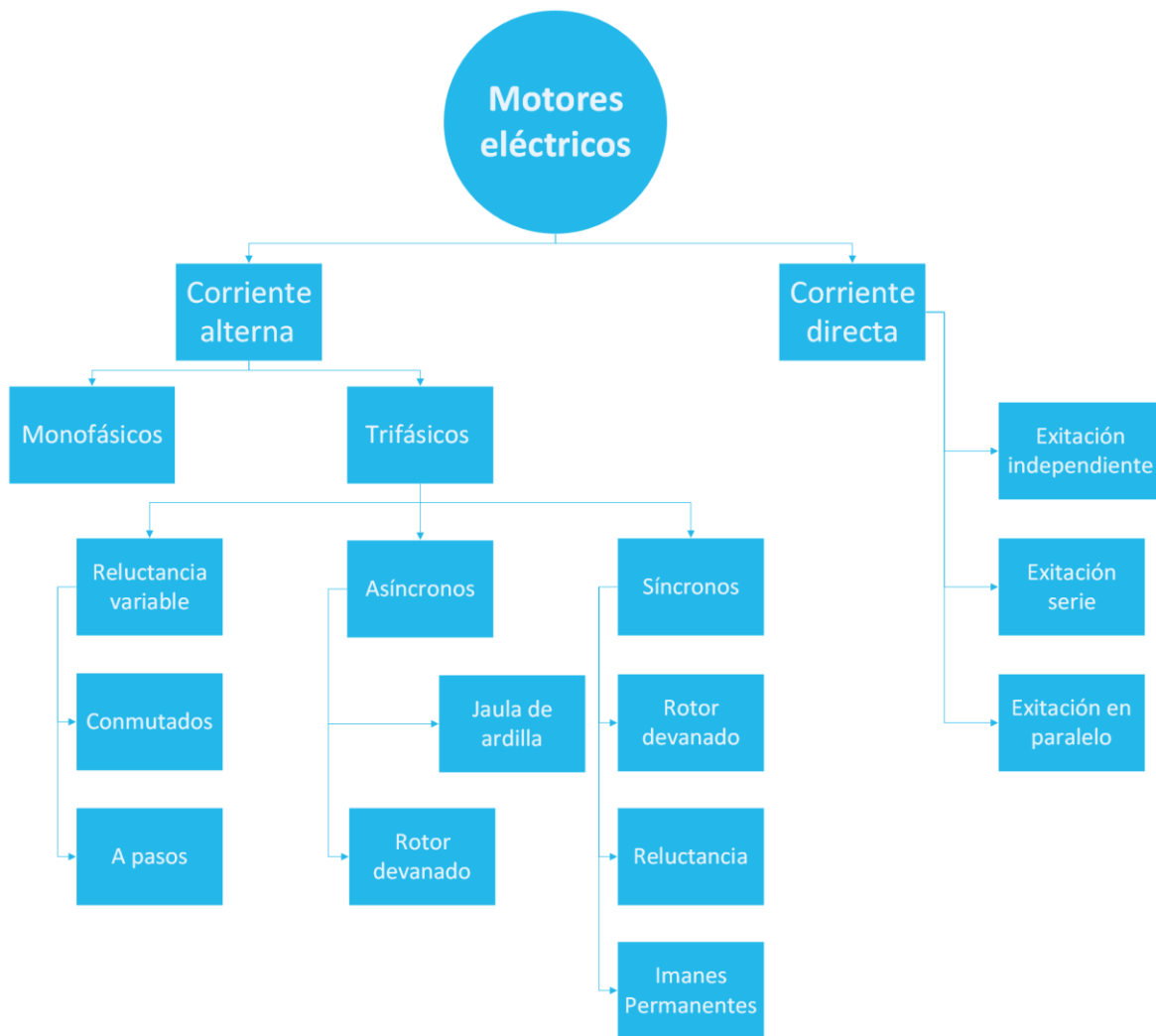


Figura 7.- Clasificación de los motores eléctricos [23]

Como se puede ver en la figura 7, se clasifican diferentes tipos de motores tanto de corriente directa CD como de corriente alterna AC, cada uno de ellos tienen una aplicación específica, ya sea por su potencia, tipo de alimentación o por su control. Sin embargo, la tesis que se realiza hace énfasis en el motor de inducción tipo jaula de ardilla, ya que tiene ventajas que lo diferencian de los otros motores de corriente alterna, como lo es su robustez respecto a su peso/potencia, el mantenimiento que no es frecuente, larga vida, y su composición que no es tan compleja, no obstante, es difícil de controlar y es una desventaja que tiene respecto a los motores de corriente directa, esta limitante no lo hace obsoleto al contrario es una máquina eléctrica muy interesante ya que usando una técnica de control eficiente como lo es el control vectorial por campo orientado FOC, se le puede dar aplicaciones donde el control es muy preciso a bajas velocidades y el par muy alto, por esta razón a continuación se explica cómo se conforma, sus partes principales y su principio de funcionamiento.

### 3.2. Motor de inducción tipo jaula de ardilla

El motor de inducción con rotor jaula de ardilla consiste en una parte estática, conocida como estator, y una rotante, llamada rotor. El estator y el rotor están separados por una pequeña distancia llamada entrehierro. Además del estator y el rotor, el motor de inducción con rotor jaula de ardilla contiene un ventilador, una caja de conexiones, cojinetes, rodamientos y el eje para conexión de la carga mecánica.

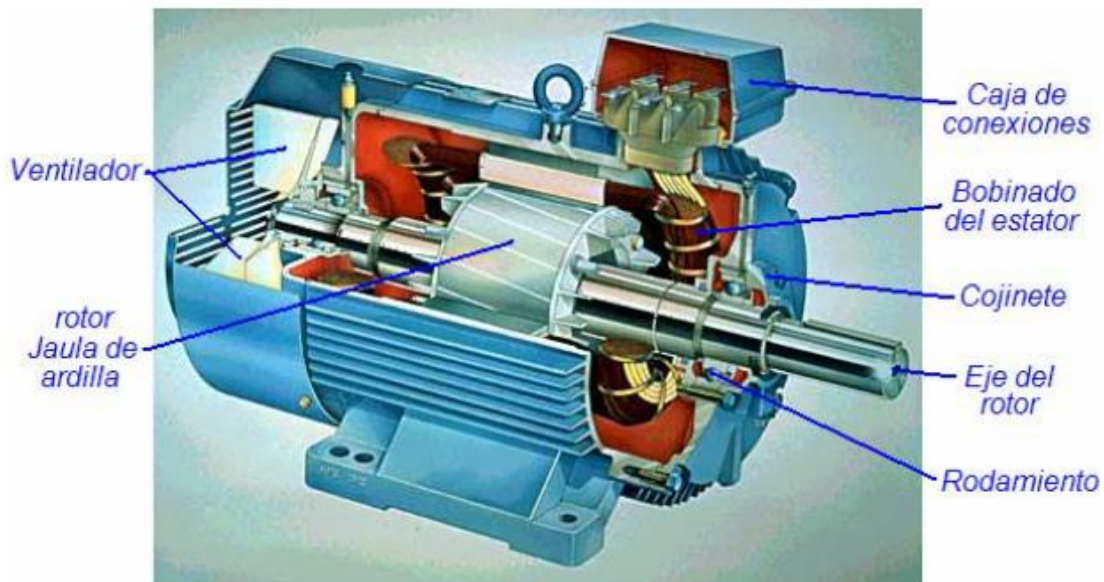


Figura 8.- Motor de inducción tipo jaula de ardilla [24]

**Estator:** consiste en un yugo (carcasa o armazón cilíndrica que provee soporte físico), un núcleo y un bobinado trifásico. El núcleo proporciona una trayectoria de retorno al flujo para complementar el circuito magnético y se construye de láminas ferromagnéticas con ranuras, unidas entre sí.

El estator es la parte donde se alimenta de energía eléctrica en este caso de corriente alterna, mediante tres cables a-b-c que se encuentran por un lado de la carcasa del estator, normalmente se nombran a-b-c, sin embargo, también pueden estar enumerados, de acuerdo al número de bobinas con las que cuente, así como también a la configuración a la que esté conectado; delta o estrella.

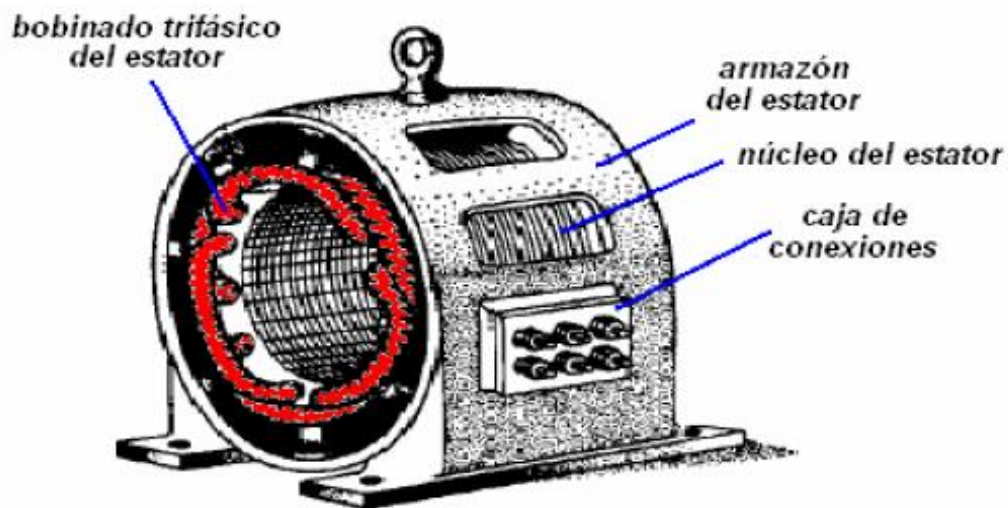


Figura 9.- Estator del motor de inducción tipo jaula de ardilla [24]

**Rotor:** Está constituido por un núcleo, unas barras de cobre o aluminio, unos anillos de cobre o aluminio y el eje para conexión de la carga mecánica. El núcleo, al igual que el del estator, está formado por láminas ferromagnéticas con ranuras, unidas entre sí.

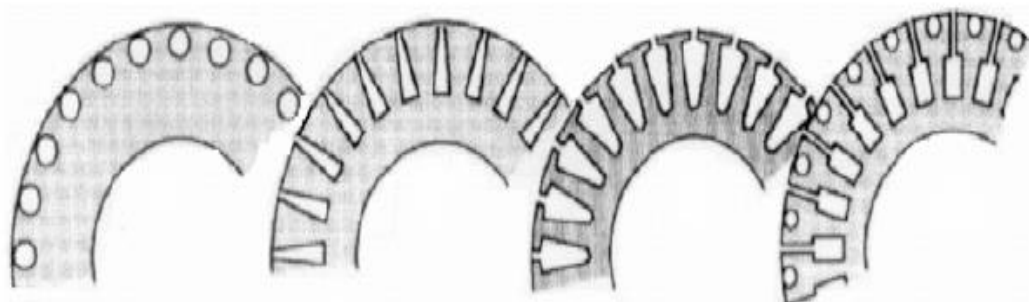


Figura 10.- Laminas del rotor del motor de inducción tipo jaula de ardilla [24]

En las ranuras del núcleo del rotor se colocan las barras y se cortocircuitan por ambos extremos mediante los anillos, formando así el bobinado del rotor. El bobinado del rotor, sin el núcleo, por su aspecto exterior, se parece a una jaula de ardilla; de allí el nombre del rotor. El conjunto núcleo y barras cortocircuitadas se acopla al eje, denominado eje del rotor. Al ser alimentado el estator, se genera un campo electromagnético que, por medio de inducción magnética, el rotor se induce por medio de corrientes trifásicas que hace que gire.

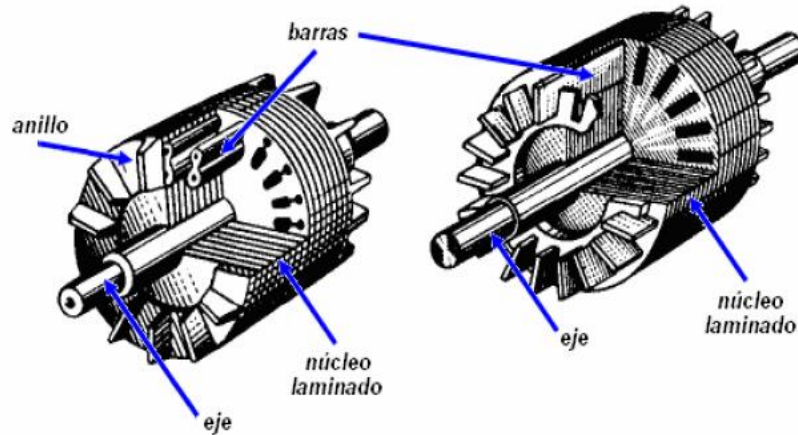


Figura 11.- Rotor del Motor de inducción tipo jaula de ardilla [24]

### 3.3. Tipos de controles en el motor de inducción tipo jaula de ardilla

#### 3.3.1. Control escalar

Este método se basa en hacer un cambio en la frecuencia y el voltaje que se aplica al estator también se le conoce como control V/F, este método de control se basa en el modelo estático el motor de inducción además de que su operación es en lazo abierto. Los variadores de frecuencia que existen en el mercado funcionan cambiando o ajustando la magnitud del voltaje, así como la frecuencia a la cual es alimentado el motor.

Por esta razón se puede cambiar la velocidad y ser controlada además de que el campo magnético que se genera en el estator es constante. Por otro lado, la corriente en el estator es senoidal sin importar que la magnitud de voltaje y frecuencia hayan sido ajustadas. En la literatura se dice que el control escalar es la técnica más común utilizada ya que el voltaje de las bobinas del estator es ajustado respecto a la frecuencia de alimentación, esto conlleva a que el flujo magnético del estator se mantenga constante. Como se dijo al principio es simple porque solo requiere de la retroalimentación en lazo abierto de la velocidad [16].

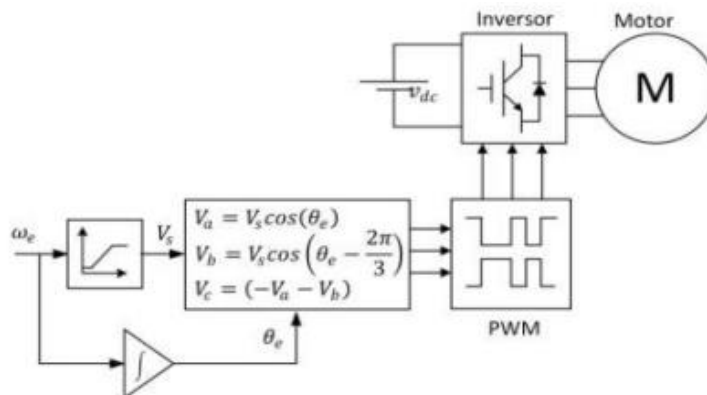


Figura 12.- Control escalar [16]

### 3.3.2. Control directo de torque

A partir de las variables del estator de motor de inducción se calculan los valores instantáneos del par o torque y del flujo electromagnético. Estas dos variables se controlan de forma directa e independientes a través de la selección óptima de los estados de conmutación del convertidor DC/AC además de limitar los errores del flujo y del torque mediante controladores de par y de histéresis del flujo.

Al utilizar adecuadamente los estados de conmutación se controla el par del motor mediante la rotación del vector de flujo, aprovechando los estados de conmutación se controla la magnitud del vector de flujo [16].

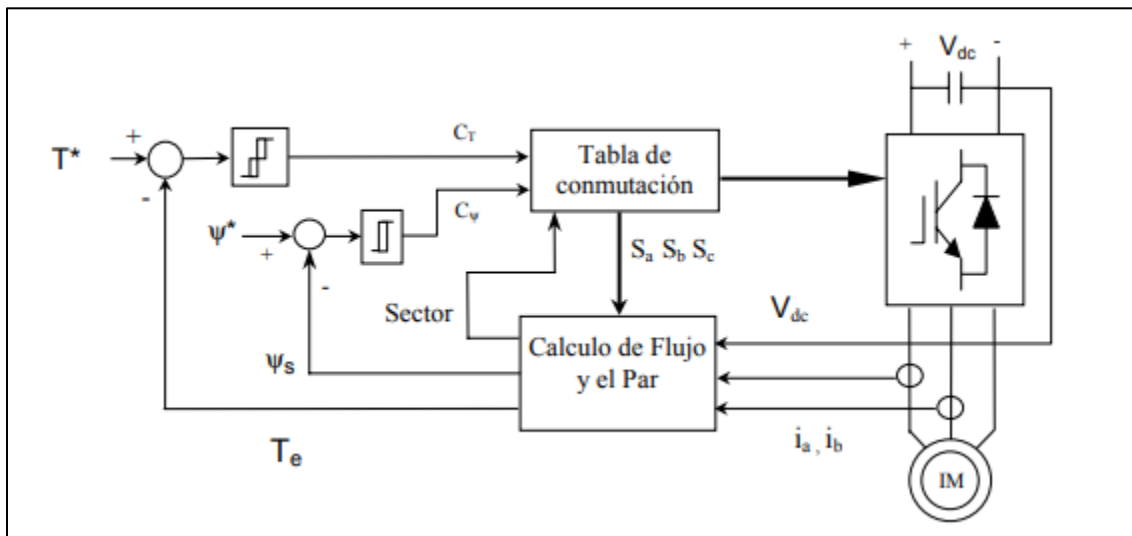


Figura 13.- Control directo de par [16]

### 3.4. Modelo ideal del motor de inducción

Se puede considerar que la parte más compleja en el diseño de un accionamiento es definir el modelo del motor de inducción. Ya que además de incluir los parámetros clásicos en el sistema de ecuaciones y de definir las variables de control, en este se deben considerar algunos fenómenos que modifican el comportamiento de la máquina a medida que las condiciones de operación van cambiando. También es necesario considerar las pérdidas que se producen por fenómenos eléctricos, mecánicos y en ocasiones las producidas por la conmutación de los dispositivos de potencia. A continuación, se presenta el sistema de ecuaciones que definen el modelo ideal de un motor de inducción. Se considera para el análisis en un sistema de referencia (d-q) orientado con el vector de flujo del rotor  $\Psi_r$  del sistema de ecuaciones:

$$\frac{d\Psi_r}{dt} = \frac{-\Psi_r}{T_r} + \frac{i_d L_m}{T_r}$$

$$\begin{aligned} \frac{di_d}{dt} &= \frac{i_d}{T_s} + \frac{u_d}{L_s} + \frac{[\omega_0 L_s I_q + \frac{K_r \Psi_r}{T_r}]}{L_s} \\ \frac{di_q}{dt} &= \frac{-i_q}{T_s} + \frac{u_q}{L_s} + \frac{[\omega_0 L_s I_d + K_r \Psi_r Z_p \omega]}{L_s} \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{m_e - m_H}{J} \end{aligned} \quad (3.4.1)$$

Donde:

- $T_r$  es la constante de tiempo del rotor
- $i_d$  es la corriente de estator en el eje d
- $L_m$  es la inductancia de magnetización o inductancia mutua
- $T_s$  la constante de tiempo en el estator
- $u_d$  la tensión de estator en el eje d
- $K_r$  la constante definida por el cociente de  $L_m$  entre  $L_r$
- $i_q$  la corriente de estator en el eje q
- $L_s$  la inductancia total en el estator
- $u_q$  la tensión de estator en el eje q
- $\omega$  la velocidad actual del rotor
- $\omega_0$  la velocidad angular fundamental
- $m_e$  el par electromagnético
- $J$  la inercia del motor
- $m_H$  el par de carga
- $Z_p$  el número de pares de polos.

En la fig. 14 se ilustra el circuito equivalente por fase del motor de inducción, donde  $U_s$   $I_s$   $I_r$  son los vectores de tensión en el estator, la corriente en el estator y la corriente en el rotor respectivamente,  $f$  es la frecuencia de la tensión del estator.

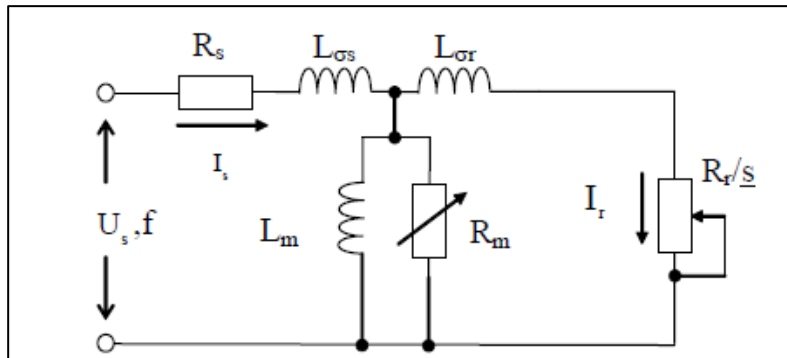


Figura 14.- Modelo por fase de un motor de inducción [22]

Del sistema de ecuaciones anterior (3.4.1) y apoyándose en la figura 12 se hace la definición de las variables del motor con la siguiente ecuación (3.4.2) se determina la ecuación del par electromagnético respecto de la corriente de par y el flujo en el rotor del motor

$$m_e = k_m \Psi_r i_q \quad (3.4.2)$$

La constante de tiempo del estator

$$T_s = \frac{L_s}{R_s} \quad (3.4.3)$$

La inductancia total en el estator es:

$$L_s = L_{\sigma s} + K_r L_{\sigma r} \quad (3.4.4)$$

La resistencia del estator esta dado por:

$$R_s = L_{\sigma s} + K_r^2 L_{\sigma r} \quad (3.4.5)$$

La constante de tiempo del rotor:

$$T_r = \frac{L_r}{R_r} \quad (3.4.6)$$

Las constantes  $K_r$  y  $K_m$  se forman con la inductancia de magnetización, el número de pares de polos y la inductancia total en el rotor como en la ecuación:

$$K_r = \frac{L_m}{L_r} \quad (3.4.7)$$

$$K_m = \frac{3Z_p K_r}{2} \quad (3.4.8)$$

Las ecuaciones 3.9 y 3.10 definen  $L_s$  y  $L_r$  inductancias para el rotor y estator respectivamente en función de las inductancias de fuga  $L_{\sigma s}$  y  $L_{\sigma r}$  y la inductancia de magnetización  $L_m$ .

$$L_s = L_{\sigma s} + L_m \quad (3.4.9)$$

$$L_r = L_{\sigma r} + L_m \quad (3.4.10)$$

La frecuencia angular fundamental del rotor es:

$$c = \omega Z_p + \omega_s \quad (3.4.11)$$

La frecuencia de deslizamiento se define con la ecuación (3.12) y el deslizamiento con la ecuación (3.13).

$$\omega_s = \frac{K_r R_r i_q}{\Psi_r} \quad (3.4.12)$$

$$s = \frac{\omega_0 - Z_p \omega}{\omega_0} \quad (3.4.13)$$

$\Psi_m$  es el flujo de magnetización que en un sistema de referencia de flujo orientado se calcula con la ecuación (3.14)

$$\Psi_r = \Psi_r^2 + i_q^2 + K_r^2 L_{\sigma r}^2 \quad (3.4.14)$$

### 3.5. Flujos electromagnéticos giratorios

Los flujos magnéticos se producen al alimentar de la red a los devanados del estator del motor con una señal trifásica balanceada y desfasada 120 grados ( $2\pi/3$  radianes). Las ecuaciones de flujo se representan utilizando coordenadas polares.

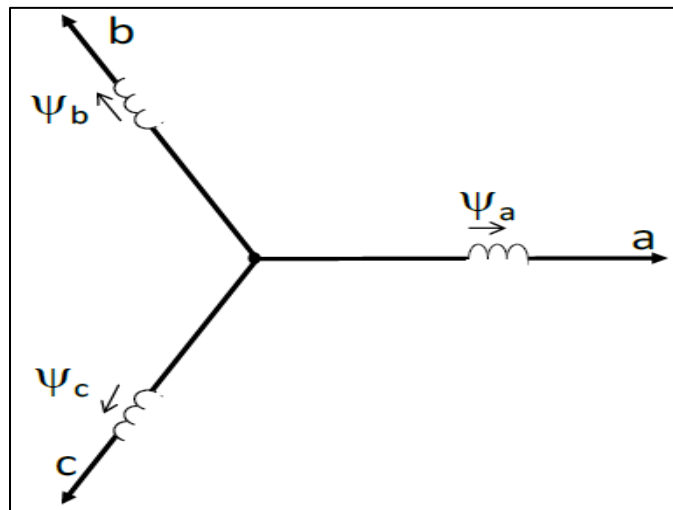


Figura 15.- Flujos magnéticos a-b-c

Flujo total:

$$\vec{\Psi} = \Psi_a \Psi_b e^{j2\pi/3} \Psi_c e^{-j2\pi/3} \quad (3.5)$$

$$\Psi_a = \Psi_m \text{sen}(\omega t) \quad (3.5.1)$$

$$\Psi_b = \Psi_m \text{sen}(\omega t + 2\pi/3)$$

$$\Psi_a = \Psi_m \text{sen}(\omega t - 2\pi/3)$$

Al usar 3.5.1 en 3.5 se obtiene la siguiente ecuación

$$\vec{\Psi} = \Psi_m \text{sen}(\omega t) + \Psi_m \text{sen}(\omega t + 2\pi/3)e^{j2\pi/3} + \Psi_m \text{sen}(\omega t - 2\pi/3)e^{-j2\pi/3} \quad (3.5.2)$$

Al simplificar la ecuación anterior se obtiene

$$\vec{\Psi} = \frac{3}{2} \Psi_m e^{j(\omega t + \theta)} \quad (3.5.3)$$

Donde:

El ángulo  $\theta$  es incluido en la ecuación para hacer de esta una ecuación general, esto se refiere a que cuando  $t=0$ , el vector de flujo pueda tener una componente compleja distinta de 0, estas operaciones matemáticas tienen como objetivo producir un vector giratorio ya que la suma de los vectores con un desfase de 120 grados espaciales a la par que están desfasados 120 grados en el tiempo hacen que tenga un ángulo directamente proporcional a la frecuencia de operación respecto al ángulo de referencia.

### 3.6. Transformada de Clarke

También se le conoce como transformación  $\alpha$ - $\beta$ , la ecuación 3.5.3 representa al vector de flujo  $\vec{\Psi}$  en coordenadas polares esto quiere decir que  $\vec{\Psi}$  está compuesto por una parte real y una parte imaginaria. Normalmente  $\alpha$  se encuentra ubicado en el eje real y  $\beta$  en el eje imaginario, basándose en esto el flujo se representa como:

$$\vec{\Psi} = \Psi_\alpha + j\Psi_\beta \quad (3.6)$$

La transformación de Clarke consiste en transformar un sistema trifásico a-b-c balanceado a un sistema bifásico ortogonal  $\alpha$ - $\beta$  estacionario, al sistema trifásico balanceado se le llama así ya que sus tres fases están desfasadas 120 grados en el tiempo y su amplitud es la misma una respecto a la otra, por otro lado, el sistema ortogonal  $\alpha$ - $\beta$  se compone por una parte real y una parte imaginaria desfasadas 90 grados en el tiempo.

Usando la ecuación 3.5 y 3.5.1 con ecuaciones lineales y trigonometría el cambio de coordenadas de los sistemas se puede expresar de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} \Psi_\alpha \\ \Psi_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & \sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi_a \\ \Psi_b \\ \Psi_c \end{bmatrix} \quad (3.6.1)$$

Y para hacer la transformación inversa se representa de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} \Psi_a \\ \Psi_b \\ \Psi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2/3 & 0 \\ -1/3 & 1/\sqrt{3} \\ -1/3 & -1/\sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi_\alpha \\ \Psi_\beta \end{bmatrix} \quad (3.6.2)$$

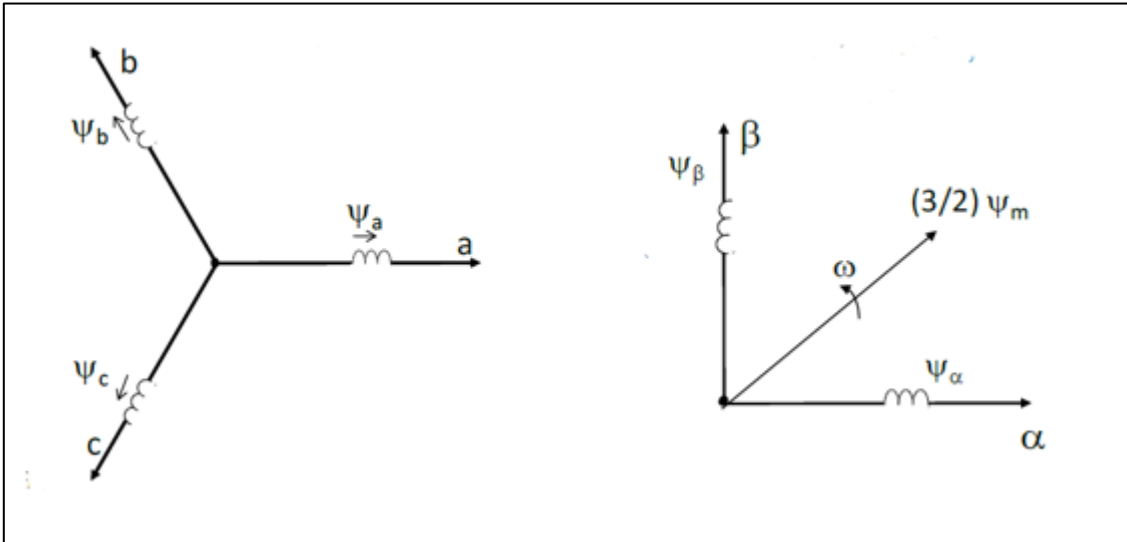


Figura 16.- Eje de referencia a-b-c y eje de referencia  $\alpha$ - $\beta$

En la figura anterior se puede observar que  $\alpha$  se encuentra en fase con la señal a debido a que  $i_\alpha = i_a - (1/2)(i_b + i_c) = (3/2)i_a$ .

### 3.7. Modelo matemático $\alpha$ - $\beta$ del MITJA

Al tener en cuenta las coordenadas en el marco de referencia  $\alpha$ - $\beta$  el motor de inducción tipo jaula de ardilla puede modelarse con las ecuaciones tanto de estator como de rotor en un marco de referencia Alpha-Beta.

$$V_{sa} = R_s i_{sa} + \frac{d\Psi_{sa}}{dt} \quad (3.7.0)$$

$$V_{sb} = R_s i_{sb} + \frac{d\Psi_{sb}}{dt} \quad (3.7.1)$$

$$V_{sc} = R_s i_{sc} + \frac{d\Psi_{sc}}{dt} \quad (3.7.2)$$

$$0 = R_r i_{ra} + \frac{d\Psi_{ra}}{dt} \quad (3.7.3)$$

$$0 = R_r i_{rb} + \frac{d\Psi_{rb}}{dt} \quad (3.7.8)$$

$$0 = R_r i_{rc} + \frac{d\psi_{rc}}{dt} \quad (3.7.9)$$

Las ecuaciones (3.7) (3.7.1) (3.7.2) al ser multiplicadas por su desfase en el tiempo y haciendo su suma se obtiene la ecuación (3.7.10) que a su vez al pasarla al sistema de coordenadas  $\alpha$ - $\beta$  se puede representar como la ecuación (3.7.11)

$$V_{sa} + V_{sb} e^{j2\pi/3} V_{sc} e^{-j2\pi/3} = R_s (i_{sa} + i_{sb} e^{j2\pi/3} + i_{sc} e^{-j2\pi/3}) + \frac{d(\psi_{sa} + \psi_{sb} e^{j2\pi/3} + \psi_{sc} e^{-j2\pi/3})}{dt} \quad (3.7.10)$$

$$\bar{V}_s = R_s \bar{i}_s + \frac{d\bar{\psi}_s}{dt} \quad (3.7.10)$$

De la misma forma las ecuaciones del rotor pueden escribirse como:

$$0 = R_r \bar{i}_r + \frac{d\bar{\psi}_r}{dt} \quad (3.7.11)$$

Para el torque que proporciona la máquina de inducción se representa en la ecuación (3.7.12) donde:

- $J$  es el momento de inercia de la carga + el momento de inercia de la máquina de inducción
- $B$  es el coeficiente de fricción viscosa
- $\omega_r$  es la velocidad rotacional
- $T_L$  es el torque de la carga

$$T_e = J \frac{d\omega_r}{dt} + B\omega_r + T_L \quad (3.7.12)$$

Finalizando con esta parte se debe tener en cuenta que las ecuaciones para el rotor y estator representadas en  $\alpha$ - $\beta$  están en distintos planos, debido a que para estimar la velocidad se necesita un observador ubicado en el estator por lo tanto las coordenadas  $\alpha$ - $\beta$  de este son estacionarias, por otro lado, las coordenadas  $\alpha$ - $\beta$  del rotor se encuentran rotando a la velocidad del rotor  $\omega_r$ .

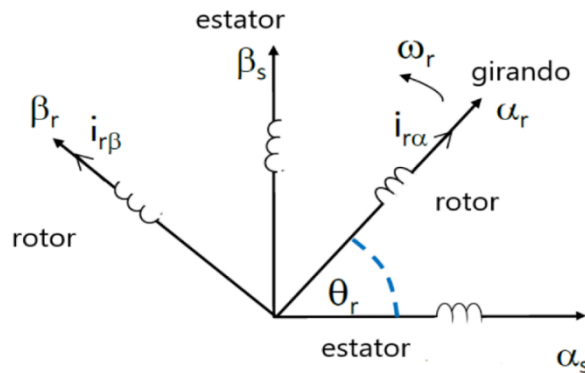


Figura 17.- coordenadas Alpha-beta del estator y del rotor

En la figura 17 se debe tener en cuenta que las corrientes en el estator y rotor son senoidales, pero con una frecuencia distinta ya que en el estator hay una frecuencia  $\omega_e$  y en rotor la frecuencia  $\omega_{LS} = \omega_e - \omega_r$ .

En la máquina de inducción tipo jaula de ardilla existen 3 diferentes flujos que se generan al alimentar con una señal trifásica al estator, estos flujos se inducen al rotor y se representan de la siguiente manera:

El flujo de dispersión del estator:

$$\overline{\Psi}_s = \overline{\Psi}_0 + \overline{\Psi}_{l_s} \quad (3.7.13)$$

El flujo de dispersión del rotor:

$$\overline{\Psi}_r = \overline{\Psi}_0 + \overline{\Psi}_{l_r} \quad (3.7.14)$$

El flujo del entrehierro:

$$\overline{\Psi}_0 = L_0 \overline{i}_s + L_0 \overline{i}_r = L_0 (\overline{i}_s + \overline{i}_r) \quad (3.7.15)$$

Donde la inductancia mutua  $L_0$  es la existente entre el rotor y el estator y los flujos de ambos se representan como:

$$\overline{\Psi}_s = L_{l_s} \overline{i}_s + \overline{\Psi}_0 = L_{l_s} \overline{i}_s + L_0 (\overline{i}_s + \overline{i}_r) = L_s \overline{i}_s + L_0 \overline{i}_r \quad (3.7.16)$$

$$\overline{\Psi}_r = L_{l_r} \overline{i}_r + \overline{\Psi}_0 = L_0 \overline{i}_s + L_r \overline{i}_r \quad (3.7.17)$$

Donde:

$L_{l_s}$  y  $L_{l_r}$  son inductancias de dispersión y  $L_r$  y  $L_s$  son las inductancias mutuas

Para llevar a cabo el control vectorial por campo orientado directo en el motor de inducción tipo jaula de ardilla se necesitan usar variables de estados y estas son dos, la primera es el flujo del rotor en coordenadas  $\alpha$ - $\beta$  y la segunda es la corriente del estator en  $\alpha$ - $\beta$  también, por otro lado, las variables faltantes se expresan en función de estas dos.

Por un lado, usando la ecuación (3.7.16) y (3.7.17) se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$\overline{i}_r = \frac{\overline{\Psi}_r - L_0 \overline{i}_s}{L_r} \quad (3.7.18)$$

$$\overline{\Psi}_s = L_{l_s} \overline{i}_s + L_0 \left( \frac{\overline{\Psi}_r - L_0 \overline{i}_s}{L_r} \right) \quad (3.7.19)$$

Y el coeficiente de dispersión se representa en la ecuación (3.7.20) este coeficiente es una medida total del flujo de dispersión esto quiere decir que se considera el flujo de dispersión del estator y del rotor y se representa en la ecuación (3.7.21) utilizando las ecuaciones (3.7.19) y (3.7.20)

$$\sigma = \frac{L_s L_r - L_0^2}{L_s L_r} \quad (3.7.20)$$

$$\bar{\Psi}_s = \sigma L_{ls} \bar{i}_s - \frac{L_0}{L_r} \bar{\Psi}'_r \quad (3.7.21)$$

Remplazando la ecuación (3.7.21) en (3.7.10) resulta:

$$\bar{V}_s = R_s \bar{i}_s + \frac{d(\sigma L_{ls} \bar{i}_s - \frac{L_0}{L_r} \bar{\Psi}'_r)}{dt} \quad (3.7.22)$$

De la misma manera remplazando (3.7.22) en (3.7.10) se puede escribir:

$$\bar{V}_s = R_s \bar{i}_s + \sigma L_{ls} \frac{d(\bar{i}_s)}{dt} + \frac{L_0}{L_r} \frac{d \bar{\Psi}'_r}{dt} \quad (3.7.23)$$

Se hace lo mismo para la ecuación del rotor:

$$0 = R_r \left( \frac{\bar{\Psi}_r - L_0 \bar{i}_s}{L_r} \right) + \frac{d \bar{\Psi}_r}{dt} \quad (3.7.24)$$

$$0 = \frac{\bar{\Psi}_r}{T_r} - \frac{L_0 \bar{i}_s}{T_r} + \frac{d \bar{\Psi}_r}{dt} \quad (3.7.25)$$

Donde  $T_r$  es la constante de tiempo del rotor  $T_r = \frac{L_r}{R_r}$

Para concluir con las ecuaciones complejas principales de la maquina en  $\alpha$ - $\beta$  considerando el flujo del rotor y la corriente de estator como las principales variables para su control vectorial se representan de la siguiente manera:

$$\bar{v}_s = R_s \bar{i}_s + \sigma L_s \frac{d \bar{i}_s}{dt} + \frac{L_0}{L_r} \frac{d \bar{\Psi}'_r}{dt} \quad (3.7.26)$$

$$0 = \frac{\bar{\Psi}_r}{T_r} - \frac{L_0 \bar{i}_s}{T_r} + \frac{d \bar{\Psi}'_r}{dt} \quad (3.7.27)$$

### 3.8. Transformada de Park

La transformada de Park consiste en tomar las señales trifásicas a-b-c ya convertidas por la transformada de Clarke en Alpha y beta que son dos señales bifásicas ortogonales, pero aun

senoidales para convertirlas en dos señales directas d-q, el proceso se hace con trigonometría y en un marco de referencia giratorio.

Este proceso matemático se hace por una razón la cual es que el control vectorial se trata de esto, controlar una máquina de inducción de corriente alterna como si fuera una máquina de corriente directa, ya que se puede controlar el flujo y el torque de manera desacoplada. Haciendo una analogía, el flujo se controla como si fuera la corriente de campo de la máquina de corriente continua y el torque se controla como si fuera la corriente de armadura. Sin embargo, en el marco de referencia  $\alpha$ - $\beta$  las ecuaciones no son útiles para usar en el control vectorial debido a que son señales senoidales con frecuencias distintas como se menciona previamente.

Por otro lado, para transformar estas ecuaciones en el marco de referencia  $\alpha$ - $\beta$  a ecuaciones con señales en corriente directa d-q se necesita transportarlas a un sistema con marco de referencia giratorio a la velocidad síncrona  $\omega_e$ , por esta razón los vectores de la máquina de inducción tipo jaula de ardilla en estado estacionario se pueden representar de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}\bar{\Psi}_r &= \frac{3}{2}\Psi_{rm}e^{j(\omega t + \theta_1)} \\ \bar{i}_s &= \frac{3}{2}i_{sm}e^{j(\omega t + \theta_2)}\end{aligned}\tag{3.8.0}$$

Teniendo en cuenta que  $\theta_1$  y  $\theta_2$  son dos ángulos de fase cualesquiera, donde solo se usan para hacer general de la ecuación (3.8.0), en la cual se nota que ambas ecuaciones están rotando a una velocidad síncrona en estado estacionario, en este caso para usar un observador se necesita localizarlo en el sistema de referencia d-q para que desde esta referencia se note que los vectores de corriente y flujo están detenidos (cuando en realidad están girando a la misma velocidad), lo que hace que la señal sea una corriente continua.

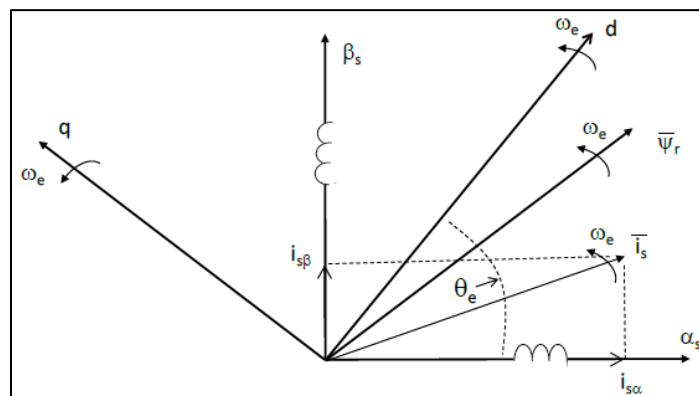


Figura 18.- Ejes giratorios d-q

En la figura 18 se muestran los ejes rotóricos d-q y solo se muestran los ejes  $\alpha$ - $\beta$ , las corrientes de estator se transfieren a coordenadas d-q usando ecuaciones trigonométricas.

$$\begin{aligned} i_{sd} &= i_{s\alpha} \cos(\theta_e) + i_{s\beta} \sin(\theta_e) \\ i_{sq} &= -i_{s\alpha} \sin(\theta_e) + i_{s\beta} \cos(\theta_e) \end{aligned} \quad (3.8.1)$$

Como se dijo previamente las corrientes  $i_{sd}$  y  $i_{sq}$  son continuas en estado estacionario. También se usan de forma inversa para mandar las señales al inversor, para ambos casos se usa la siguiente expresión:

$$\begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_e) & \sin \theta_e \\ -\sin \theta_e & \cos \theta_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} \quad (3.8.2)$$

También se puede hacer directamente de a-b-c a d-q para evitar un paso de transformación, usando la ecuación (3.6.1):

$$\begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_e) & \sin \theta_e \\ -\sin \theta_e & \cos \theta_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & \sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \quad (3.8.2)$$

Las siguientes figuras muestran de forma gráfica las transformadas previamente desarrolladas.

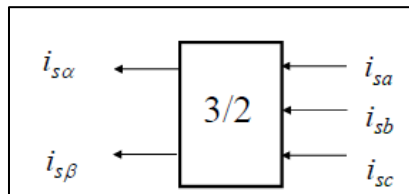


Figura 19.- Transformada a-b-c a  $\alpha$ - $\beta$

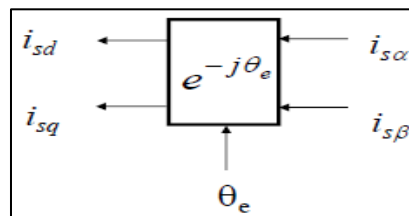


Figura 20.- Transformada  $\alpha$ - $\beta$  a dq

Pero también se puede hacer la transformación inversa del sistema d-q a  $\alpha$ - $\beta$  y se expresa de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_e) & -\sin \theta_e \\ \sin \theta_e & \cos \theta_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} \quad (3.8.2)$$

adecuando la ecuación (3.6.2) en (3.8.2) se transforma desde d-q a a-b-c:

$$\begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2/3 & 0 \\ -1/3 & 1/\sqrt{3} \\ -1/3 & -1/\sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\theta_e) & -\sin \theta_e \\ \sin \theta_e & \cos \theta_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} \quad (3.8.3)$$

De igual forma se puede representar gráficamente como se llega de las corrientes d-q a corrientes a-b-c.

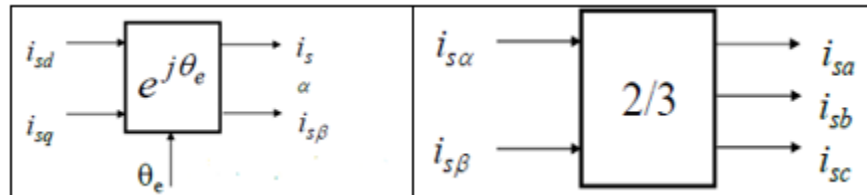


Figura 21.- Transformada dq a  $\alpha$ - $\beta$  y de  $\alpha$ - $\beta$  a abc

## Capítulo 4. Desarrollo

En este capítulo se establece el desarrollo del proyecto, se inicia por la parte de protecciones, es la parte principal de un proyecto eléctrico, ya que en esta parte es donde se protege al equipo, el cableado y la red eléctrica en general con base a estándares americanos, siguiendo con el modelo eléctrico del motor y la simulación del control vectorial directo, modelado y simulado en Simulink de Matlab, en el laboratorio de mecatrónica de la estancia se llevó a cabo el control escalar con el variador de frecuencia Bonfiglioli vectron, con dos tipos de comunicación; la local con el módulo KP-522 y la comunicación remota con el módulo KP-232 usando comunicación serial con DB9, posteriormente se llevó a cabo el control vectorial con la dSPACE, Simulink y ControlDesk, verificando y haciendo una comparación entre la parte simulada y la parte física. Para realizar el proyecto en el laboratorio se hizo el uso de los siguientes recursos técnicos:

- dSPACE ds2003
- computadora con Simulink, ControlDesk, Vplus
- variador Bonfiglioli vectron
- motor de inducción Bonfiglioli 0.375 kW
- motor de imanes permanentes Bonfiglioli
- Encoder
- Módulos de sensores de corriente

- Osciloscopio
- Fuente de alimentación CD 24 v
- Bus DC 240 VCD
- Inversor
- Comunicación fibra óptica

#### 4.1. Diagrama unifilar y gráfica de coordinación de protecciones

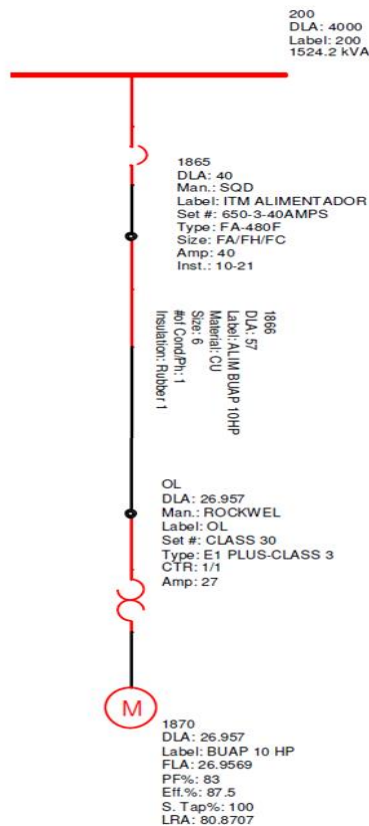


Figura 22.- Diagrama unifilar para protección del motor de inducción

La figura 22 representa de manera grafica el equipo de protección contra corto circuito, contra sobrecarga y contra la temperatura, se le llama unifilar ya que solo se representa en una sola línea. Sin embargo, es un sistema eléctrico trifásico, este sirve para cualquier eventualidad en la puesta en marcha del sistema, su objetivo principal es proteger tanto el equipo como la instalación eléctrica.

La tarea principal de un sistema eléctrico es prevenir el daño a las personas, reducir al máximo el daño a los elementos del sistema y hacer un lapso breve la duración de la interrupción del servicio cuando se presentan fallas ya sea por error humano, o por situaciones externas que actúan sobre el sistema.

La NOM-001-SEDE-2012 establece [32]:

Los dispositivos de protección deben tener una capacidad de interrupción adecuada y las partes energizadas deben estar encerradas o aisladas para que no estén expuestas a las personas en caso de explosión, fuego, arqueo o descarga eléctrica.

La coordinación es la selección o ajuste (o ambos) de los dispositivos de protección para aislar la parte del sistema eléctrico cuando ocurren anomalías.

Principales eventos contra los que hay que proteger un sistema eléctrico:

- Cortocircuitos. Ocasionados por una falla de aislamiento debido a exceso de humedad, daño mecánico al equipo eléctrico y/o por una falla del equipo debido a sobrecargas o mala utilización [32].

Los cortocircuitos pueden ser entre dos conductores de fase, entre todas las fases o entre una fase o fases y tierra.

- Sobrecargas. Producidas por conectar equipos con cargas mayores a las que un circuito es capaz de soportar, o por adicionar más equipos de los previstos por diseño. Pueden también ser ocasionadas por una instalación o mantenimiento inadecuado, no seguir los procedimientos de operación, éstas pueden ocurrir en el arranque, períodos de aceleración y ventilación obstruida [32].

Para aislar los cortocircuitos y las sobrecargas se requiere de la aplicación de los dispositivos de protección que detecten cuando una corriente anormal esté fluyendo por el circuito, estos dispositivos deben operar para limitar los efectos de una falla únicamente a la zona afectada y no afectar el resto del sistema.

Hay tres tipos de dispositivos fundamentales diseñados para detectar sobrecorrientes:

- Relevadores.
- Interruptores automáticos.
- Fusibles.

La coordinación de protecciones es una aplicación secuenciada de la corriente con la que actúan los dispositivos de protección en un sistema eléctrico, los cuales responden a una falla o a una sobrecarga, aislando solamente una cantidad mínima de equipo del servicio.

El estudio de coordinación de protecciones de un sistema eléctrico consiste en organizar la respuesta de las curvas tiempo-corriente de todos los dispositivos en serie desde los equipos a la fuente.

El objetivo de la coordinación de protecciones es determinar las características, rangos, y ajustes de los dispositivos de protección contra sobrecorriente que aseguren que cuando exista una falla mínima en la carga se interrumpa cuando los dispositivos de protección aislen la falla o la sobrecarga.

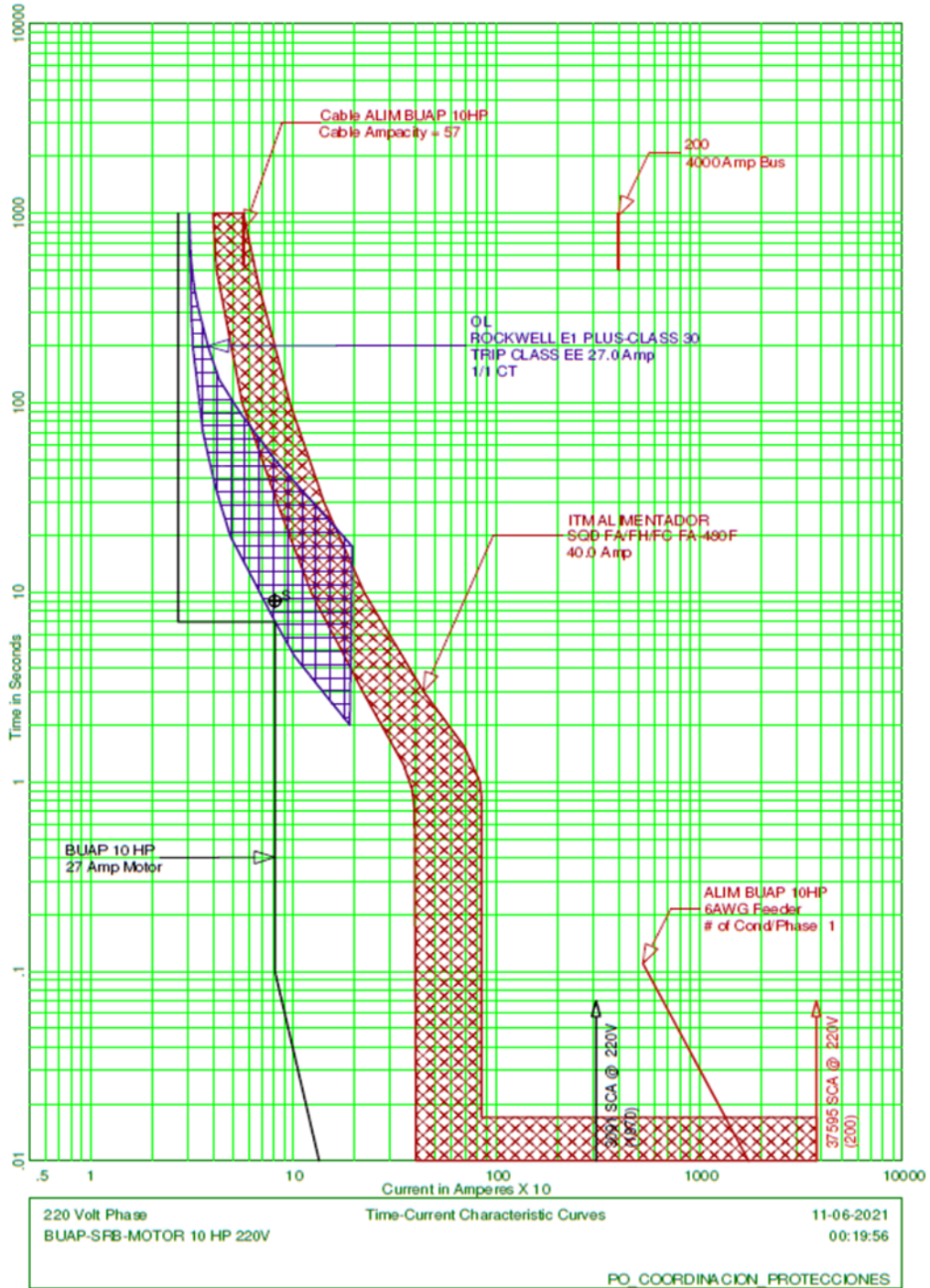


Figura 23.- Grafica de coordinación de protecciones

La figura 23 es una gráfica de la coordinación de protecciones para la alimentación de potencia del motor, al arrancar los motores eléctricos de inducción, existes distintas corrientes, las cuales deben tomarse en cuenta para el estudio de las protecciones eléctricas.

Los factores y corrientes que deben tomarse en cuenta son los siguientes:

El factor de servicio: es la sobrecarga que el motor soporta a su voltaje y corriente nominal, lo común es que el factor de servicio vaya en función de la corriente nominal del motor y este tiene un valor del rango de 1.05 a 1.25.

Como segundo factor que debe tenerse en cuenta es la corriente de rotor bloqueado: esta es la corriente que el motor consume al momento de aplicarle su voltaje nominal cuando se encuentra parado, la corriente de rotor bloqueado va en el rango de 4 a 7.5 veces la corriente nominal del motor.

También la corriente transitoria de arranque: esta se genera cuando el motor está detenido y se le aplica su voltaje nominal, normalmente surge en el primer ciclo de voltaje y puede llegar hasta 1.6 veces la corriente de rotor bloqueado para posteriormente desaparecer.

Consideraciones primarias

Corrientes de cortocircuito. Se debe tener la siguiente información:

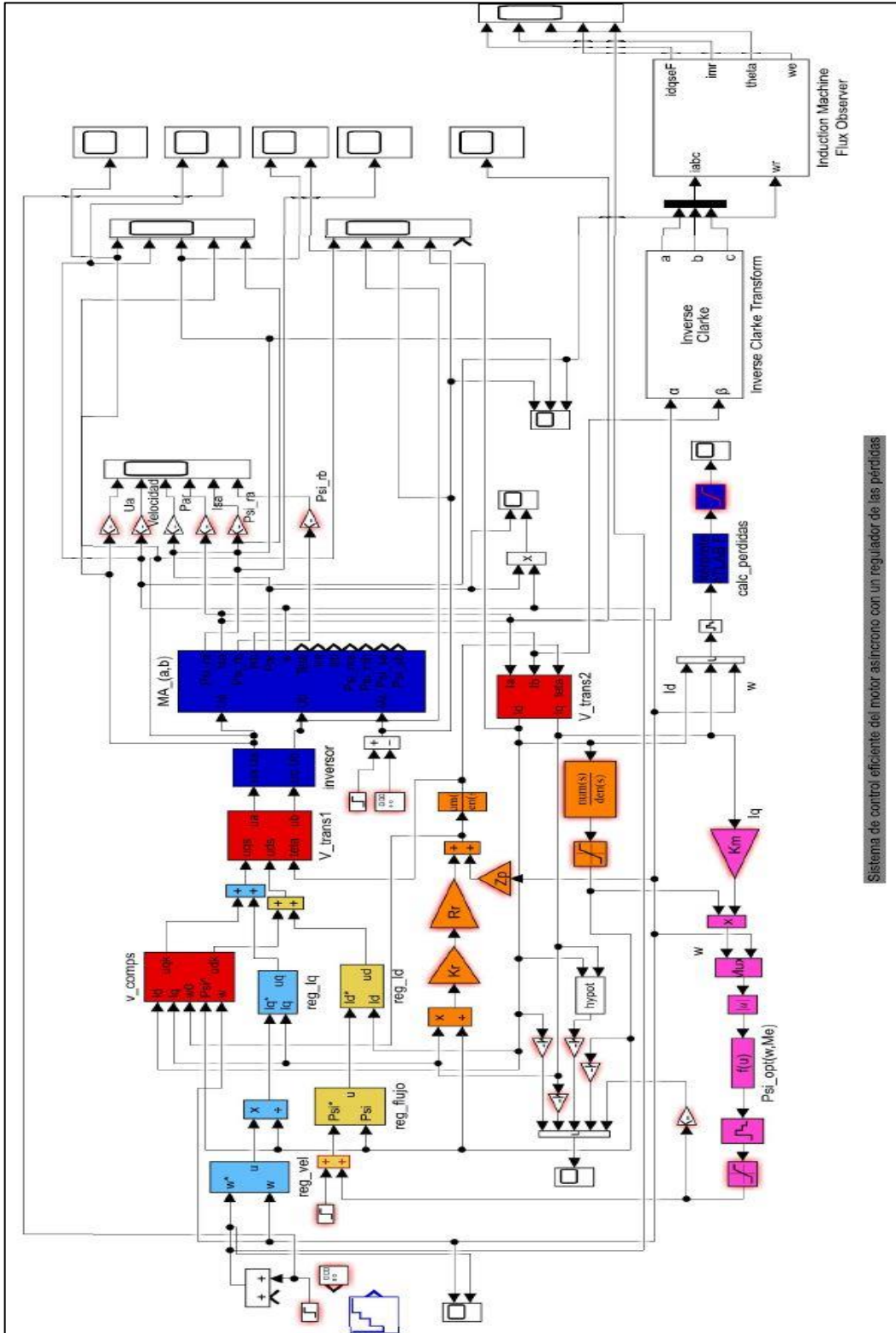
- Corriente de cortocircuito máxima y mínima momentánea (primer ciclo).
- Corriente de cortocircuito máxima y mínima (5 ciclos a 2 s).
- Corriente de falla a tierra máxima y mínima.
- Coordinación de los intervalos de tiempo.

Cuando se grafican las curvas para la coordinación se deben mantener ciertos intervalos de tiempo entre las curvas de varios dispositivos de protección en orden para asegurar la operación secuencial correcta de los dispositivos.

#### 4.2. Modelo en Simulink de Matlab

El modelo del control vectorial se realizó en Simulink, consta del motor de inducción modelado en Alpha-beta, siguiendo con la transformada del plano Alpha-beta al plano dq, posteriormente se tienen dos reguladores, uno para la velocidad y otro para el flujo magnético, los dos controles PI uno para la corriente  $i_q$  y otro para la  $i_d$ , posteriormente esas señales van a una transformada inversa para nuevamente quedar en los ejes Alpha-beta y controlar el motor, se le agregó una ecuación de optimización de eficiencia, para mejorar el rendimiento del motor, disminuyendo las pérdidas en el mismo.

La figura 24 representa el modelo del control vectorial en Simulink, mostrando por etapas el diseño, el modelo del motor de inducción es comparado con un motor ya diseñado en Simulink.



Sistema de control eficiente del motor asincrono con un regulador de las pérdidas

Figura 24.- Modelo del control vectorial directo en Simulink.

A continuación, se hace una breve descripción de cada bloque para una mejor comprensión de este.

#### 4.2.1. Transformada de Park

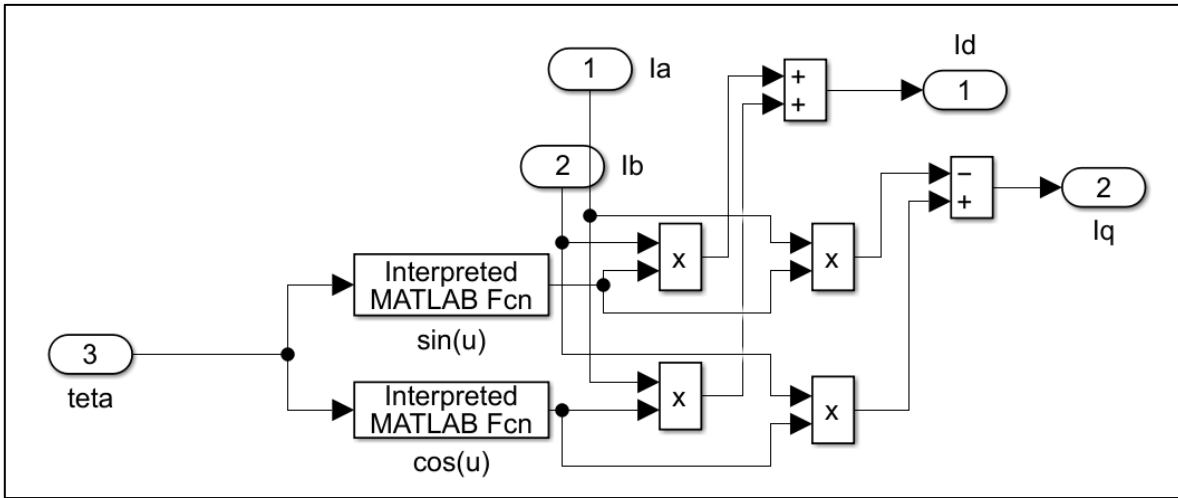


Figura 25.- Transformada de Park en Simulink

Las corrientes  $\alpha\beta$  que salen del motor se ingresan a este bloque el cual las transforma en coordenadas rotóricas dq con el mismo ángulo con el que gira el rotor del motor para no perder la posición y obtener las corrientes directa y de cuadratura de manera precisa.

#### 4.2.2. Regulador de velocidad

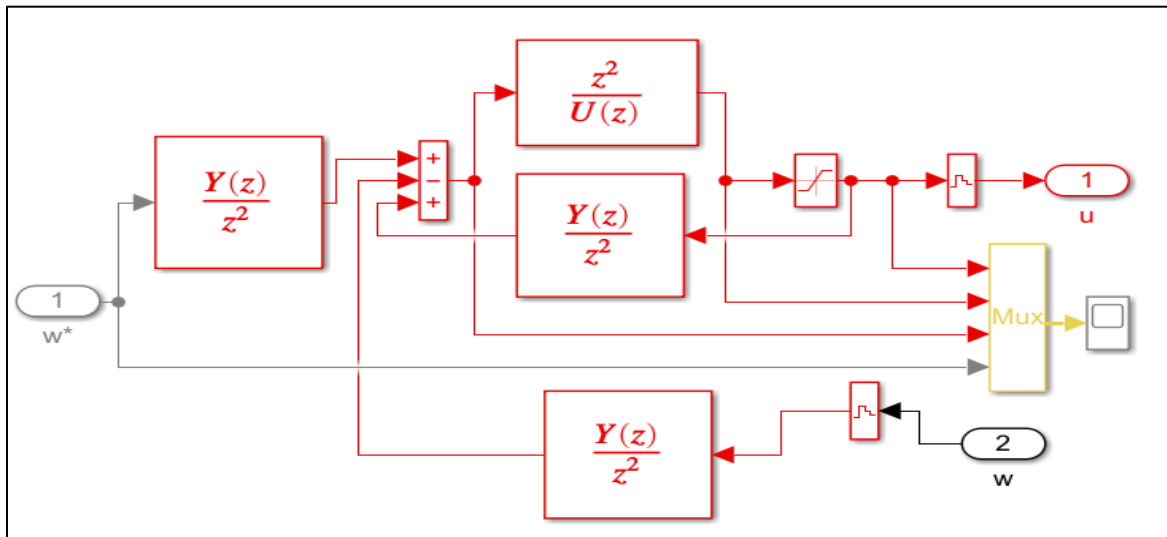


Figura 26.- Regulador de velocidad

El bloque que regula la velocidad consta de funciones de transferencia con los datos del motor en los archivos del control, se hace una comparación de la velocidad de referencia respecto a la velocidad dada por parte del motor, el error se limita con un saturador.

#### 4.2.3. Regulador de flujo

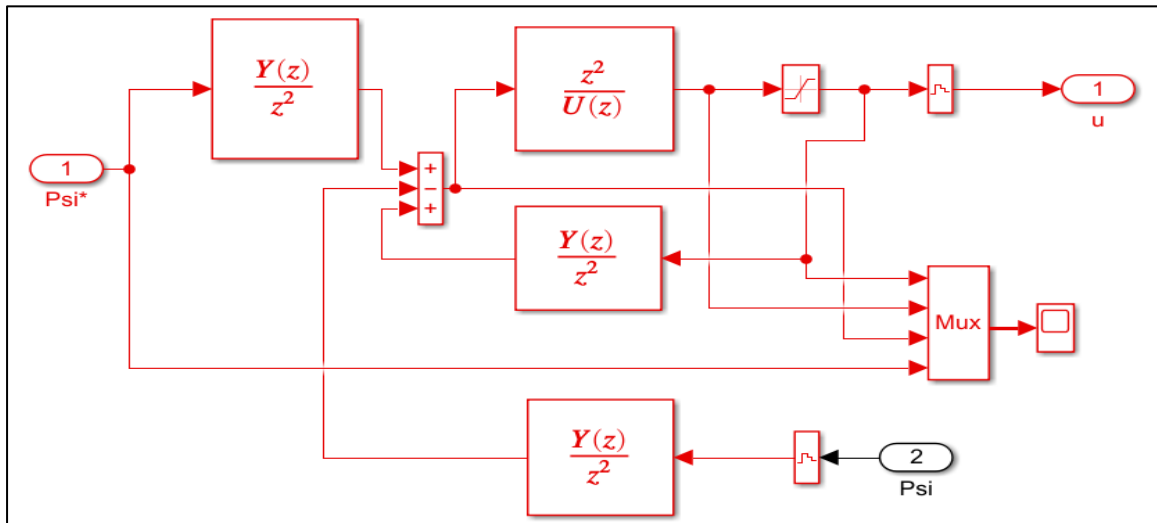


Figura 27.- Regulador de flujo

De la misma manera se compara el flujo de referencia con el flujo obtenido del motor para limitar el error y obtener un flujo óptimo para la regulación de la corriente  $i_d$  de igual manera el error se limita por ayuda de un saturador.

#### 4.2.4. Regulador corriente $i_q$

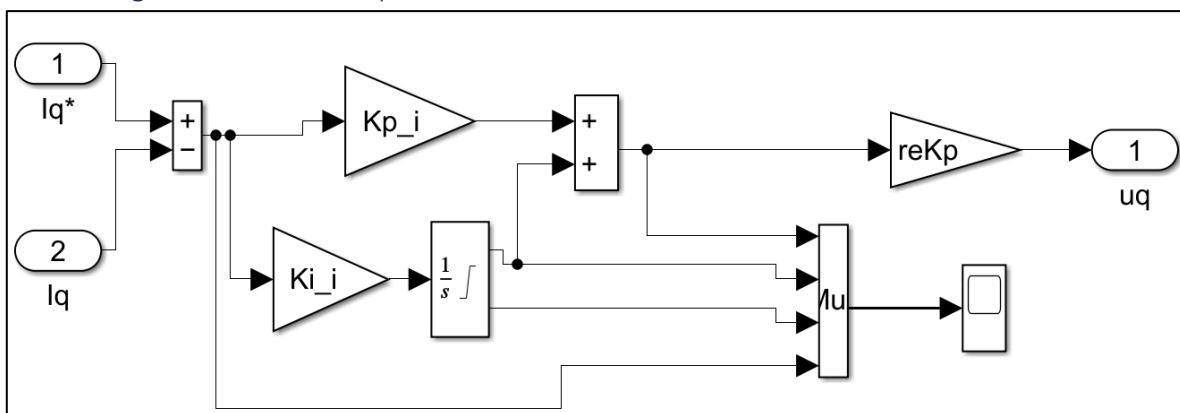


Figura 28.- Regulador corriente  $i_q$

El controlador PI reduce el error y compara el valor de referencia que genera la transformada de Park con el valor de error generado del control de velocidad que constituye el valor de entrada para el controlador de corriente de eje q.

#### 4.2.5. Regulador de corriente id

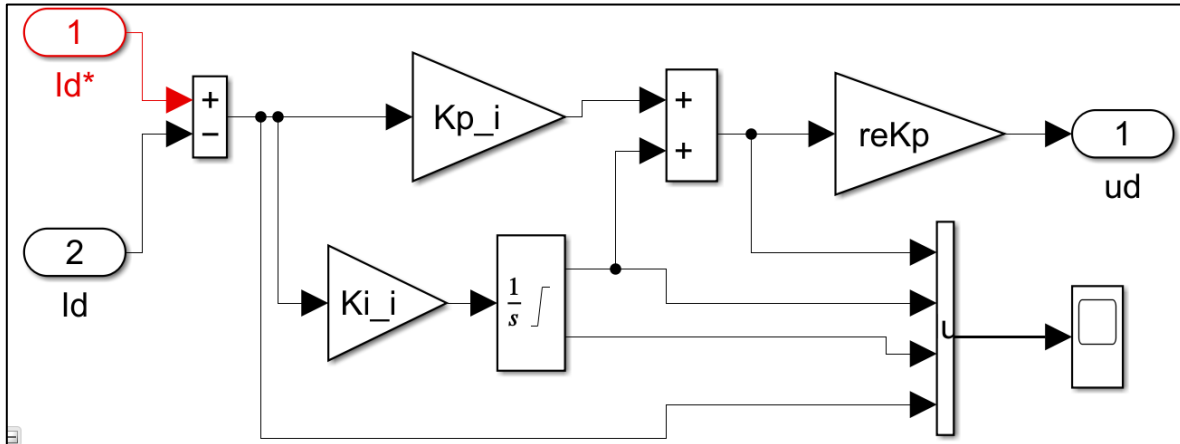


Figura 29.- Regulador de corriente id

De la misma manera como el controlador de corriente iq este regulador de corriente id es un control PI que compara el valor generado por la transformada de Park con el valor de error generado por el controlador de flujo en el eje d.

#### 4.2.6. Transformada inversa de Park

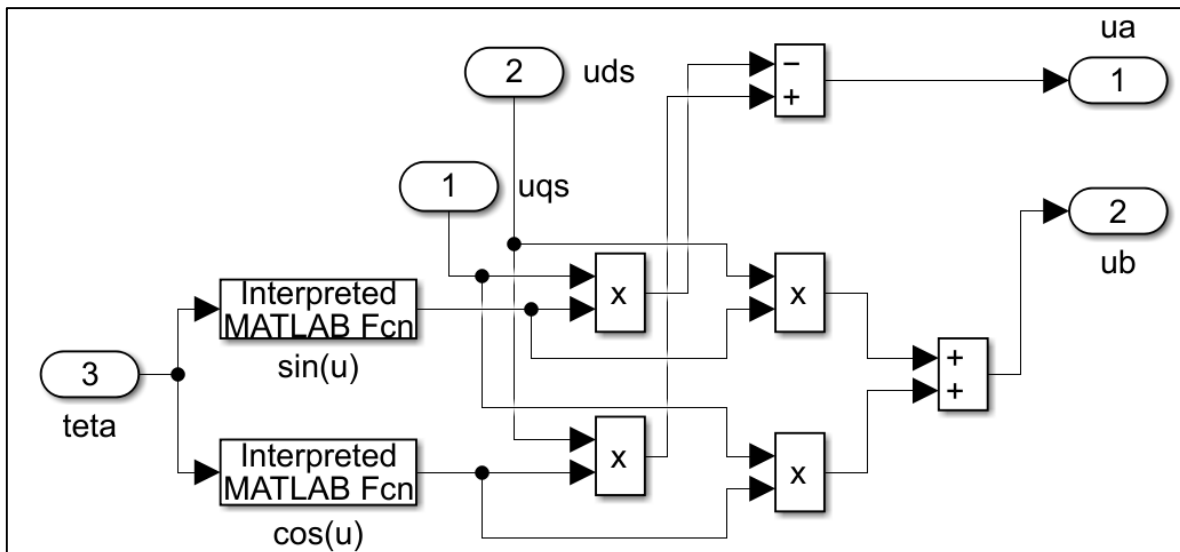


Figura 30.- Transformada inversa de Park

Al tener los valores de las corrientes  $i_q$  e  $i_d$  se ingresan al bloque de transformada inversa de Park para obtener las señales  $\alpha\beta$  controladas para posteriormente controlar el motor de inducción modelada en  $\alpha\beta$ .

#### 4.2.7. Cálculo de pérdidas

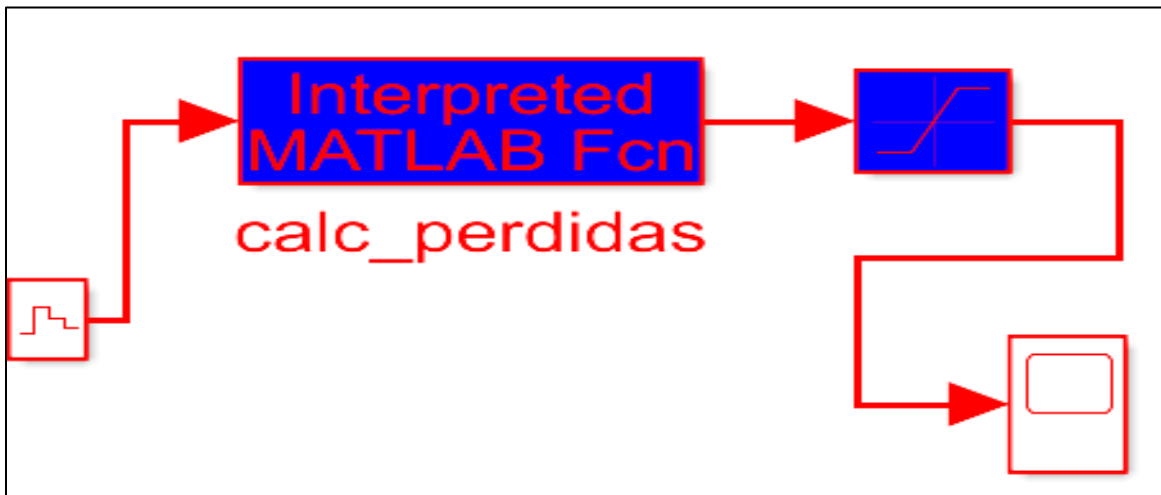


Figura 31.- Cálculo de pérdidas

El cálculo de pérdidas es una función que se genera en el código de Matlab para el control del motor, lo que hace es calcular las pérdidas que se generan en el motor y se transforman como pérdidas de potencia, estas se limitan por un saturador.

#### 4.2.8. Lazo de optimización de eficiencia

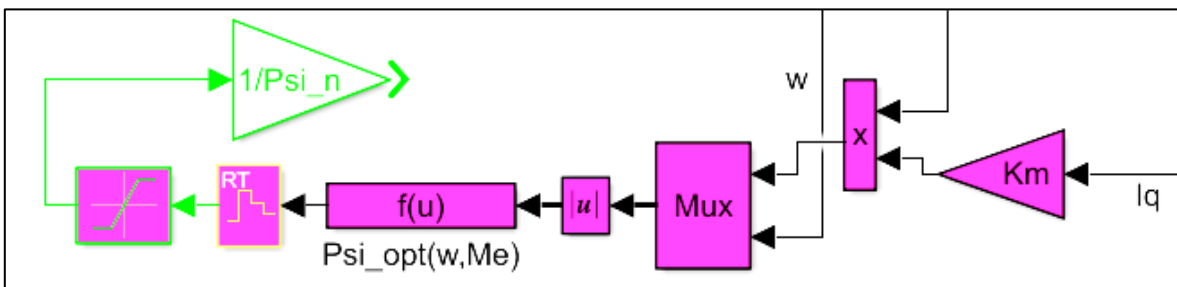


Figura 32.- Lazo de optimización de eficiencia

Es la parte más importante donde se hace la distinción del trabajo de tesis, es una función que nace de la teoría del flujo óptimo del motor, lo que hace que las pérdidas sean menores ya que el flujo varía respecto al torque y la velocidad requerida.

#### 4.3. Diagrama de bloques de la bancada

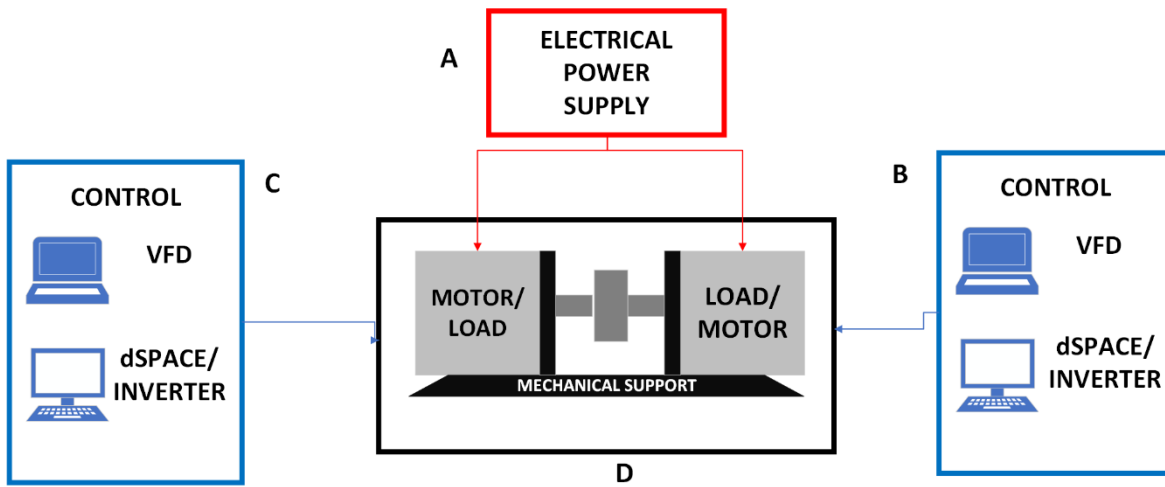


Figura 33.- Diagrama de bloques de la bancada de los motores

Tabla 5. Descripción de la bancada

Sección	Dispositivo	Descripción	Datos técnicos/capacidad
A: Es el sistema de alimentación de la bancada, con protecciones para cada motor.	Cable conductor	Elemento conductor.	35 amperes 12 AWG
	Fusible	Elemento que garantiza seccionamiento o apertura del circuito.	15 amperes
	Interruptor termomagnético	Protección automática contra corto circuito.	3 amperes
	Contactador	Elemento de maniobra.	3 amperes Siemens sirius 3RT1015-1BB41
	Guardamotor	Protección de sobre corriente por sobrecarga en el sistema	1.1 Amperes GV2P06 1...1,6 (Shneider electric)

<p><b>B:</b> Es el sistema de control, Hay dos alternativas, ya sea usar los variadores de frecuencia o probar un sistema de control propio usando la dSPACE y el inversor adecuado.</p>	Variador de frecuencia	Dispositivo de control de frecuencia para variar la velocidad.	Bonfiglioli active ACT 400
	Programador KP500	Dispositivo complementario para programar parámetros en el inversor.	KP 500
	dSPACE	Software para validar modelos de control.	
	Inversor CD/CA	Convertidor de voltaje de corriente directa a voltaje de corriente alterna.	
<p><b>C:</b> Es el sistema de control, Hay dos alternativas, ya sea usar los variadores de frecuencia o probar un sistema de control propio usando la dSPACE y el inversor adecuado.</p>	variador de frecuencia	Dispositivo de control de frecuencia para variar la velocidad.	Bonfiglioli active ACT 400
	Programador KP500	Dispositivo complementario para programar parámetros en el inversor.	KP 500
	dSPACE	Software para validar modelos de control.	
	Inversor CD/CA	Convertidor de voltaje de corriente directa a voltaje de corriente alterna.	
<p><b>D:</b> Bancada de dos motores de corriente alterna, uno de inducción y el otro de imanes permanentes.</p>	Motor de inducción	Motor asíncrono de corriente alterna trifásico tipo jaula de ardilla.	Bonfiglioli riduttori 3PH BN71B4
	Motor síncrono	Motor síncrono de corriente alterna trifásico de imanes	Bonfiglioli Vectron code SMB60161

		permanentes	
	Soporto mecánico para cada motor	Soporte en L para fijar cada motor.	Soporte metálico azul de 4.25mm
	Canaleta	Canaleta de plástico para la instalación eléctrica.	Canaleta de plástico color gris
	Placa metálica de bancada	Placa de acero principal para montar todo el equipo eléctrico y electrónico.	Placa de acero inoxidable 5.5mm

#### 4.4. Cálculo de protección para motores

##### 4.4.1. Datos conocidos

- Potencia nominal = 0.37 kW
- Corriente a plena carga = 1.1 A
- Corriente de rotor bloqueado  $6 \times 1.1 \text{ A} = 6.6 \text{ A}$
- Factor de servicio = 1

##### 4.4.2. Máximos ajustes permitidos por el National Electrical Code (NEC, EUA)

Para lograr una óptima protección del motor y cable alimentador, en el cálculo de los ajustes de las protecciones, se deben tomar en cuenta los siguientes criterios:

- Proteger el cable conductor, no rebasando su ampacidad real ni capacidad por corto circuito.
- Permitir el arranque del motor, liberado la máxima corriente de arranque.  
Máxima corriente de arranque:  $I_{RB}(Factor)(F.S.)$   
 $= (6.6A)(1.5)(1) = \mathbf{9.9 A}$ .
- No rebasar los límites de sobrecarga por el factor de servicio (elementos térmicos), el límite de sobre carga (para motores con el F.S. = 1.15 se pone 1.25) sin embargo, en este caso se está usando el F.S. = 1. Así que  $= (1) (I_{pc}) = (1) (1.1A) = \mathbf{1.1 A}$
- No rebasar el límite de sobre corriente (interruptor termomagnético). Límite de sobre corriente  $= (2.5) (I_{pc}) = 2.5(1.1 \text{ A}) = 2.75 \text{ A}$  por lo tanto se elige un interruptor termomagnético de **3 A**.
- No rebasar el límite de sobre corriente por corto circuito (elemento instantáneo) (13)  $(I_{pc}) = (13) (1.1A) = 14.3A$  por lo tanto se eligen los fusibles de **15 A**.

#### 4.5. Diagrama eléctrico

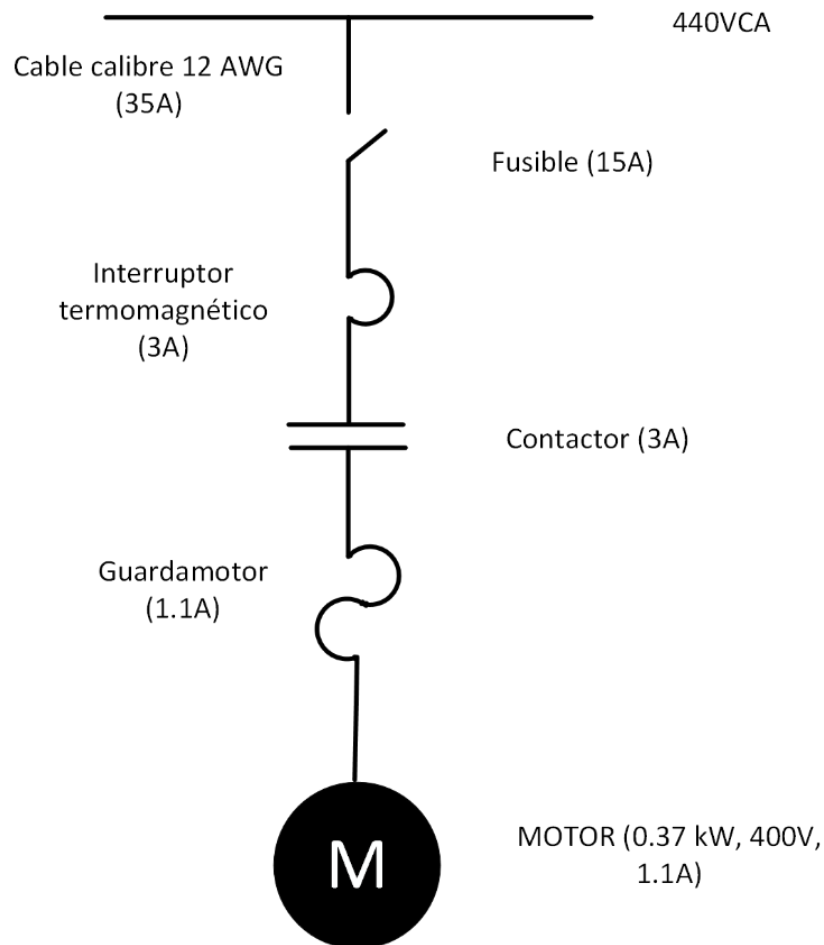


Figura 34.- Diagrama eléctrico de protecciones del motor

De acuerdo con el cálculo de protecciones para este proyecto se necesita un cable conductor calibre 12 AWG que soporta hasta 35 amperes CA, como protección principal se necesita de una caja de 3 polos para fusibles de 15 amperes, un interruptor termomagnético de 3 amperes, el contactor e 3 amperes también y como protección final un guardamotor de 1,1 amperes para proteger al motor de 0.37kW a 440 VCA.

Continuando con el proceso, se realizó una metodología de trabajo en el laboratorio de mecatrónica; primeramente, se hace un control escalar ya que se cuenta con un variador Bonfiglioli, seguido de la simulación del control vectorial en Simulink y, por último, implementar este control en la dSPACE mudando a una versión antigua el modelo de Simulink para poder ser compilado y probado físicamente.

#### 4.6. Metodología

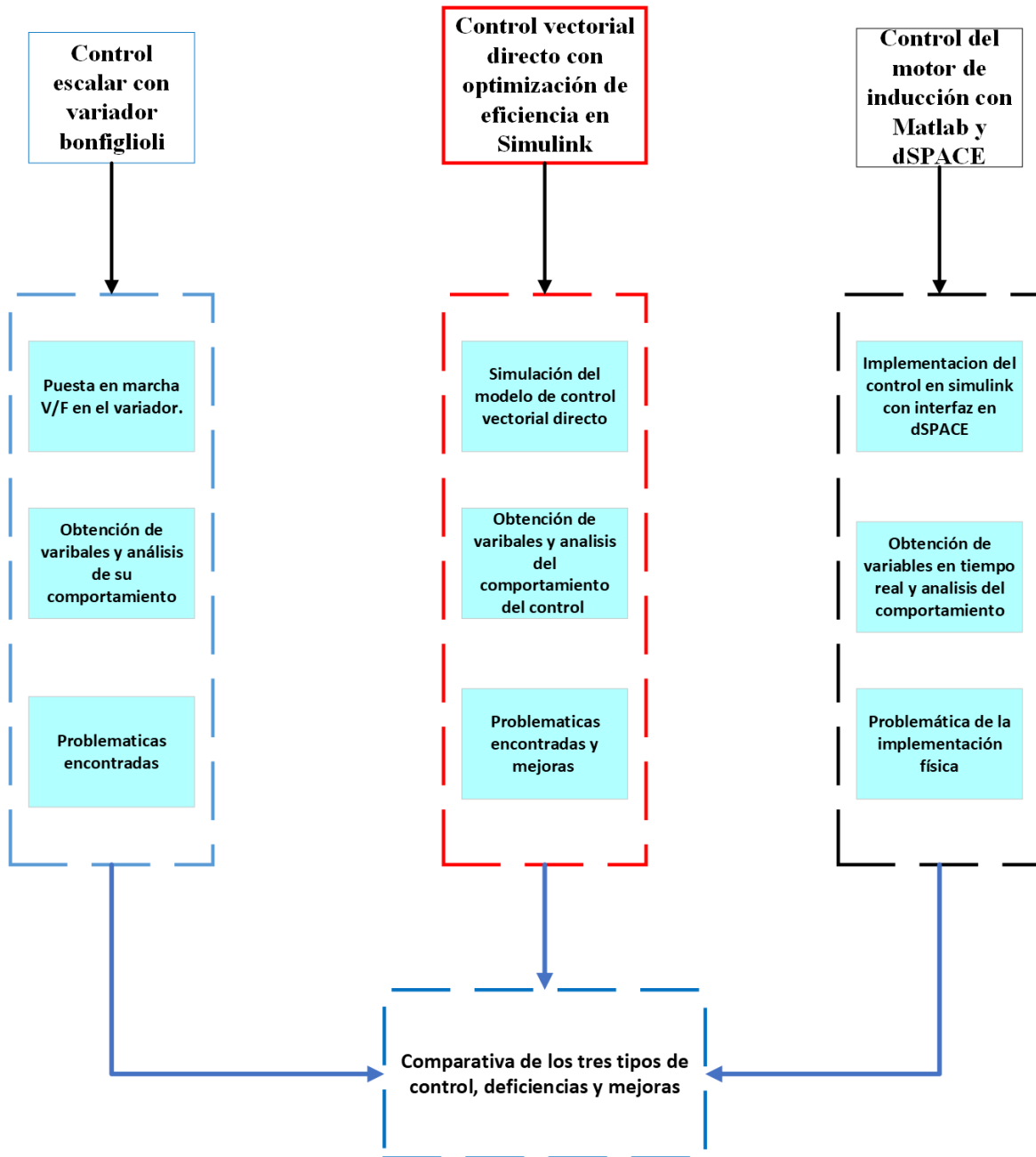


Figura 35.- Metodología de los experimentos

#### 4.7. Control escalar del motor de inducción con el variador de frecuencia

El control escalar se llevó a cabo con un variador de la marca Bonfiglioli.

El control escalar es el control más común para los motores de inducción, ya que se realiza el control de la frecuencia/ voltaje en el cual se tiene una frecuencia mínima y máxima de funcionamiento, no se puede trabajar a menos de la frecuencia mínima que es de 3.5 Hz ya que el voltaje en el devanado del rotor sería muy pequeño que no alcanza a inducir una corriente suficiente al rotor para hacerlo girar ni mayor en este caso a 50 Hz ya que se provocaría un sobrevoltaje en el motor y pudiera dañarlo.

A continuación, se presenta una serie de pasos los cuales ponen en marcha al motor de inducción por medio de variador de frecuencia o inversor de frecuencia.

El motor es de la capacidad de 0.37 kW y a continuación se muestra su placa de datos, que de ahí se obtienen los parámetros que pide el variador de frecuencia.

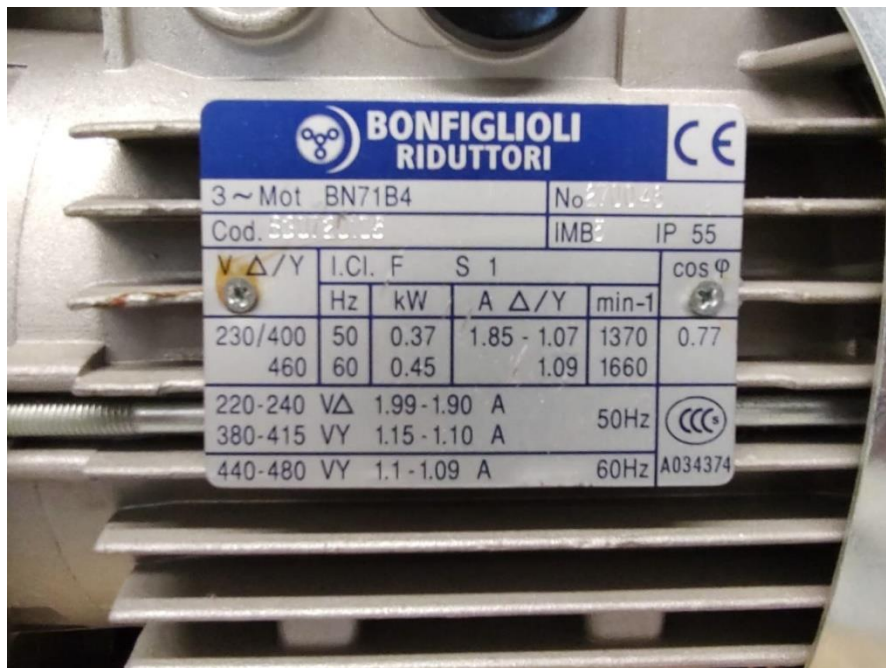


Figura 36.- Placa de datos del motor

El variador en cuestión es el Bonfiglioli vectron ACTIVE ACT400 (400V three phase 0.55 kW - 0.75 kW - 1.1 kW), esta marca cuenta con un variador para un rango de potencia de motores, este es el indicado para el motor en el cual se está trabajando, si se cambiara de motor se debe cambiar el variador adecuado para la potencia del motor.



Figura 37.- Variador Bonfiglioli Vectron ACTIVE ACT400

La parametrización, la visualización de los parámetros y el control del convertidor de frecuencia es a través de la unidad de control KP500. La unidad de control no es esencial para el funcionamiento del convertidor de frecuencia y puede desconectarse en caso necesario.

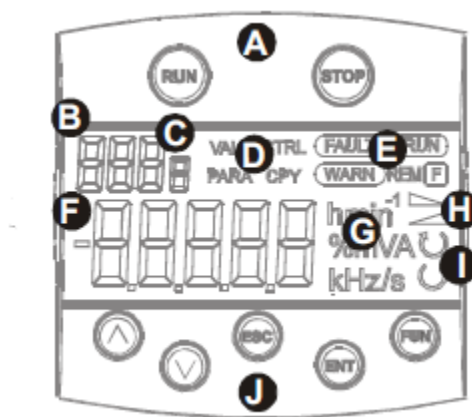


Figura 38.- Unidad de control KP-500

#### 4.7.1. Puesta en marcha con KP500

1.- La puesta en servicio aparece automáticamente en el estado de entrega. Si la puesta en servicio se realiza con éxito, puede seleccionar el submenú CTRL y volver a llamar a la función.

2.- Pulsar la tecla ENT para ir al submenú CTRL. En este submenú puede seleccionar la opción de menú "SEtUP" con las teclas del cursor y confirmar con la tecla ENT.

3.- Seleccione el parámetro de configuración 30 con la tecla ENT e introduzca los números 110 o 410 con las teclas del cursor (véase el apartado siguiente). Finalice la introducción con la tecla ENT y pase al siguiente parámetro. La funcionalidad del hardware y del software se configura si se ha modificado la configuración. el control sin sensores en la configuración 110.

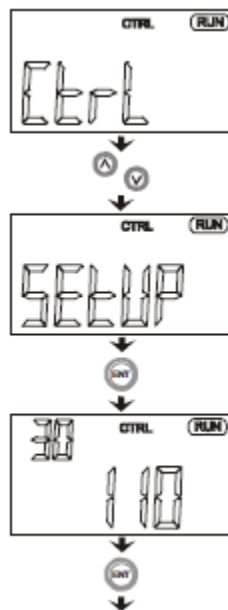


Figura 39.- Puesta en marcha del variador

4.- Los datos de la máquina que se introducen en la siguiente parte de la puesta en servicio deben tomarse de la placa de características y de la hoja de datos del motor. Los ajustes de fábrica de los parámetros de la máquina se refieren a los datos nominales del convertidor de frecuencia y de la máquina trifásica correspondiente. Los datos de la máquina necesarios para el proceso de control y regulación se calculan durante la puesta en servicio a partir de los ajustes, cuya plausibilidad debe comprobarse. Los valores nominales utilizados en los ajustes de fábrica deben ser comprobados por el usuario.

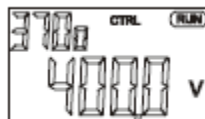


Figura 40.- Consigna de datos del motor

Cada mando es un parámetro diferente que se debe meter manualmente de la placa del motor al variador.

Tabla 6. Valores nominales del motor

Motor rated values			
No.	Factory setting	Unit	Name/function
370	Ufun	V	Rated voltaje
371	Ifun	A	Rated current
372	FI type	Rpm	Rated speed
374	FI type	-	Rated cos phi
375	50.00	Hz	Rated frequency
376	Pfun	kW	Mechanical rated output

Al introducir todos estos parámetros el variador los va a comprobar por sí solo, si hay algún error o se ingresó mal un valor aparecerá un mensaje de advertencia, sino es el caso pasaras a la siguiente instrucción

5.- La indicación PAidE debe confirmarse con la tecla ENT. La carga conectada se evalúa en el curso posterior de la identificación de parámetros con las señales indicadas.

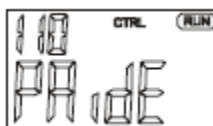


Figura 41.- Consigna PAidE

6.- La puesta en marcha pasa a las funciones de identificación de parámetros tras comprobar los datos de la máquina que se han introducido. Las funciones de seguridad del convertidor de frecuencia impiden la liberación del componente de potencia a menos que la entrada digital S1IND esté conectada. Si al inicio de la puesta en servicio ya se había aplicado una señal, el mensaje FUF no se muestra.

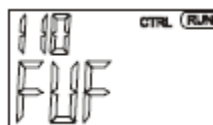


Figura 42.- Función de seguridad

En caso de aparecer el mensaje, se debe conectar una señal digital al S1IND que se encuentra en la parte baja del variador en sus borneras, para más información leer el manual de usuario.

7.-El mensaje final rEAdY debe confirmarse con la tecla ENT. La cancelación mediante pulsando la tecla ESC o terminando la liberación de S1IND significa que se aceptan los valores incompletos.



Figura 43.- Mensaje de listo

8.-Al darle run el motor se pone en marcha y con la pantalla KP500 puede aumentar o disminuir su velocidad con los botones de forma triangular. Y para pararlo se pone stop.



Figura 44.- KP-500 run y stop

#### 4.7.2. Interfaz con KP-232

La interfaz serial KP232 puede ser usado como una alternativa de control de la unidad de control KP500. Estas conexiones habilitan la parametrización, monitoreo, y configuración del inversor, incluso una interfaz con una PC o Laptop. La conexión del puerto serial es de pin a pin entre el inversor y la PC de acuerdo con las especificaciones de transmisión de datos DTE y comunicación del equipo DCE [31], se debe usar el conector serial DB9 pin to pin.

Se debe tener en cuenta que la interfaz solo puede usarse a una distancia máxima de cable de 15 metros. El protocolo serial de transmisión asegura una alta seguridad de datos y no requiere de otra comunicación entre el inversor y la computadora.

El software VPlus es una aplicación en la cual pueden ser monitoreados los datos y parametrización del motor a controlar, es compatible con Windows, este software incluye una interfaz gráfica además de un osciloscopio en tiempo real de las variables a medir.

La figura 44 muestra gráficamente la conexión física de la comunicación serial entre el variador de frecuencia, el módulo KP-232 y la computadora, tomando en cuenta el tipo de comunicación con los módulos BD9 como lo indica el fabricante para no tener pérdida de datos y obtener la información correcta en tiempo real.

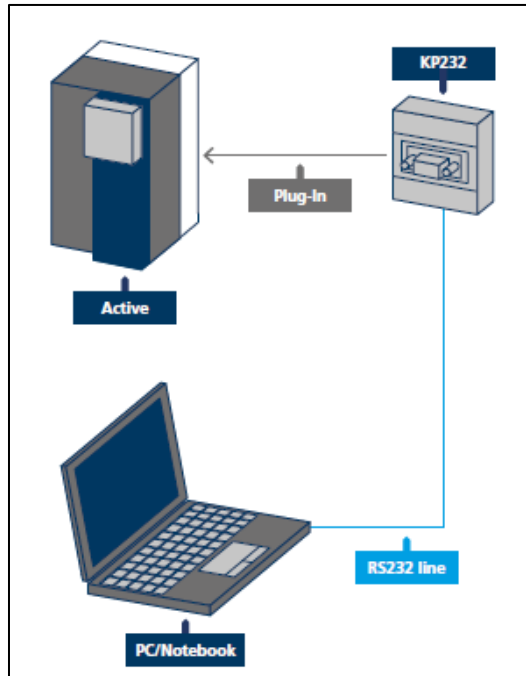


Figura 45.- Interfaz KP-232

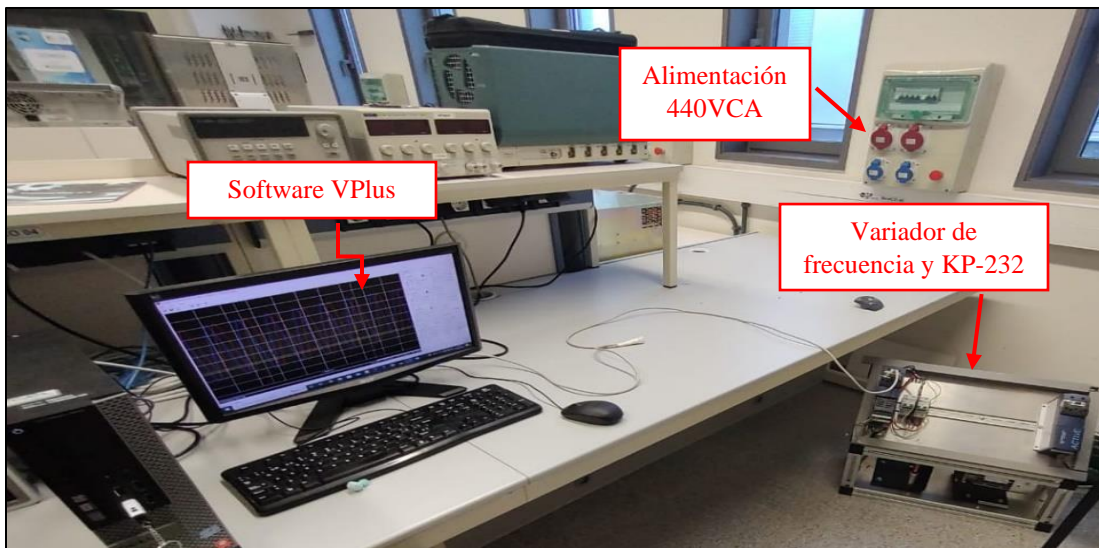


Figura 46.- Puesta en marcha de la bancada con unidad de control e interfaz KP-232

En la figura 45 se muestra el startup de la interfaz Kp-232 con el variador de frecuencia que controla remotamente al motor de inducción tipo jaula de ardilla que se encuentra en la bancada, el motor de inducción está configurado en conexión estrella a 440 VCA (configuración alto voltaje), en el monitor se muestra el software Vplus y la comunicación con el KP-232 en comunicación serial con el DB9 para obtener los parámetros del motor en operación.

Para iniciar con la puesta en marcha con este dispositivo se siguen una serie de pasos los cuales permiten tener una comunicación segura para la obtención de datos correctos, como

primer paso se reconoce el variador en el software VPlus para hacer la conexión, se encuentra en el COM1 [115200], si no se encuentra en interfaces se debe asegurar que el módulo DB9 esté bien conectado en el KP-232 y en el PC para que automáticamente el software lo busque y lo reconozca



Figura 47.- Reconocimiento del dispositivo

Al reconocer el software al variador automáticamente inicia con la parametrización del dispositivo de la misma forma que con el KP-500, se deben esperar algunos segundos para que el invertir mángner obtenga los datos eléctricos y mecánicos del motor.

Para esto el motor debe estar conectado eléctricamente a la red, cuando el proceso se inicia el motor genera algunos sonidos, esto es otra indicación de que el software está trabajando en la parametrización del motor.

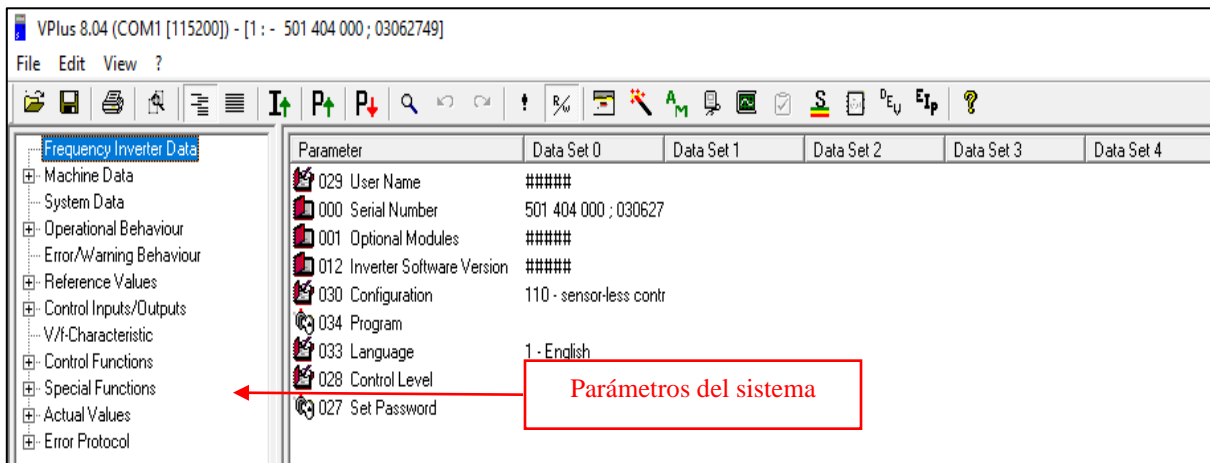


Figura 48.- Parametrización de datos del motor

Posteriormente al dejar de emitir los sonidos el motor se verifica que el software obtuvo los datos del motor mostrando un mensaje de conexión exitosa en el recuadro verde.

Cuando ocurre alguna falla el recuadro muestra un mensaje en rojo de falla de comunicación, al suceder esto, el proceso debe repetirse para que se haga nuevamente la parametrización.

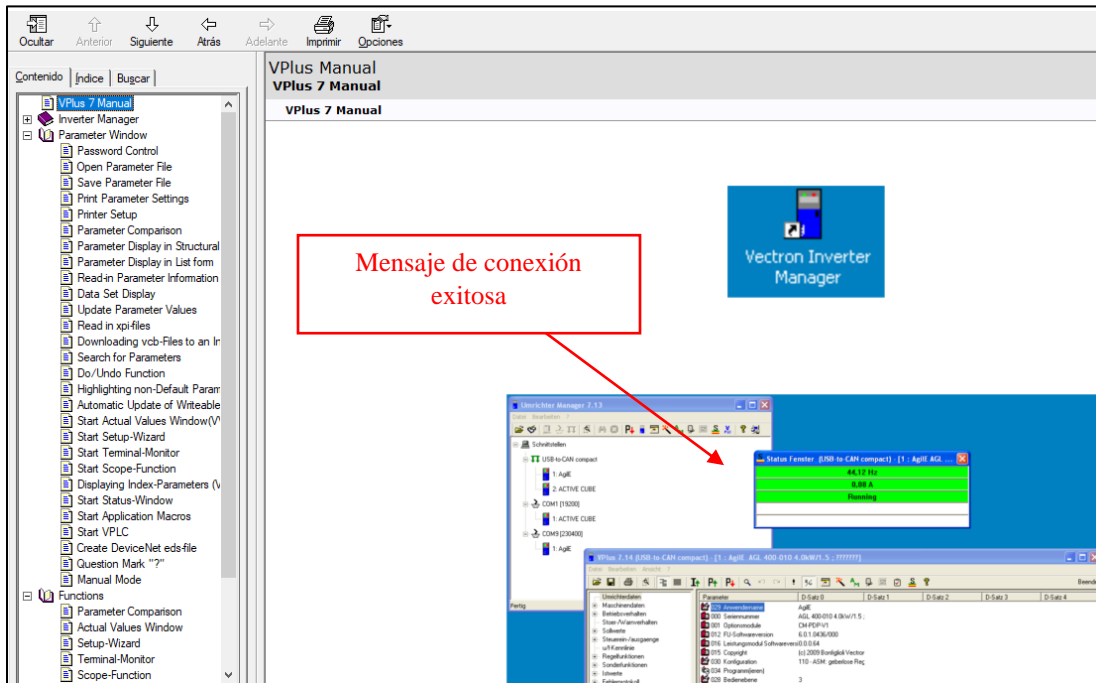


Figura 49.- Comunicación exitosa

Por último, se puede hacer la interfaz gráfica que necesites para monitorear los datos deseados y ajustar las variables que se necesiten, como una alternativa extra ya que el mismo software cuenta con su interfaz gráfica donde puedes monitorear todos los datos del motor en operación, además de medir en tiempo real estos datos ya que esta interfaz también funciona como osciloscopio.

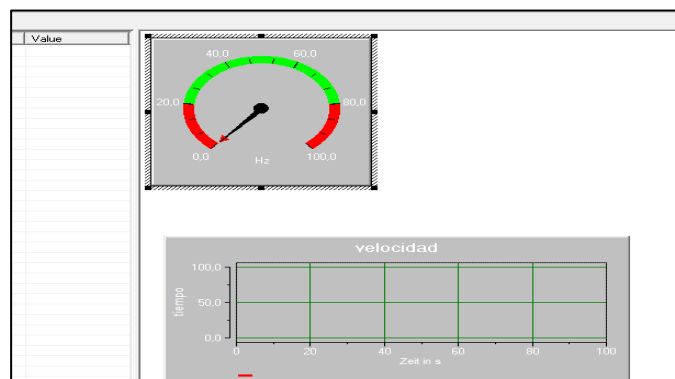


Figura 50.- Interfaz gráfica editable para el motor

En el capítulo 5 se muestran las corrientes, voltajes y demás variables del motor, claro está que para obtener la velocidad o flujo magnético se necesita conectar módulos extra en el

variador con el sensor necesario. No obstante, para el control escalar no son relevantes de parámetros específicos para hacer el control de velocidad.

#### 4.8. Control vectorial del motor de inducción con la dSPACE

El dSPACE es un hardware en el cual se hacen diferentes sistemas de control, en este caso se hace el control vectorial de un motor de inducción, cuenta con puertos de comunicación, entradas y salidas analógicas y digitales, así también módulos para lecturas de corrientes, voltajes y generación de pulsos PWM.

Para usar el dSPACE se necesita hacer un trabajo en conjunto con Simulink y trabajar con un tercer software llamado ControlDesk. En Simulink se hizo el control vectorial directo, posteriormente mudar esa información a la dSPACE, y hacer la interfaz gráfica de control en ControlDesk para controlar las variables de entrada y adquirir los datos y parámetros del motor deseados.

A continuación, se muestra el proceso completo del modelado y la interfaz gráfica y de control entre Simulink y la dSPACE.

Para poder trabajar con la dSPACE se necesita tener completo y funcionando el control vectorial de un motor de inducción en Simulink, esto con el objetivo de tener una interfaz o comunicación con la dSPACE, para iniciar con el proceso, tenido en cuenta que con el software de Simulink el control implementado es completamente simulado y virtual se deben cambiar las entradas de corriente y voltaje por módulos físicos de la tarjeta y configurarlos, así también las salidas físicas para controlar el inversor (bloques azules), los módulos físicos de la dSPACE serán controlados mediante los bloques de control en color azul de Simulink



Figura 51.- dSPACE módulo de periféricos, I/O analógicas y digitales

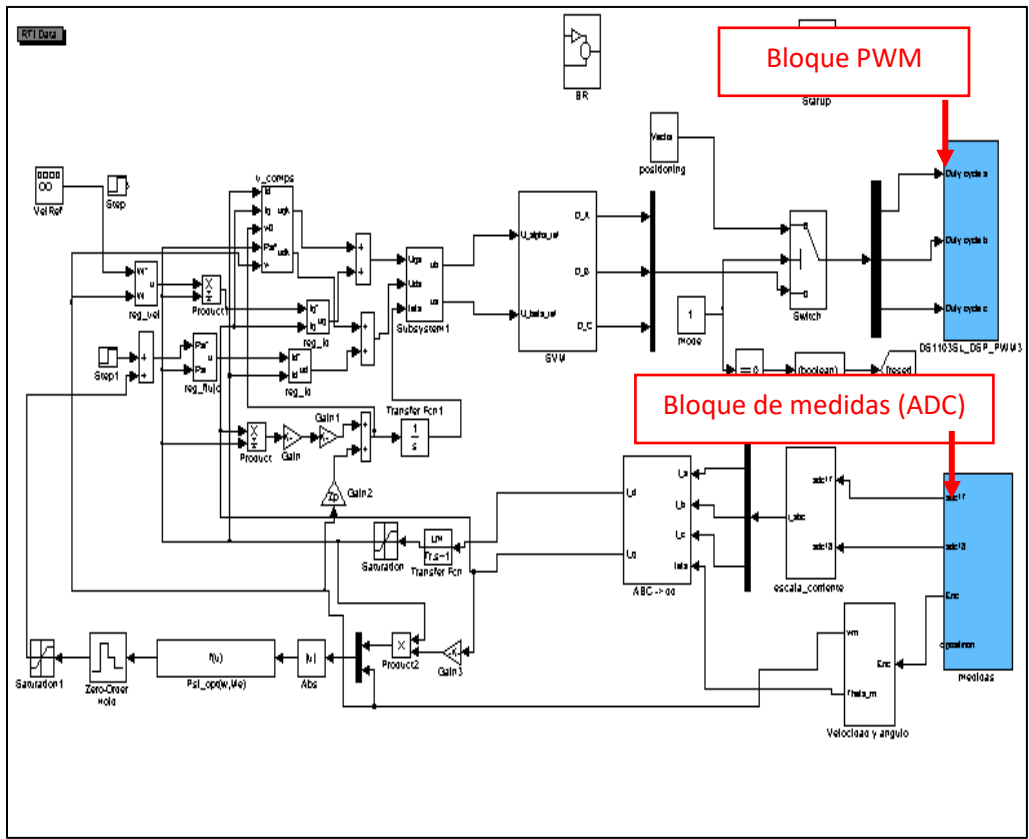


Figura 52.- Control vectorial en Simulink y dSPACE

Para medir las corrientes se necesita usar un módulo ADC con sus respectivas entradas de medida, además de una escala de corrientes para que pueda ser leída por la dSPACE, también de un módulo para el encoder para medir la posición y velocidad.

Estos bloques se encuentran en la librería de dSPACE en Simulink, deben configurarse con el número de canal o pin en el cual serán entrada o salida de la señal deseada.

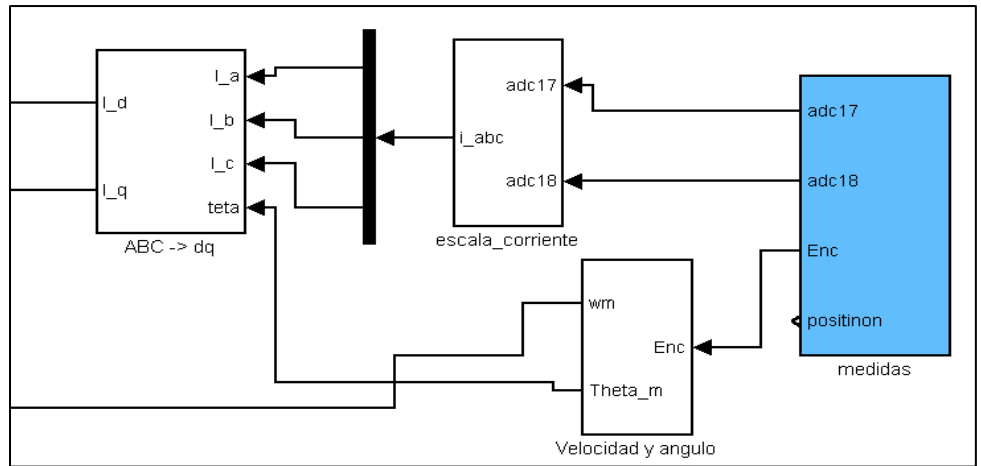


Figura 53.- Módulo ADC dSPACE

Dentro del subsistema medidas se encuentran los ADC con sus respectivos canales, además del setup máster del encoder que hace funcionar el módulo del encoder de la tarjeta DS1103, el bloque de encoder es el encargado de habilitar los módulos ADC para que realicen la lectura o escritura de la señal.

Por otro lado, los bloques ADC están habilitados en el canal 17 y canal 18 de la tarjeta de la dSPACE, además de que el encoder está habilitado en el canal 6.

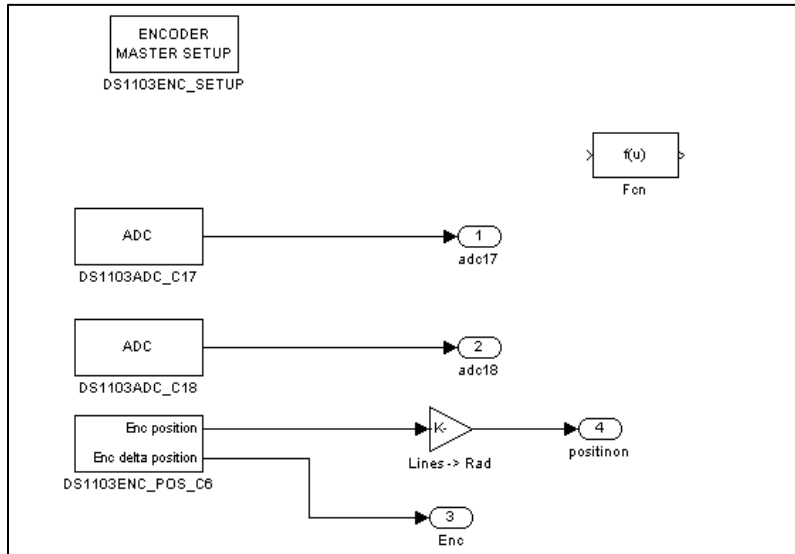


Figura 54.- Módulos ADC y encoder de dSPACE

Para la escala de corriente se tiene el siguiente subsistema el cual lee la corriente con una escala de 1 a 100 para poder ser leída por la tarjeta esto ya que la tarjeta solo lee voltajes y corrientes en pequeña señal. La escala de corriente mencionada se hace con el propósito de proteger a la tarjeta de control.

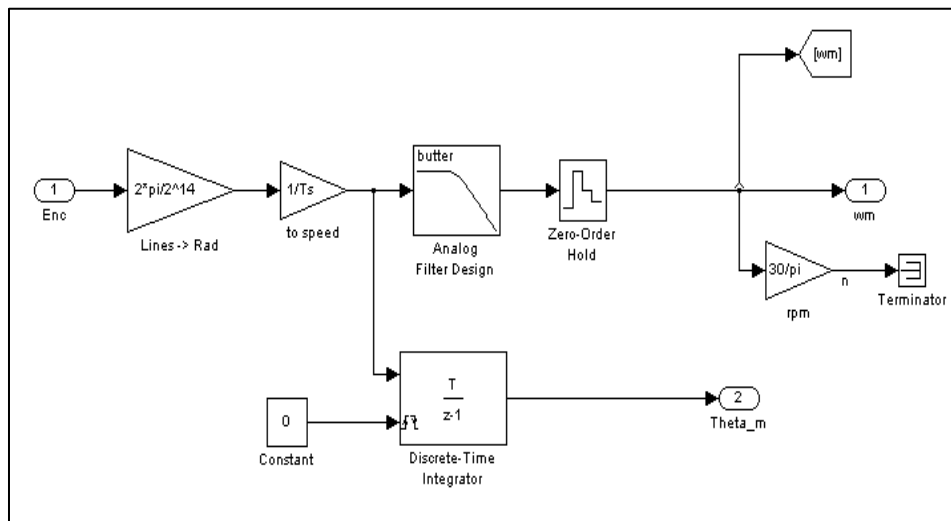


Figura 55.- Escala de Corrientes de entrada

Por otro lado, se tiene el subsistema de velocidad y ángulo para que a partir de los pulsos del encoder incremental se determine la velocidad y ángulo del rotor. Con esto se concluyen las variables de entrada para el control del motor de inducción, se ha realizado la conexión física de las corrientes y por la parte de control se han escalado las corrientes y las señales para que sean leídas en el rango de la tarjeta.

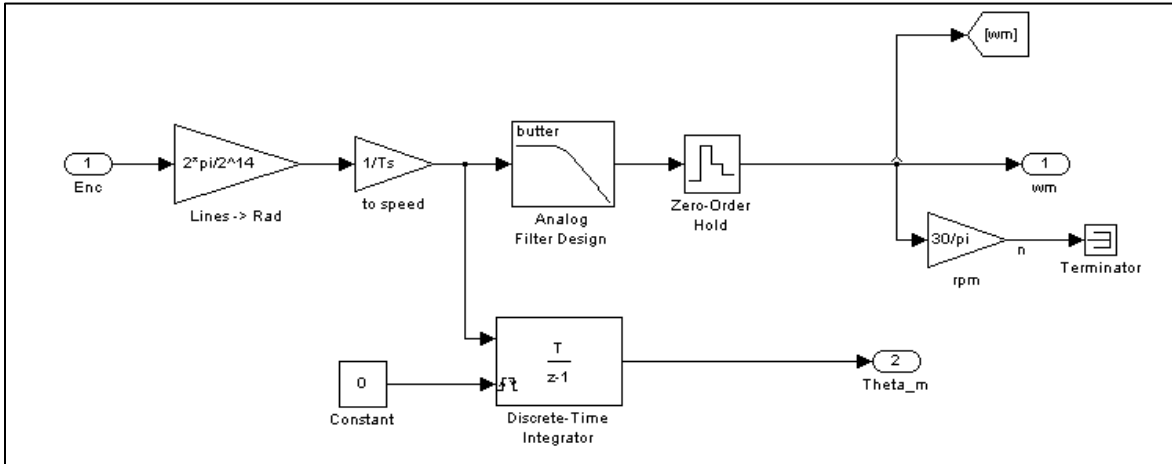


Figura 56.- Escala de lectura de velocidad y posición

Para la parte de lectura y envío de señales mediante el modelo de control hacia el inversor y posteriormente del inversor al motor, se realizó el siguiente modelo para que a partir de las señales de referencia Alpha y beta se conviertan en pulsos SVM que activaran los transistores del inversor, también el Start Up del sistema que habilita el enable del módulo PWM de la tarjeta DS1103.

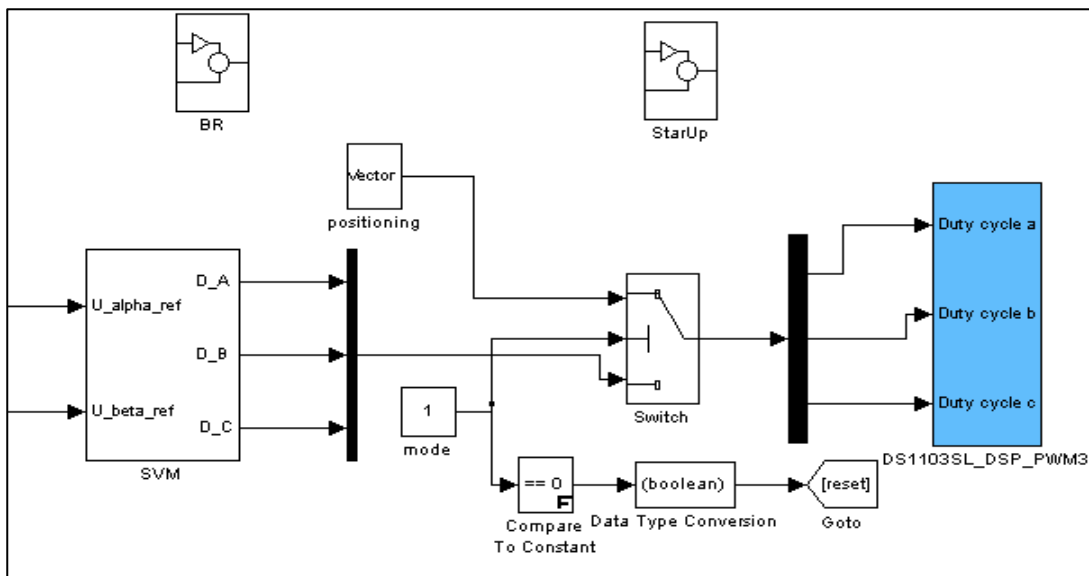


Figura 57.- Módulo del PWM dSPACE



También se agregan las salidas para activar el PWM de la tarjeta DS1103 y la resistencia de carga en las salidas de bit del canal 5 y 7.

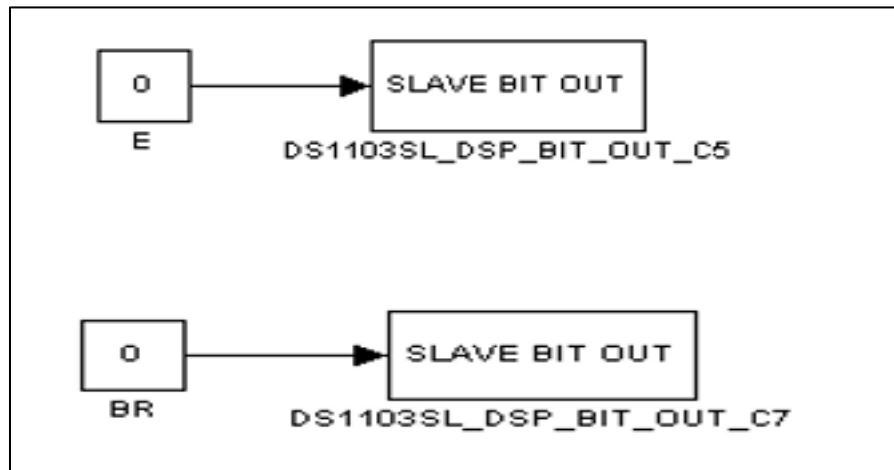


Figura 60.- Activación del enable y breaking resistance del inversor

Posterior a esto, al tener el sistema completo se continua con revisar y editar los parámetros de simulación. En el menú principal se da clic en *simulation*, seguido de *simulation parameters* o *Ctrl+E* para redirigirnos en *solver* del sistema.

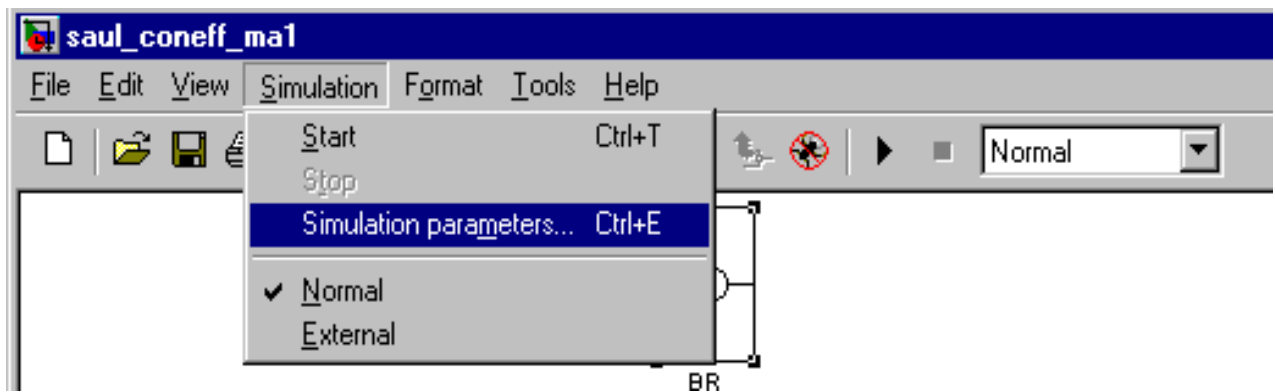


Figura 61.- Parámetros de simulación

En el *solver* se trabaja con un tiempo de paro infinito, la resolución con un *fixed-step* y el *integrador odel (Euler)* para que el tiempo de muestreo  $T_s$  esté dentro del rango de muestreo del sistema y no genere errores al compilar.

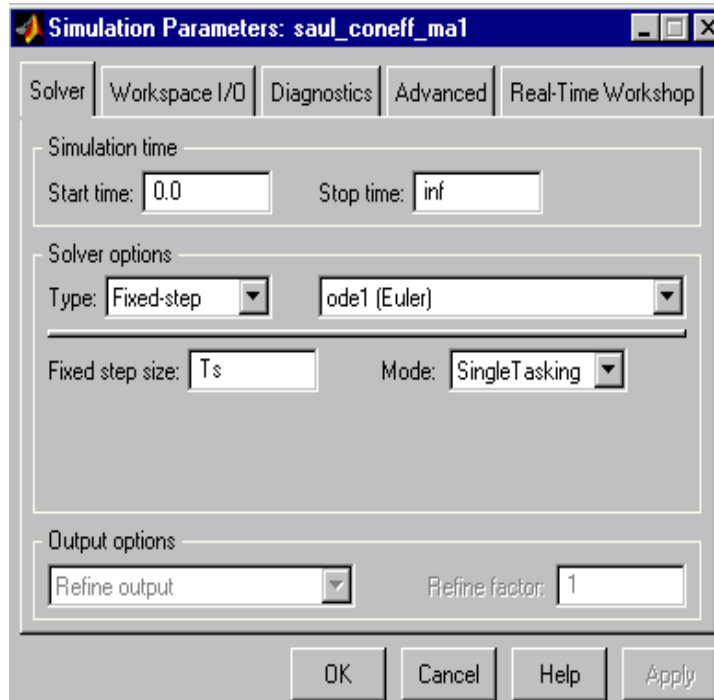


Figura 62.- Solver

En el submenú *advanced* se da clic seguido de doble clic en block reduction y se desactiva la reducción de bloques para reubicar el grupo de bloques haciendo una síntesis de resultados para reducir el tiempo de simulación del control.

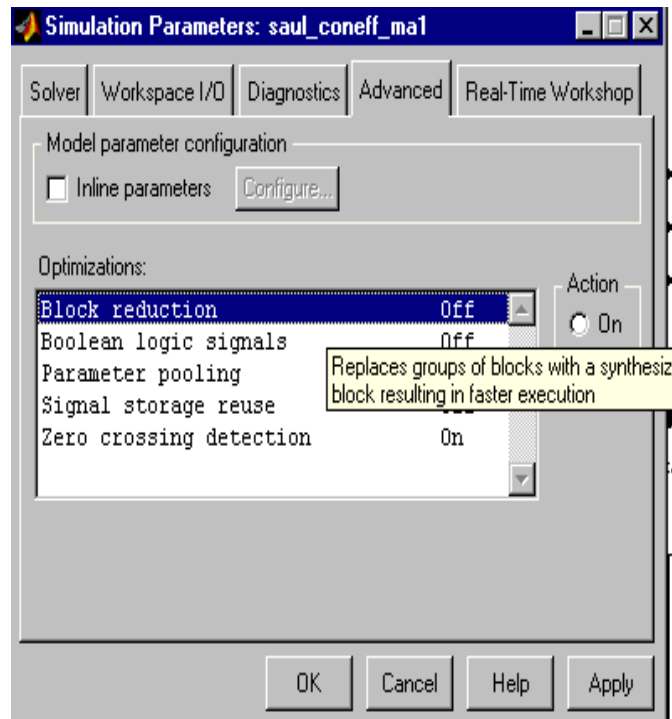


Figura 63.- Advanced

Para finalizar se busca la tarjeta de configuración el submenú *Real-Time Workshop* que es la *rti11103*, dando clic en *category* se selecciona *target configuration*, en *Browse* de selecciona la tarjeta mencionada previamente y se da clic en *ok*.

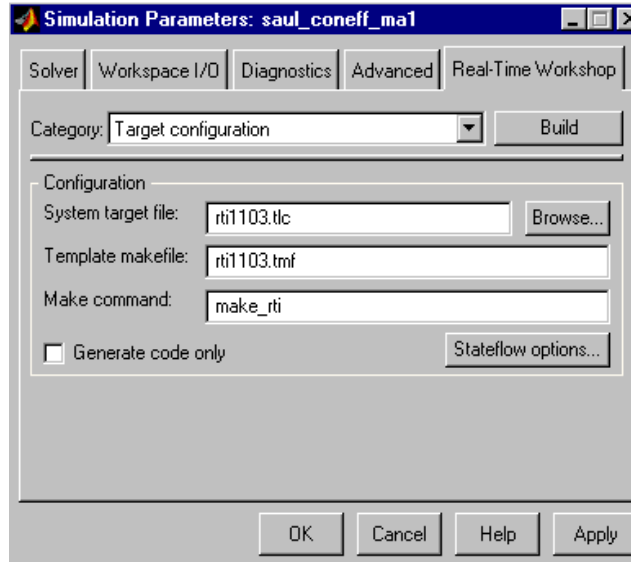


Figura 64.- Real-Time-Workshop

En el menú principal se da clic en *tools-Real time workshop-build model* o *Ctrl+B* para compilar el sistema

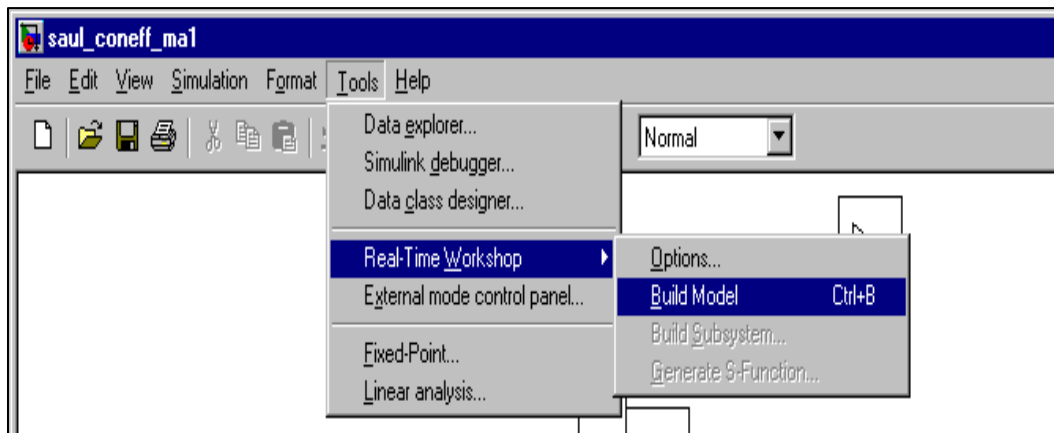


Figura 65.- Construcción del modelo

Si la simulación se ejecuta correctamente debe de salir la siguiente pantalla (figura 65) y si no es así ahí mismo marca los errores y advertencias del modelo. En el caso de compilación exitosa se genera una lista de varios archivos en la carpeta del proyecto, el archivo que enlaza el software es terminación .sdf

```

MATLAB
File Edit View Web Window Help
Current Directory: C:\WINDOWS\Escritorio\sau\FOC_FINAL

WORK DIRECTORY "C:\WINDOWS\ESCRITORIO\SAUL\FOC_FINAL"
BUILD DIRECTORY "C:\WINDOWS\ESCRITORIO\SAUL\FOC_FINAL\SAUL_CONEFF_MAL_RTI1103"
TARGET COMPILER "C:\PPCT00-1"

COMPILING saul_coneff_mal.c
COMPILING C:\DSPACE\MATLAB\RTI1103\C\rti_sim_engine.c

LINKING APPLICATION ...
LINKING FINISHED

LOADING APPLICATION "saul_coneff_mal.sdf" ...
[#1] ds1103 - RTI: Initializing ... (720)
[#2] ds1103 - RTLIB SLVDSP: User firmware rev. 1.0.0 based on dSPACE firmware rev. 3.4 detected. (500)
[#3] ds1103 - RTI: Initialization completed (721)
[#4] ds1103 - RTI: Simulation state: RUN (700)
LOADING FINISHED

MAKE PROCESS SUCCEEDED

### Successful completion of Real-Time Workshop build procedure for model: saul_coneff_mal
*** Finished RTI build procedure for model saul_coneff_mal
>>
Ready

```

Figura 66.- Consola de Simulink con mensaje de éxito

Al generarse exitosamente la simulación y construcción del modelo en el *Real-Time* se sigue a hacer la interfaz gráfica y de control de la dSPACE mediante el software ControlDesk. El ControlDesk es el tercer software que se usa para hacer la interfaz gráfica en el que obtendrán los datos en tiempo real del motor de inducción, para hacer la interfaz se siguen una serie de pasos, los cuales se hacen para generar una carpeta nueva para hacer el proyecto nuevo. Se inicia con un nuevo *Layout* desde el menú principal se da clic en *File-New-Layout*. para generar la carpeta principal donde se guardarán los archivos siguientes.

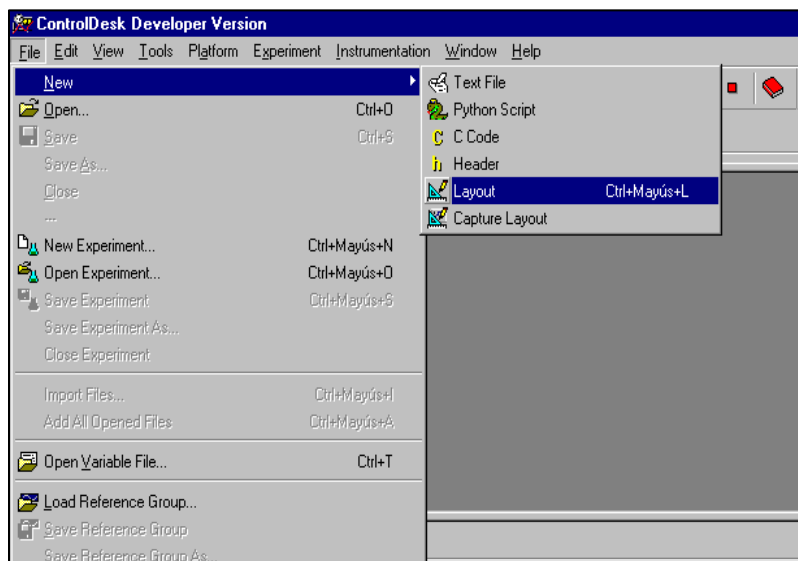


Figura 67.- Nuevo layout

El siguiente paso es cargar la aplicación, en el menú principal se da clic en *experiment*, enseguida clic en *application* y finalmente clic en *load application*

Se demora algunos segundos en cargar el archivo para generar la aplicación, al finalizar correctamente en la pantalla de comandos mostrará un mensaje de tarea realizada con éxito.

En la figura 67 se muestra el proceso completo de lo antes mencionado y el log viewer muestra los mensajes de generación de archivos.

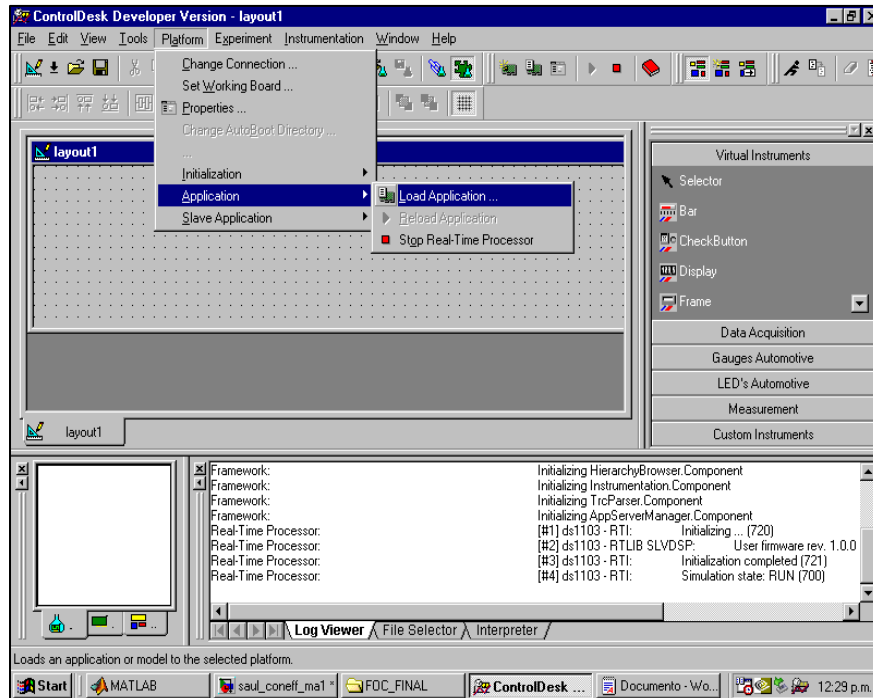


Figura 68.- Cargar Aplicación

Al tener cargada la aplicación en el ControlDesk se carga el descriptor del sistema .sdf de la carpeta del proyecto principal, que se hizo al inicio del proceso y que se guardó en la carpeta principal del proyecto.

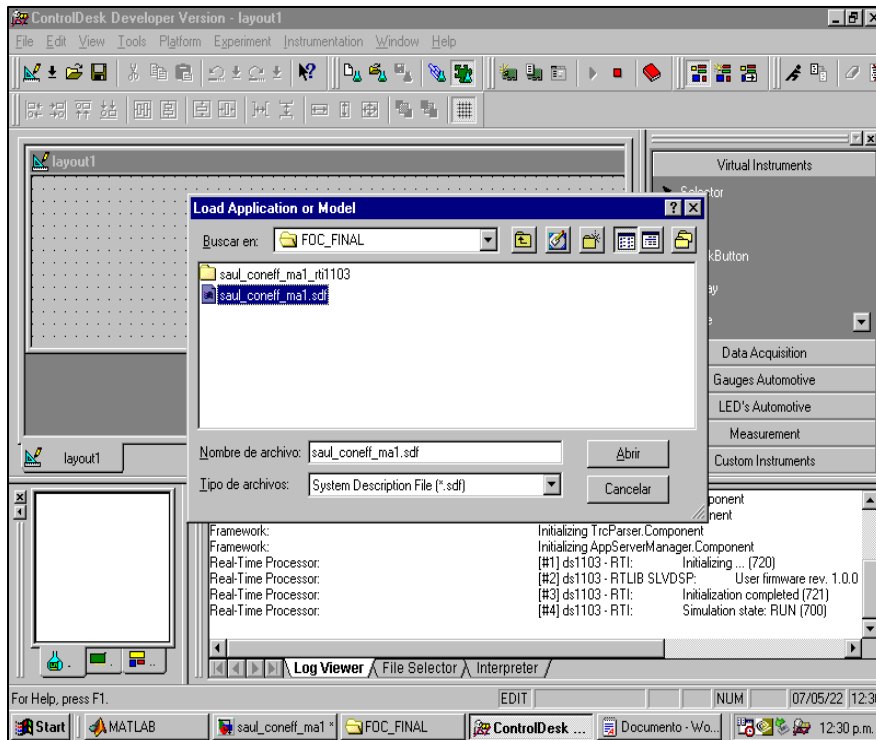


Figura 69.- Carga de descriptor del Sistema

Cuando se tiene el archivo .sdf cargado se continua con guardar el archivo en terminación. Lay, para generar una carpeta nueva con más archivos para generar la aplicación de la interfaz.

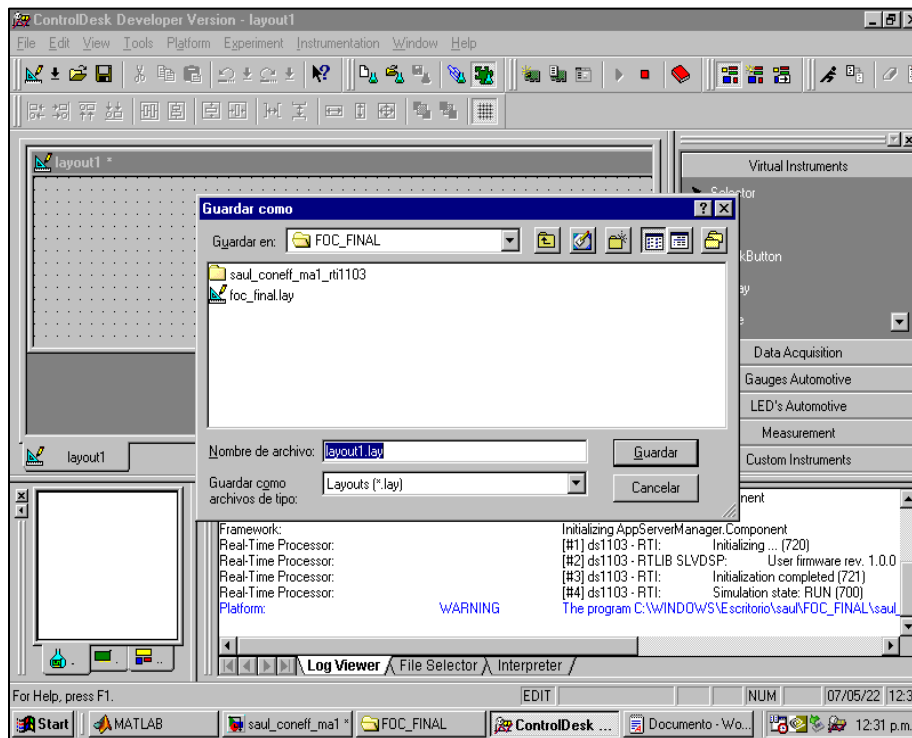


Figura 70.- Guardar el archive layout

Al guardar este archivo las variables del archivo de Simulink se verán representadas en la pestaña descriptor del sistema haciendo doble clic en *Model Root*, estas variables se enlazan con la interfaz gráfica que diseñes en el proyecto para que puedan ser visualizadas o controladas desde ahí.

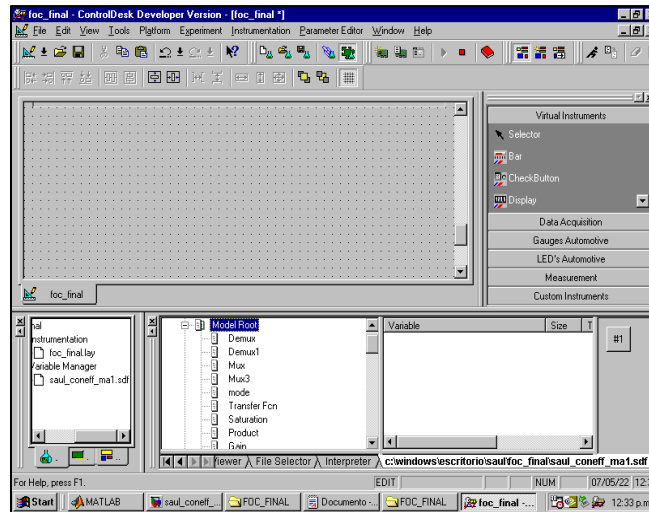


Figura 71.- Model Root

Al estar enlazadas las variables del modelo con la interfaz de ControlDesk se observan de la siguiente manera figura 71. Se debe tener en cuenta que a la interfaz gráfica se pueden agregar botones, barras de lectura, gráficas, osciloscopios, pantallas etc.

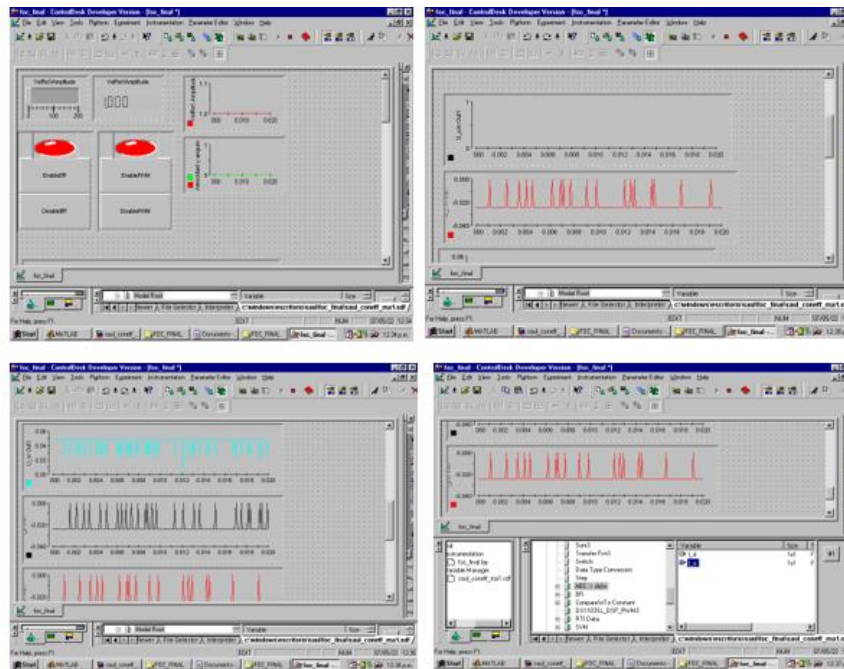


Figura 72.- Interfaz gráfica en ControlDesk

Cuando se tienen todas las variables deseadas y asignadas a cada gráfico requerido y agregado a la pantalla principal se continua con hacer un New Experiment desde la pestaña File.

Desde el menú principal se da clic en File, New experiment

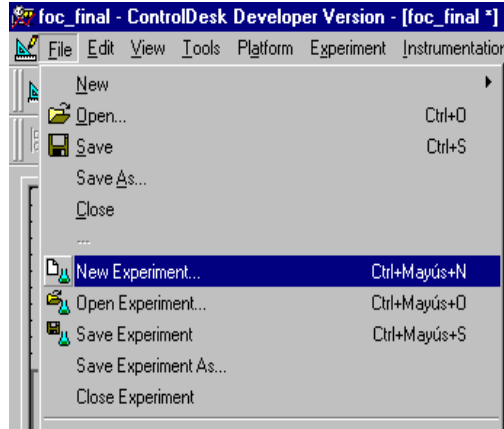


Figura 73.- Nuevo experimento

Y se guarda en la carpeta del proyecto.

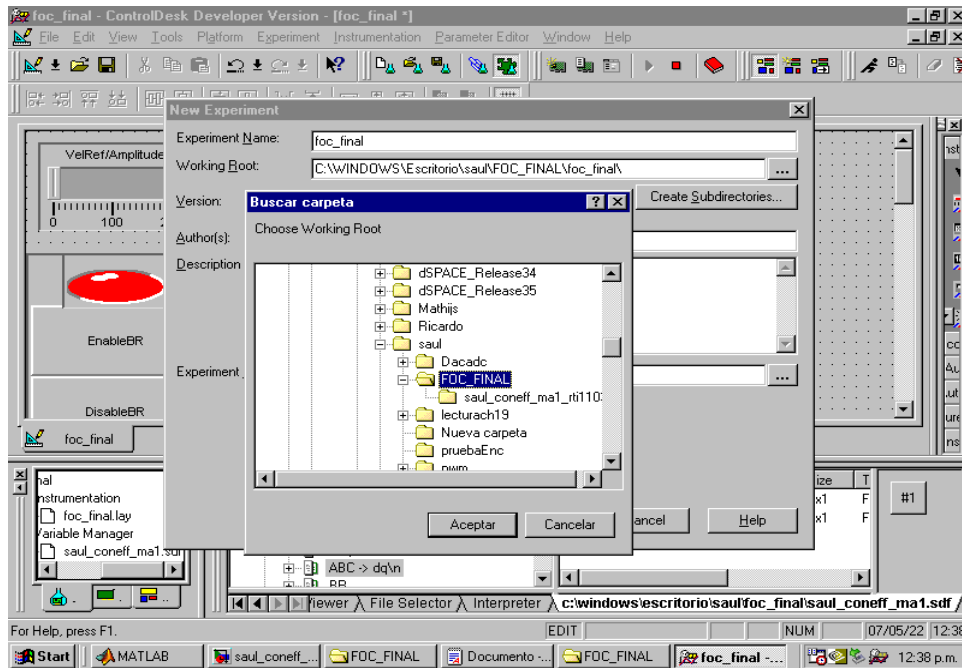


Figura 74.- Archivo guardado

Para asegurarse que todas las variables quedaron vinculadas es recomendable cerrar el programa y dar si en el recuadro que aparece.

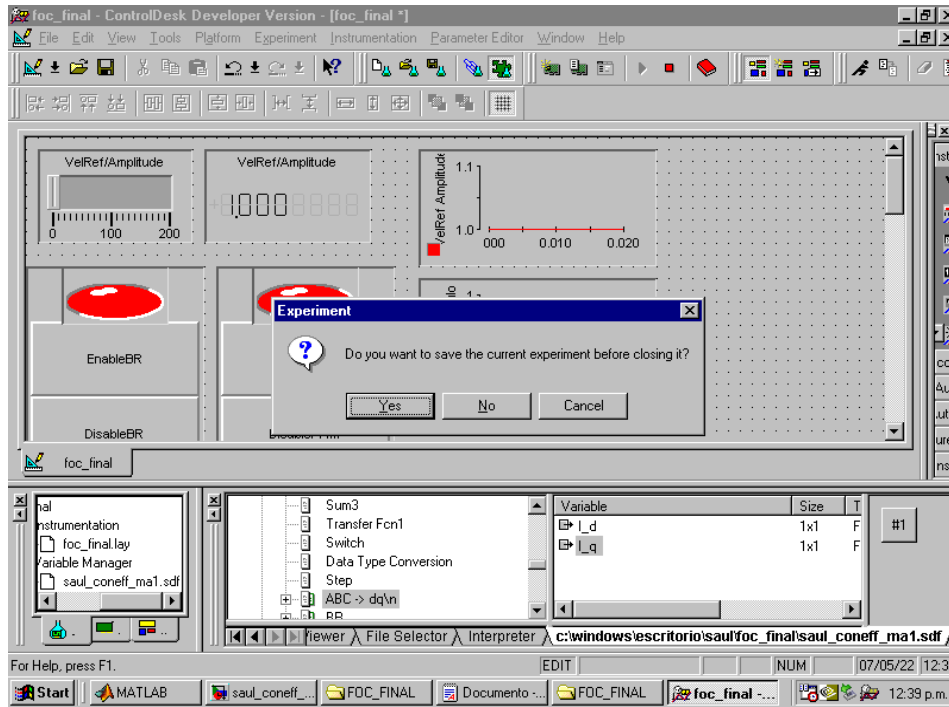


Figura 75.- Vinculación de variables

Para finalizar se debe revisar la carpeta del proyecto y abrir desde ahí el proyecto en el archivo con terminación .cdx

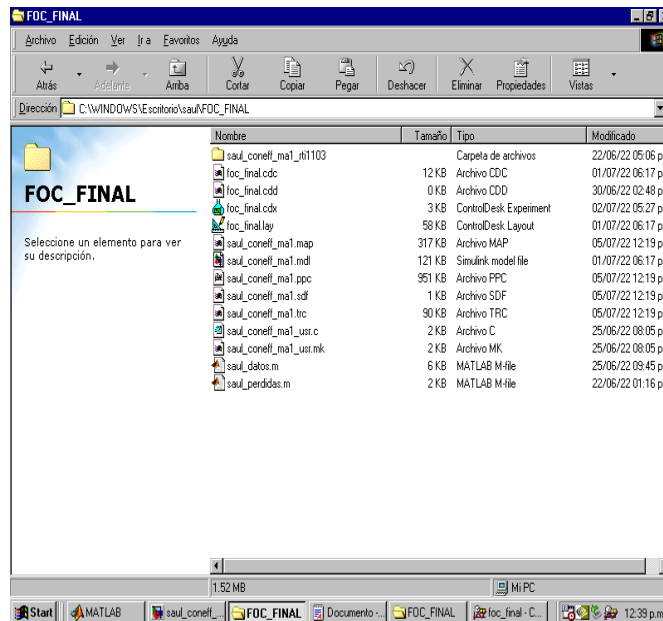


Figura 76.- Carpeta del proyecto

Al abrir el experimento se obtienen las gráficas ya con las variables asignadas listas para tomar los datos en tiempo real.

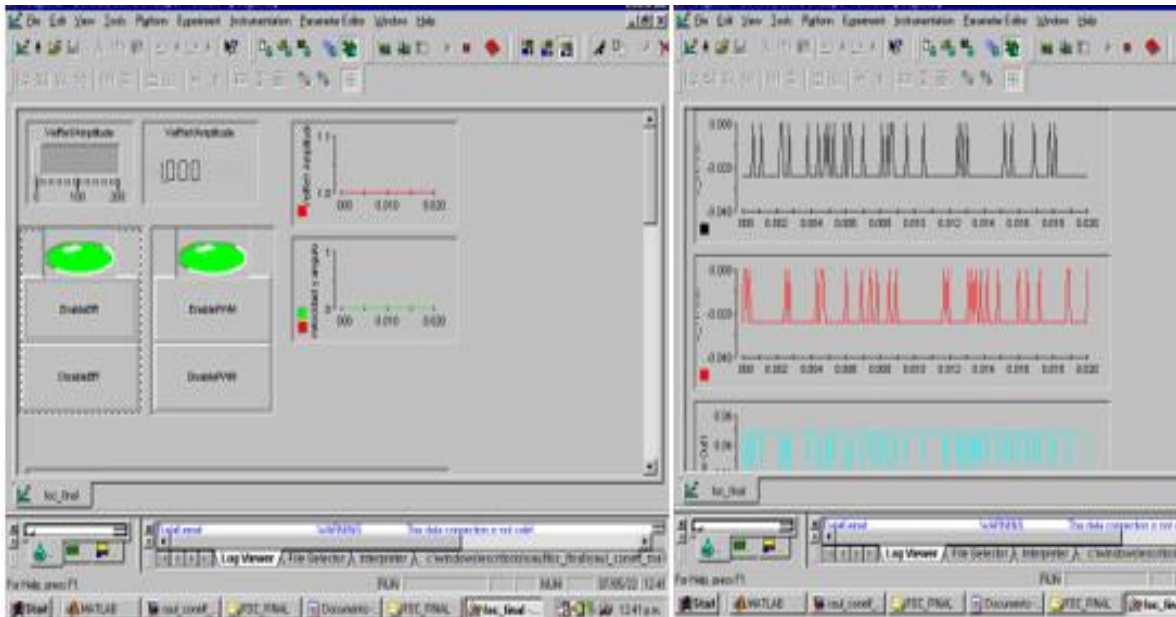


Figura 77.- Interfaz 1

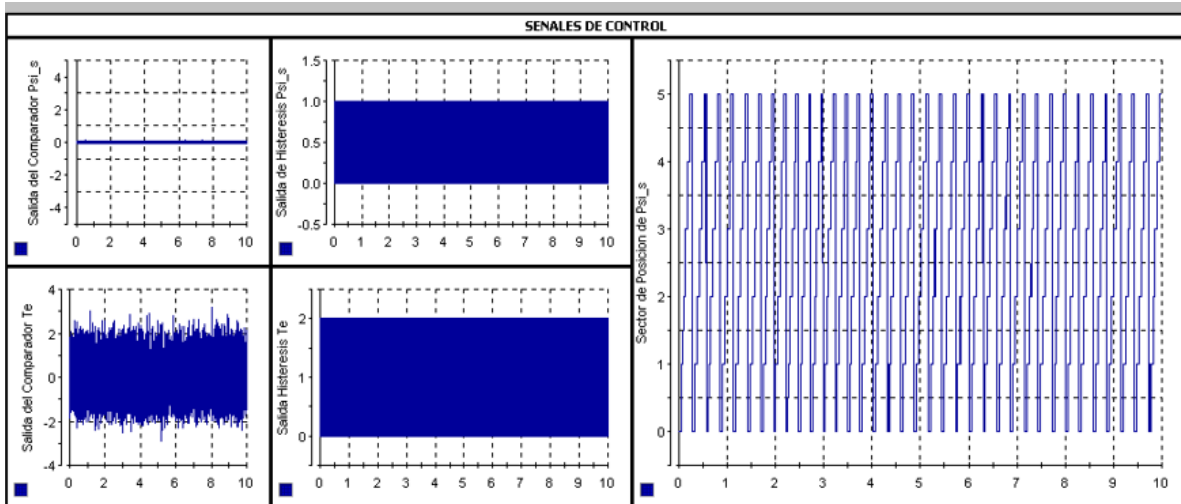


Figura 78.- Interfaz señales de control

En la figura 79 se encuentra la bancada del motor de inducción acoplado al motor de imanes permanentes que su función es actuar como carga, el motor de inducción es controlado por la dSPACE acoplado con el motor de imanes permanentes, y por el lado derecho se encuentran las sondas de corriente, midiendo cada fase.

Los sensores de corriente deben calibrarse en el osciloscopio ya que se encuentran desconfigurados, se hace conectándolos al osciloscopio sin medir corriente, el offset se pone en 0,0 para que la calibración quede exacta.

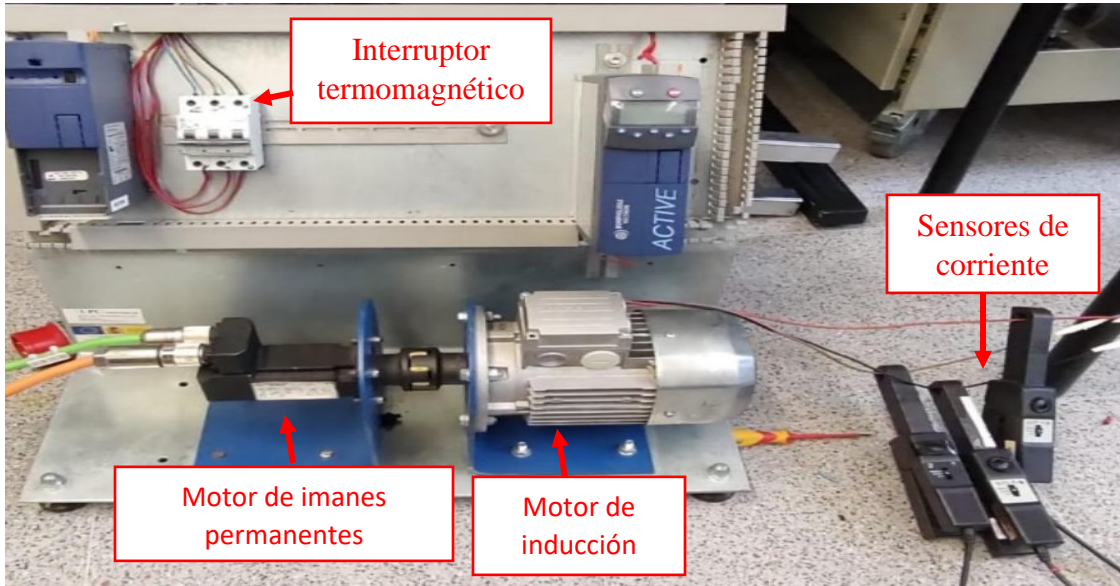


Figura 79.- Banda del motor y sondas de corriente

Es esta imagen se muestra el bus DC y la fuente de alimentación para el control de los MOSFET del inversor.

Los MOSFET están alimentados con 24 VCD mientras que el bus DC es una fuente variable de 0 a 240 VCD

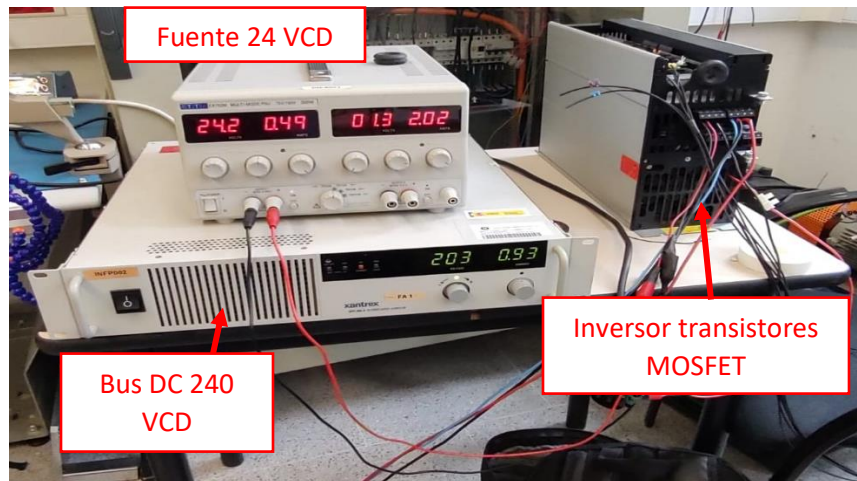


Figura 80.- Bus DC e inversor

Comunicación por fibra óptica desde la dSPACE hacia el inversor, las señales son el enable de los transistores y las 3 señales digitales del PWM para modular la corriente alterna.

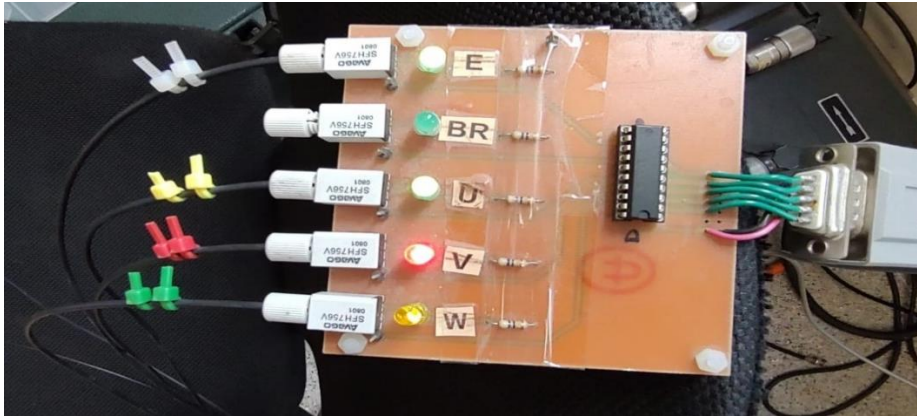


Figura 81.- Comunicación por fibra óptica

Ordenador y dSPACE, aquí se hace el control de Simulink y la interfaz a ControlDesk de la dSPACE.

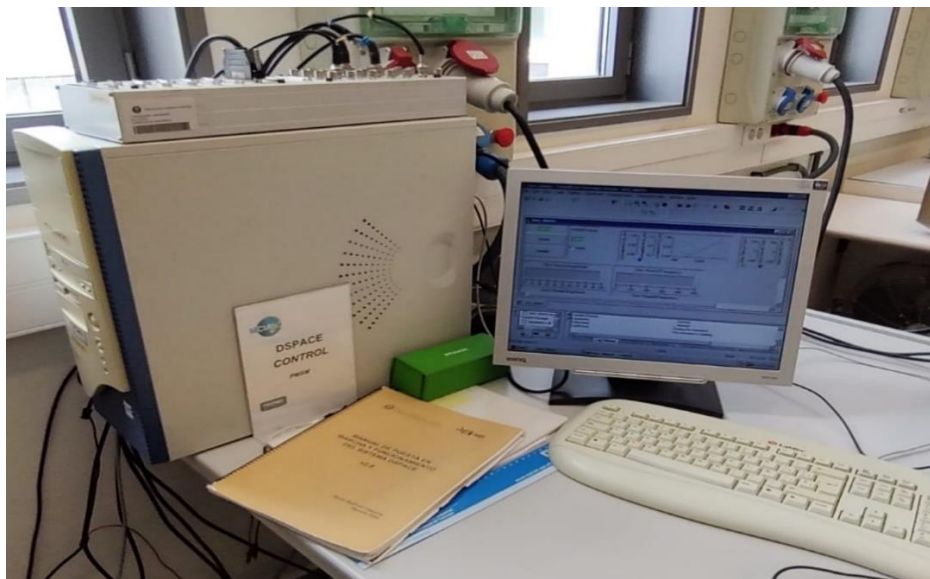


Figura 82.- dSPACE y ordenador

Setup del proyecto: bancada del motor, bus DC e inversor, comunicación de fibra óptica y dSPACE.

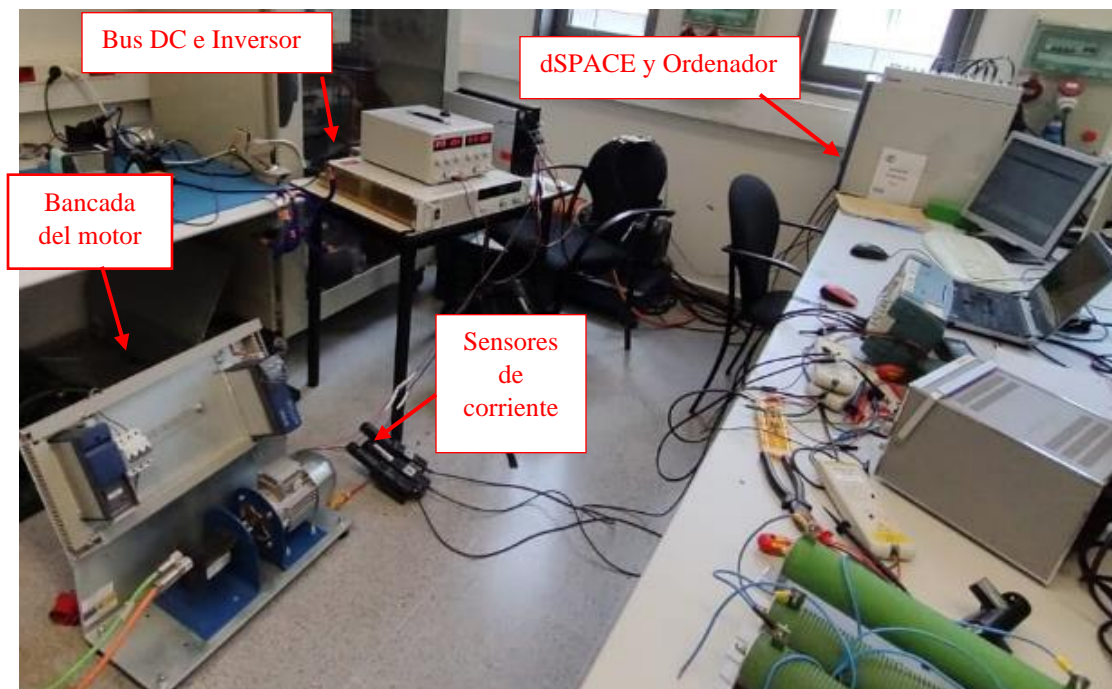


Figura 83.- Maqueta completa del control

#### 4.9. Control vectorial en Simulink

Se desarrolló un modelo en Simulink de Matlab, el cual consta de diferentes etapas para controlar a la máquina de inducción con control vectorial como principal objetivo, analizando sus pérdidas y agregando una etapa de optimización de la eficiencia tal como se presenta en la figura 84.

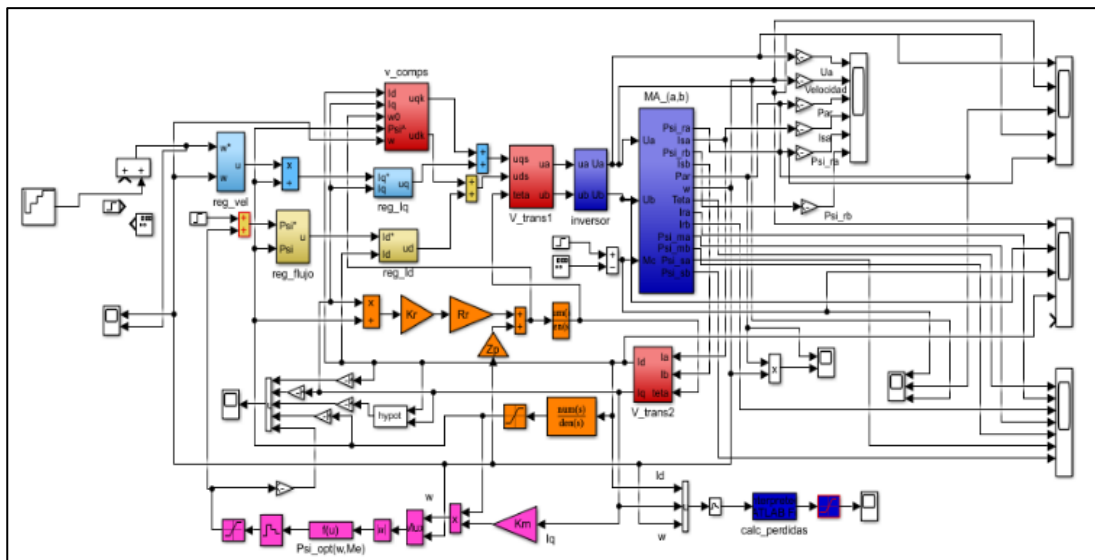


Figura 84.- Modelo del control en Simulink

En la figura 84 en la parte de color azul se muestra el inversor conectado al motor, por la parte de en medio se observan las transformadas de los ejes en color rojo, posteriormente en amarillo el controlador de flujo y junto en azul el controlador de la velocidad, para finalizar la parte de la optimización de la eficiencia en color morado. Al tener el modelo simulado se hicieron pruebas para corroborar el funcionamiento del control vectorial al motor de inducción tipo jaula de ardilla.

La simulación consta de probar una velocidad con cambio en el torque, lo que significa hacer cambios de carga en determinado tiempo, esta prueba se realizó con el lazo de optimización de eficiencia y también sin el lazo, esto es explicado en el capítulo 5 de resultados.

## Capítulo 5. Resultados de las pruebas experimentales y simuladas

### 5.1. Control escalar con variador Bonfiglioli

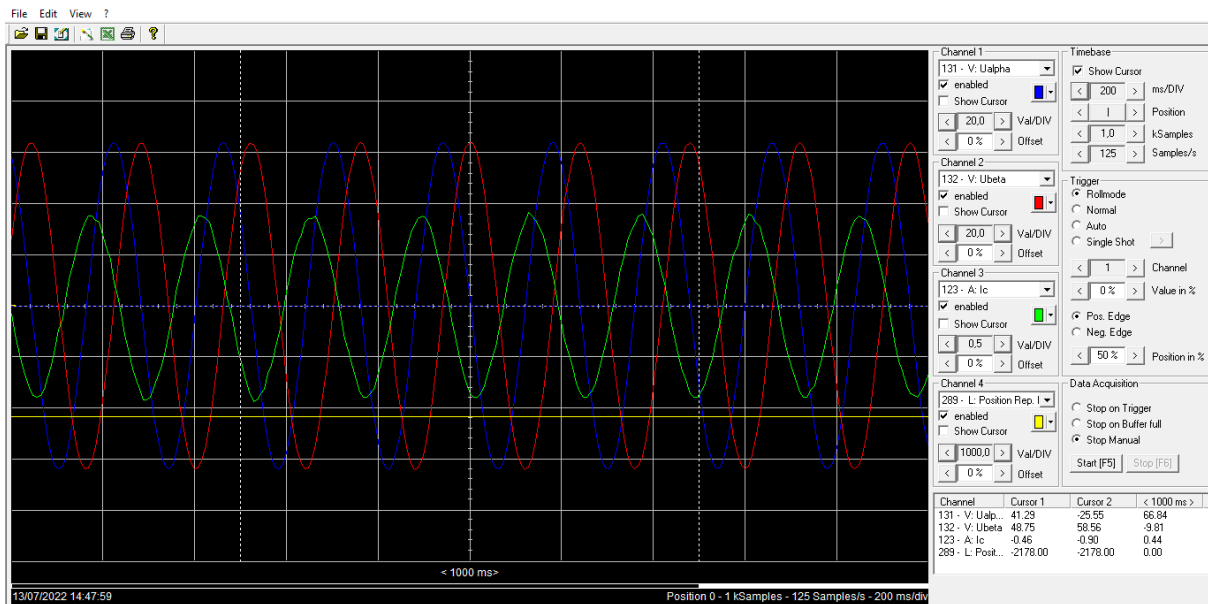


Figura 85.- Corrientes en el estator del motor

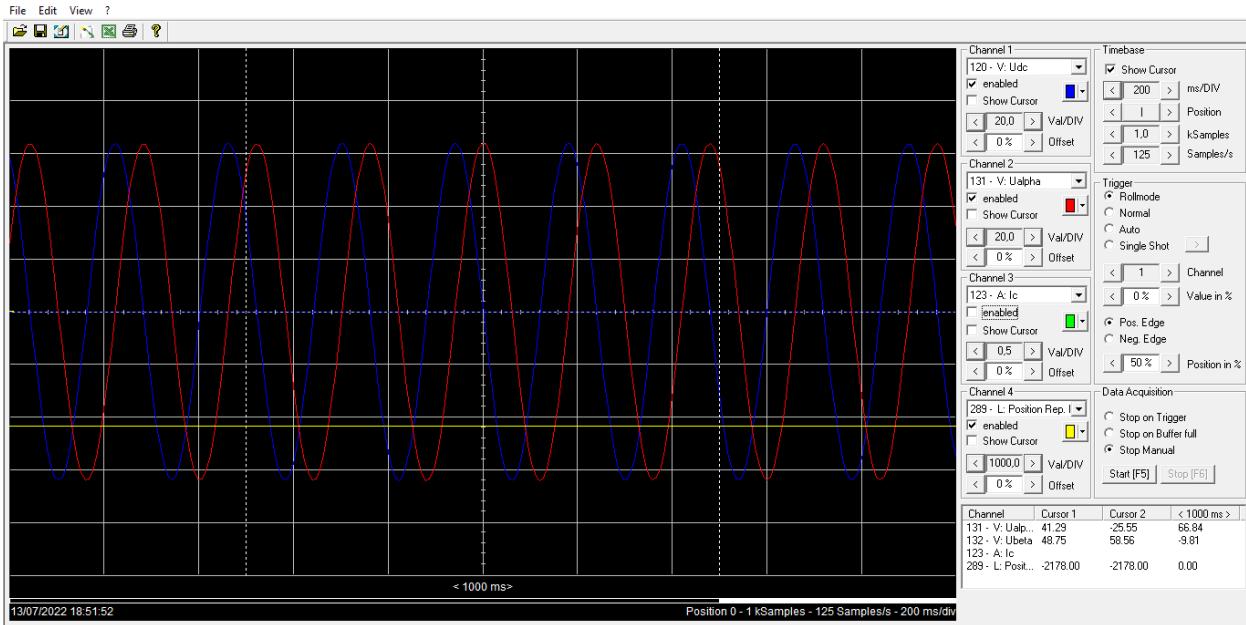


Figura 86.- Voltajes en el estator

Los variadores son un dispositivo fundamental para el control de motores de inducción en la industria, surgieron de la necesidad de controlar de manera precisa la velocidad de estos motores, sin embargo, el control escalar es el más básico entre los controles de motores, no obstante, cumple con la tarea de reducir la velocidad, perdiendo eficiencia por el torque que se pierde al disminuir el voltaje en los devanados del estator. Por otro lado, se obtienen ventajas también como la reducción de consumo de energía por efectos de un arranque en rampa, también menos daño al motor por un paro o arranque de forma brusca o repentina, ya que se pueden programar rampas de aceleración o desaceleración y controlar este dispositivo de forma automática con un PLC, y las desventajas que se necesita de personal calificado para la instalación y programación de este dispositivo, una inversión mayor para la protección del variador y del motor además de un mantenimiento o reparación en caso de fallos.

## 5.2. Control vectorial directo con optimización de eficiencia en Simulink

Las siguientes imágenes muestran el comportamiento de algunos parámetros en el motor, con el lazo de optimización de eficiencia.

En la figura 87 y 88 se observan los cambios del voltaje en el estator, debido a que se hace un cambio en el torque, se nota como empieza con el pico de voltaje para que los milisegundos se estabilicen en 240 VCA.

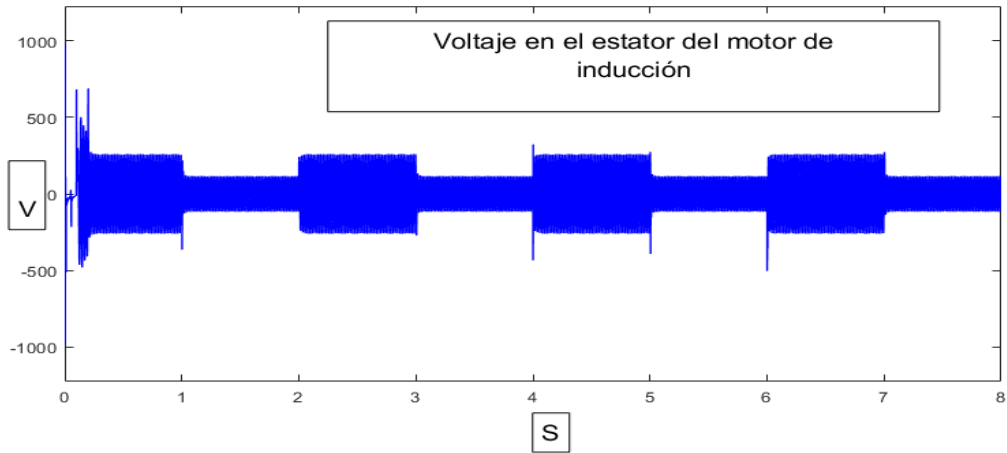


Figura 87.- Voltaje en el estator

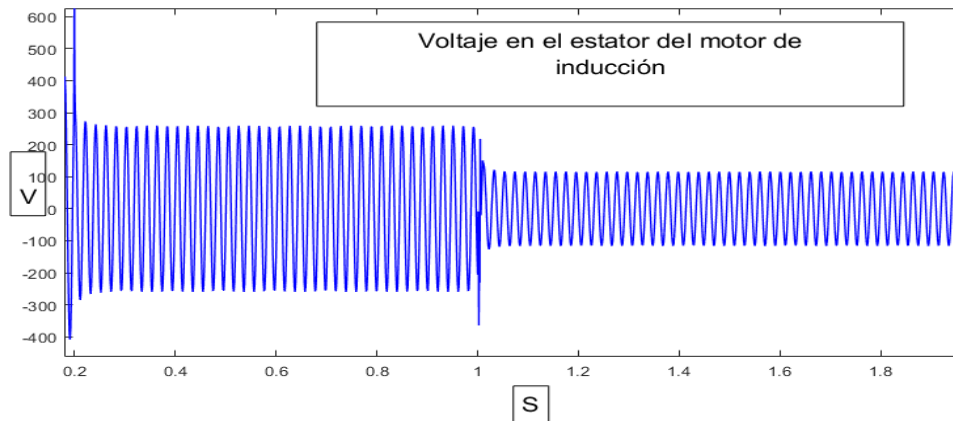


Figura 88.- Zoom de la figura 2

En las figuras siguientes 89 y 90 se grafican las velocidades de referencia en color negro y la real en color azul, se observa que hay un control en la velocidad, y hay pequeñas variaciones ya sea de subida o de bajada en las RPM, esto ya que al aumentar o disminuir el torque la velocidad tiende a aumentar o disminuir, sin embargo, se controla de manera casi instantánea.

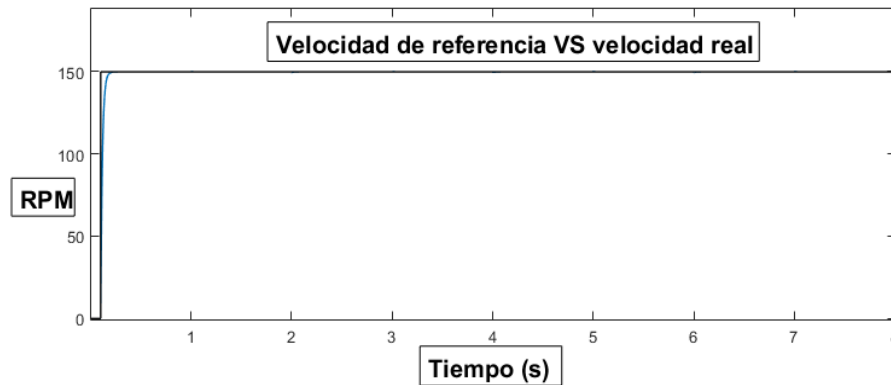


Figura 89.- Velocidad real VS velocidad de referencia

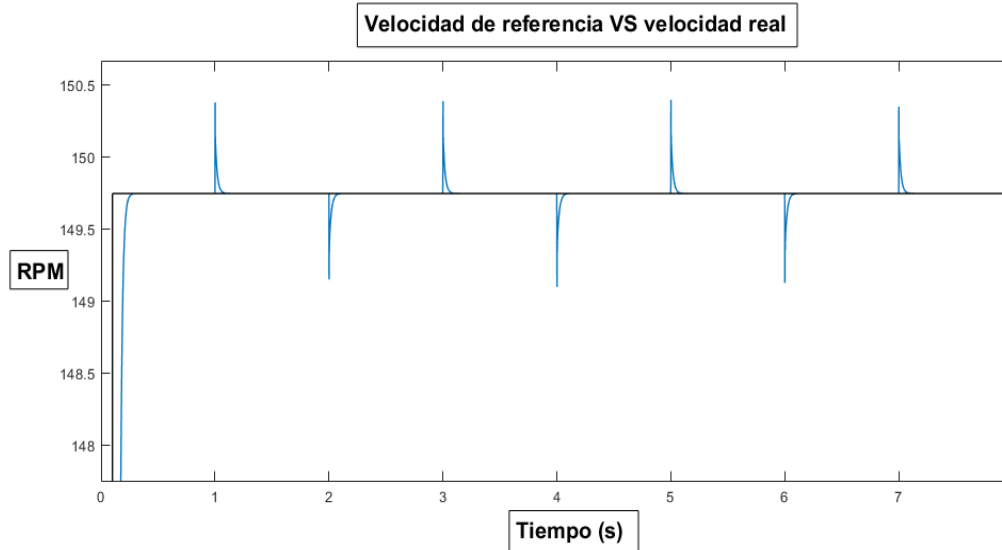


Figura 90.- Zoom de la figura 4

La figura 91 muestra el comportamiento del torque aplicado en una referencia y en color negro el torque que el motor de inducción genera, se nota como lo sigue, no obstante, existen picos en el torque que se corrigen de inmediato, y así sucede en toda la simulación.

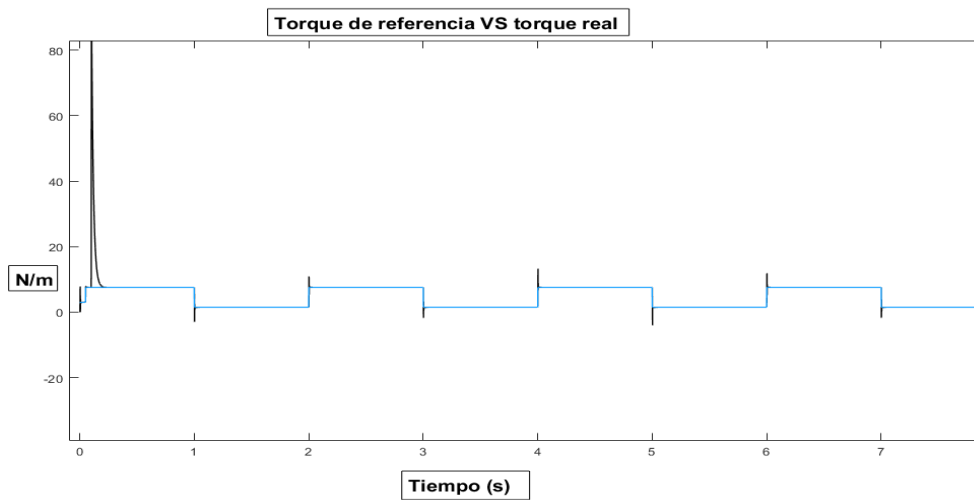


Figura 91.- Torque de referencia VS torque real

Por último, se grafica la corriente en el estator en la figura 92, como es notable varía conforme a los cambios de torque, manteniendo la misma velocidad, esto indica que se hace eficiente el consumo energético ya que cuando la carga disminuye la corriente tiende a bajar.

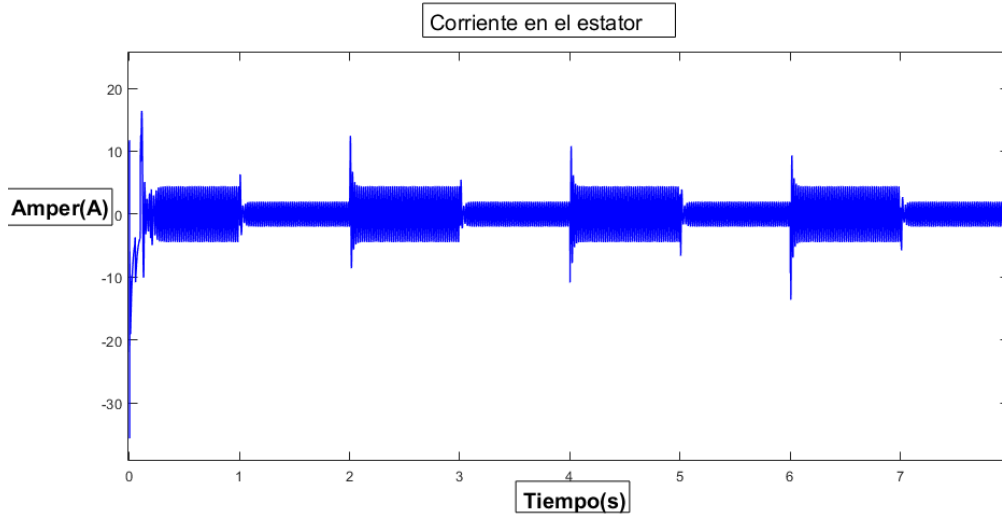


Figura 92.- Corriente en el estator

Por otro lado, se hace una comparación ahora sin el lazo de optimización de eficiencia, las siguientes figuras evidencian el comportamiento del control.

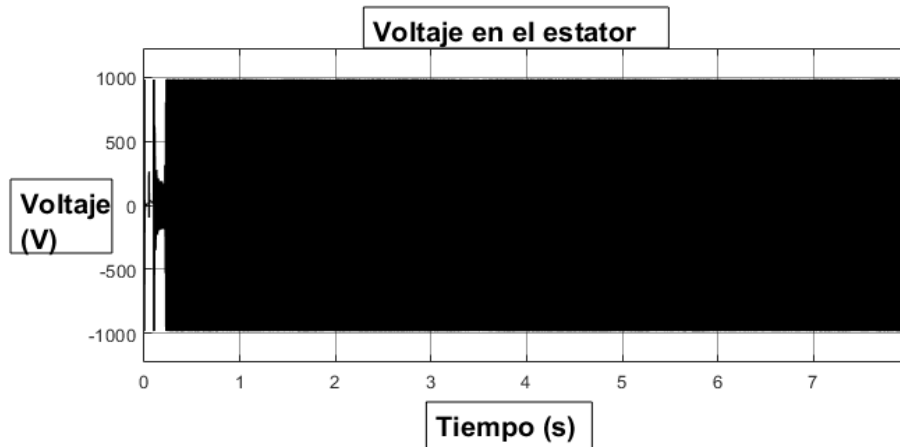


Figura 93.- Voltaje en el estator sin optimización de eficiencia

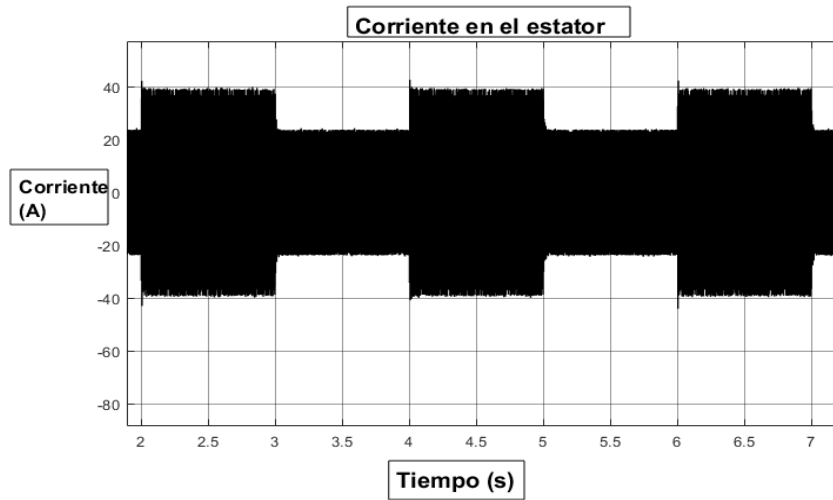


Figura 94.- Corriente en el estator

Como se puede notar en la figura 93 el voltaje se incrementa de manera considerable que en primera no es correcto un aumento de voltaje tan grande porque el motor se dañaría, y viendolo de manera de consumo energético es ineficiente ya que la potencia aumenta mucho para mantener una velocidad constante a los mismos cambios de torque, esto se complementa con la siguiente figura 94, que de igual forma se nota el incremento de la corriente.

Si bien en la figura 94 la velocidad real sigue a la de referencia, se nota que existe inestabilidad y no se mantiene constante, sin embargo, existe un control. De misma manera en la figura 96 se observa como el torque sigue al de referencia, pero con oscilaciones por lo cual hace un control de menor calidad al control con optimización de eficiencia.

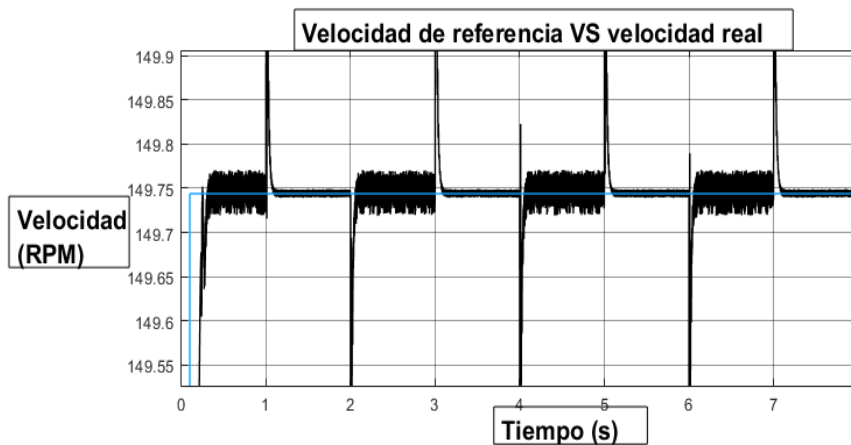


Figura 95.- Velocidad real VS velocidad de referencia sin optimización de eficiencia

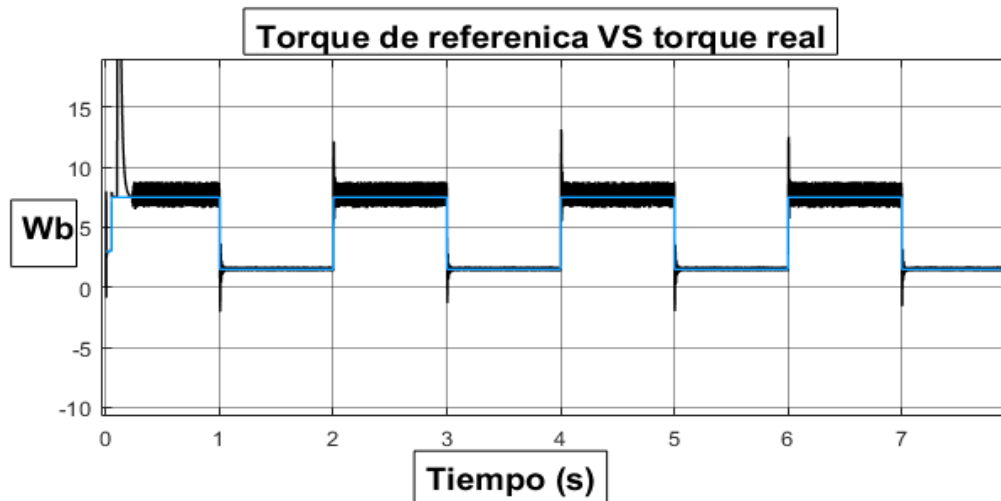


Figura 96.- Torque real VS torque de referencia

Haciendo referencia a la comparación de ambas simulaciones con y sin optimización de eficiencia se concluye que es evidente la mejora que existe en un control optimizado, además, si agregamos la posibilidad de utilizar motores de alta eficiencia o eficiencia premium, el accionamiento en general daría un mejor resultado y un menor consumo de energía eléctrica, lo resultaría un ahorro económico en cualquier aplicación en que se utilice.

Por otro lado, también se puede concluir que, al hacer un control con optimización de eficiencia, las corrientes son menores, lo que hace que el cobre conductor se dañe menos y su vida útil se alargue.

Después de haber puesto en marcha los diferentes controles de motores durante la estancia se notan las diferencias entre uno y otro, tomando en cuenta que el control escalar por más simple que sea los variadores de velocidad comerciales lo han adaptado muy bien para el uso en la industria por su simplicidad de puesta en marcha, sin embargo, para un control de velocidad más preciso se necesita implementar el control vectorial para un mejor desempeño en el motor y un resultado final más precioso. Se necesita continuar con el trabajo realizado en la estancia, poniendo una carga al motor de inducción, obteniendo resultados con diferentes cargas para obtener el rendimiento a diferentes velocidades y torques. El objetivo principal de poner en marcha un motor físico para complementar el estudio de tesis a nivel simulación se realizó de manera exitosa y con los datos obtenidos y el aprendizaje desarrollado durante este periodo el trabajo final de tesis será complementado, dejando conclusiones y trabajos futuros para el estudio futuro de los motores de inducción y el hardware in the loop que facilitan el control y la interfaz gráfica para el operador en diferentes aplicaciones.

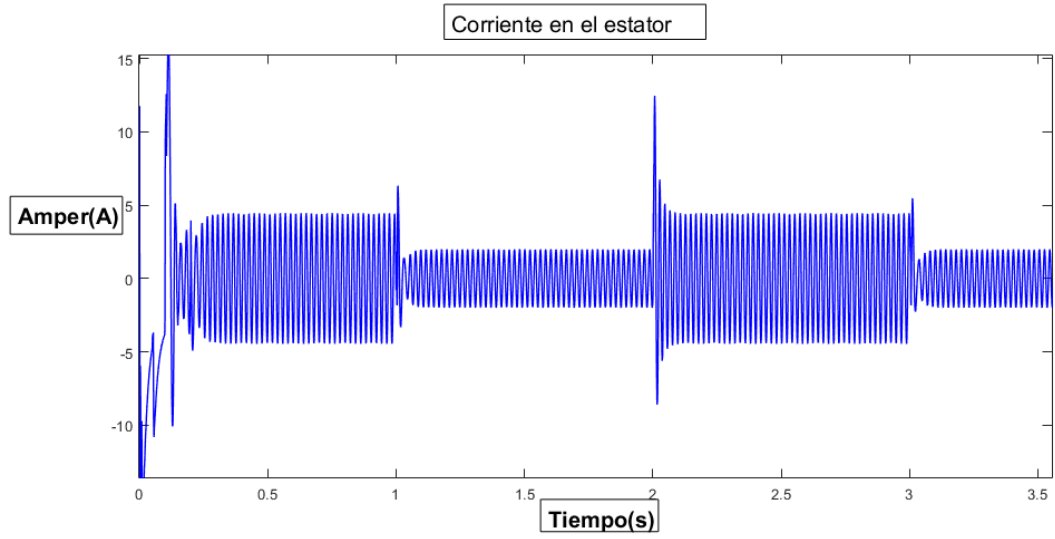


Figura 97.- Corriente en el estator zoom

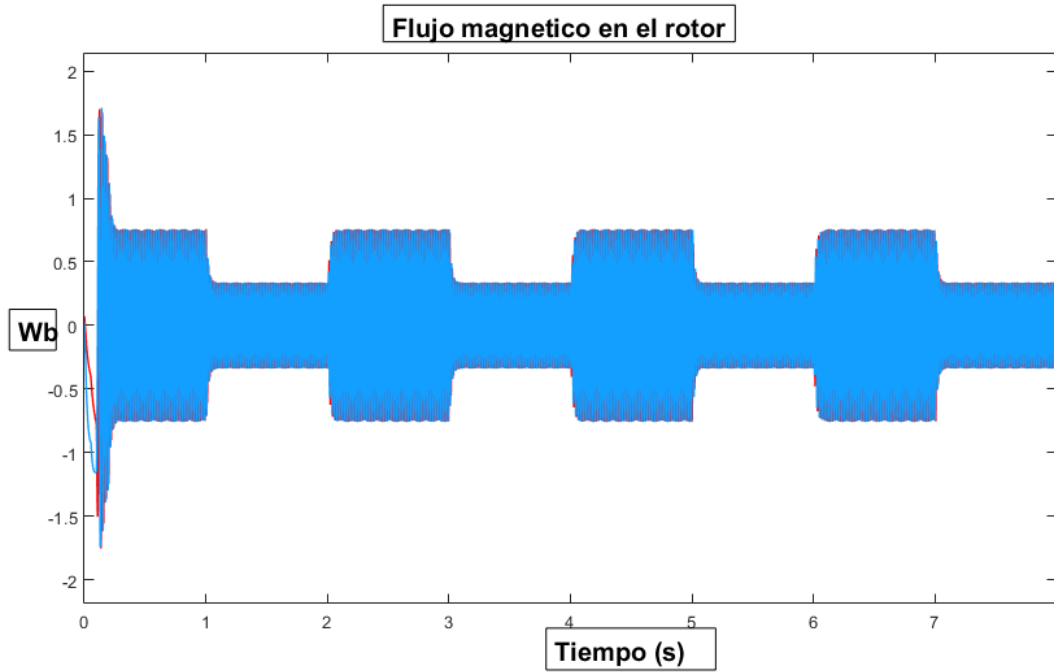


Figura 98.- Flujo magnético en el rotor

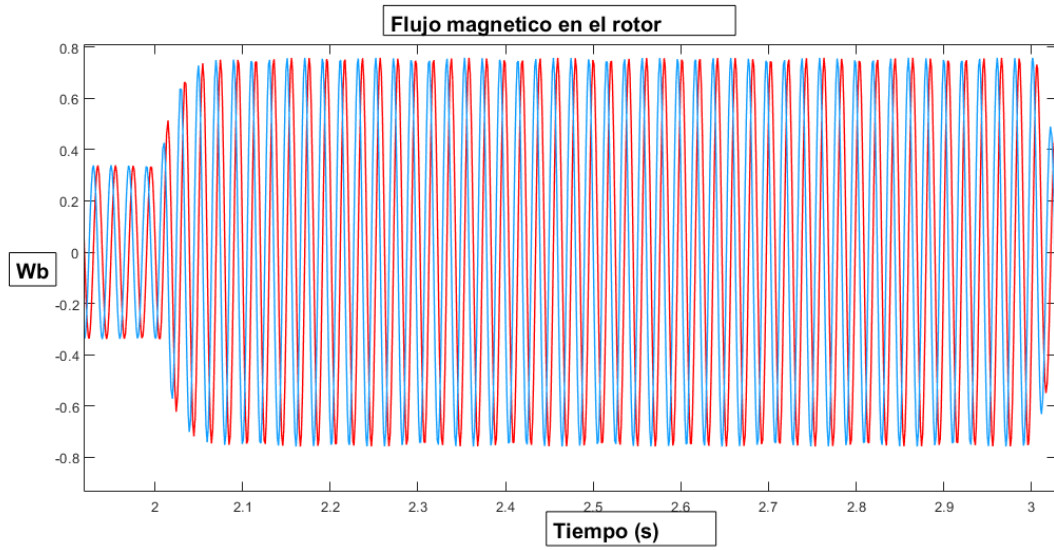


Figura 99.- Flujo magnético en el rotor zoom

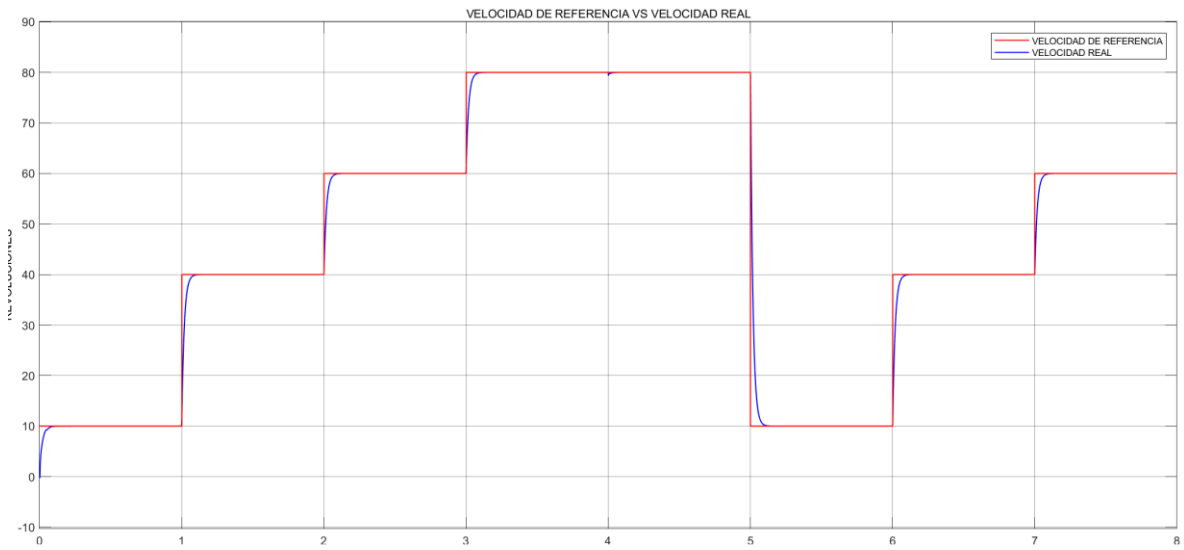


Figura 100.- Arranque en escalón de 10 rpm a 80 rpm

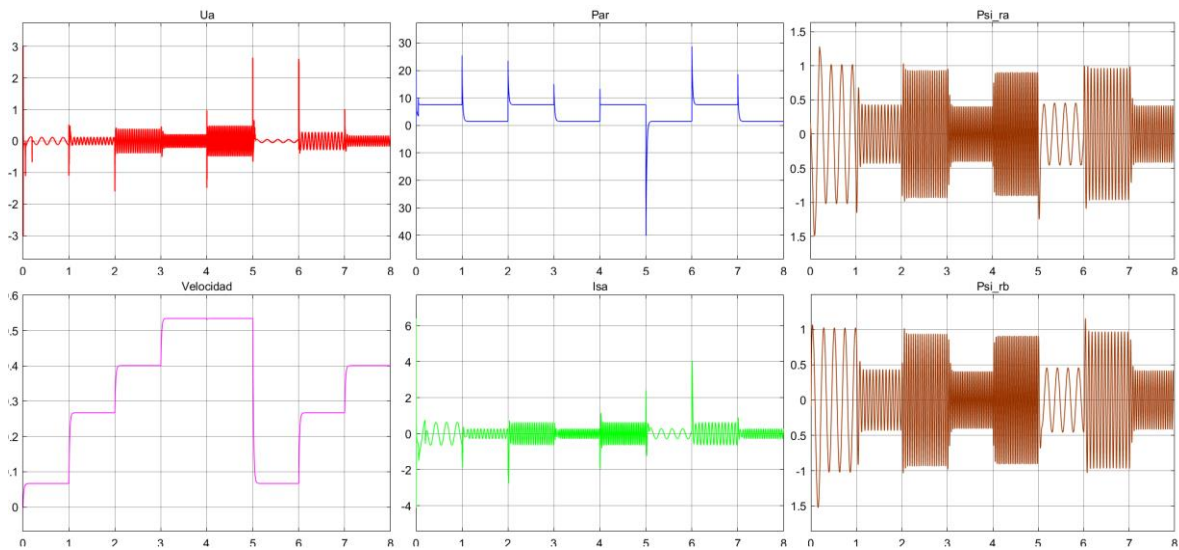


Figura 101.- parámetros generales de la nueva velocidad

### 5.3. Control vectorial del motor de inducción con MATLAB y dSPACE

Con este control se obtienen las corrientes y voltajes a diferentes consignas asignadas, también la velocidad de referencia y velocidad real, torque de consigna y torque real, flujo magnético, etc. Demostrando que se puede hacer un control a partir de Simulink y la interfaz de dSPACE, las ventajas que se encuentra es que se puede hacer la interfaz gráfica que más convenga respecto al control y poder monitorear todas las variables reales desde el ControlDesk y cambiarlas en tiempo real, algunas desventajas o complicaciones que se encontraron son los dispositivos que faltan para hacer una parametrización de variables.

Por otro lado, queda demostrado que la dSPACE es un dispositivo de control muy eficiente capaz de hacer el control en tiempo real y mediciones exactas comparadas con un osciloscopio de alta gama.

Los siguientes resultados se obtuvieron después de configurar el arranque del motor a 3 distintas velocidades y cada uno con una unidad de torque diferente para mostrar el comportamiento distinto en cada situación

### 5.3.1 Arranque en escalón 100 RPM

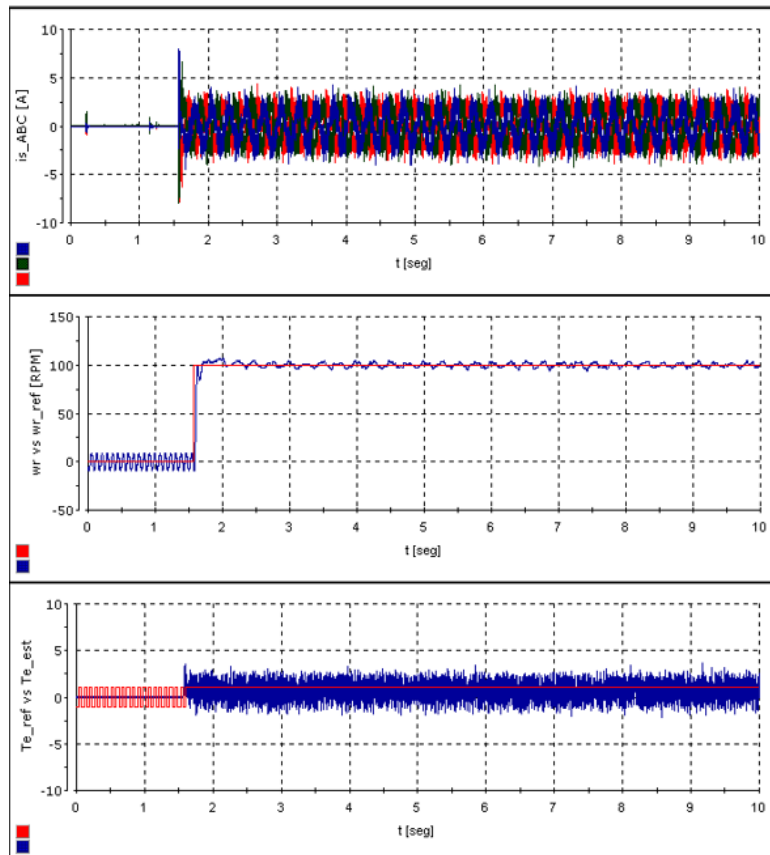


Figura 102.- Corrientes, velocidad y torque a 100 rpm

La primera parte de la figura 102 muestra el comportamiento de la corriente a-b-c del motor de inducción, se observa que la corriente hace un cambio al segundo 1.5 ya que en ese momento es aplicado el escalón a 100 rpm, la corriente crece debido a que se necesita llegar a una velocidad de referencia con un torque aplicado por una carga.

La segunda parte es la gráfica de velocidad de referencia en color rojo a 100 rpm y la velocidad real en color azul, se puede observar que la velocidad es seguida de buena manera y al llegar a la velocidad de consigna la velocidad real intenta mantenerse teniendo un pequeño rizado que no afecta en nada al motor.

La tercera parte es el torque de referencia contra el torque real, en color rojo se grafica el torque a una unidad, obsérvese que el torque real se mantiene en el torque deseado, no obstante, la señal se muestra con mucho ruido, debido a la baja velocidad que se tiene como consigna.

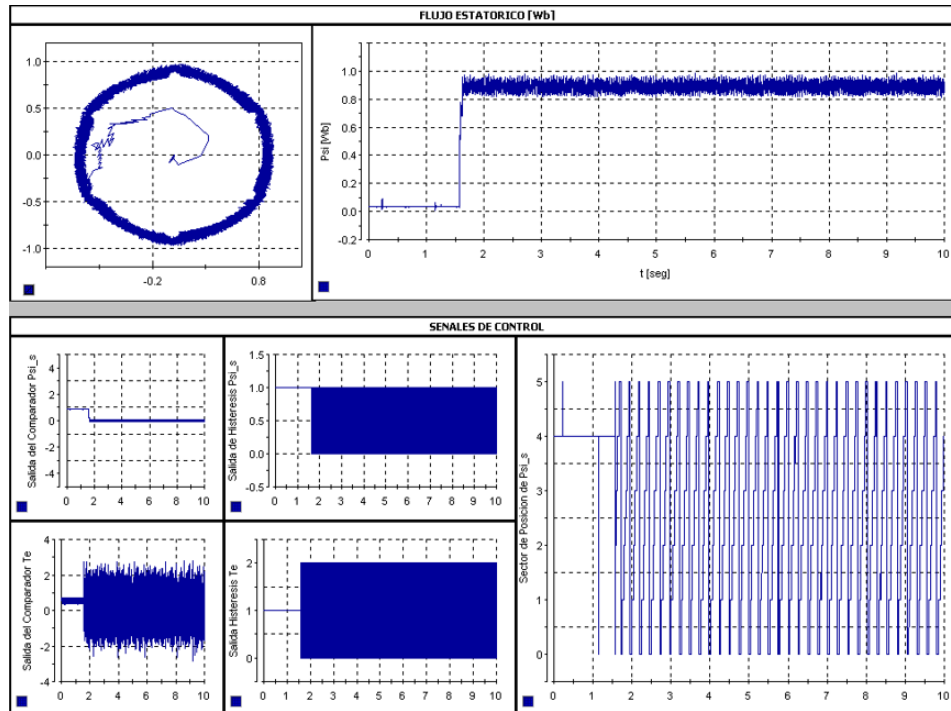


Figura 103.- Flujo estático y señales de control

La figura 103 muestra el comportamiento del flujo magnético respecto a la velocidad y torque asignado, se nota que el flujo magnético en el estator es constante debido a que no hay cambios de torque y velocidad, dando como resultado un comportamiento normal en la máquina de inducción.

### 5.3.2 Arranque en escalón 500 RPM

Se observa en la figura 104 como la velocidad de real sigue perfectamente a la velocidad de consigna, indicando que el control está bien realizado y cuenta con una respuesta rápida de 1.5 s con un sobretiro muy bajo menor al 5%, por el lado de la corriente se nota que cuando el motor arranca la corriente se eleva por un momento para posteriormente controlarse y mantenerse constante.

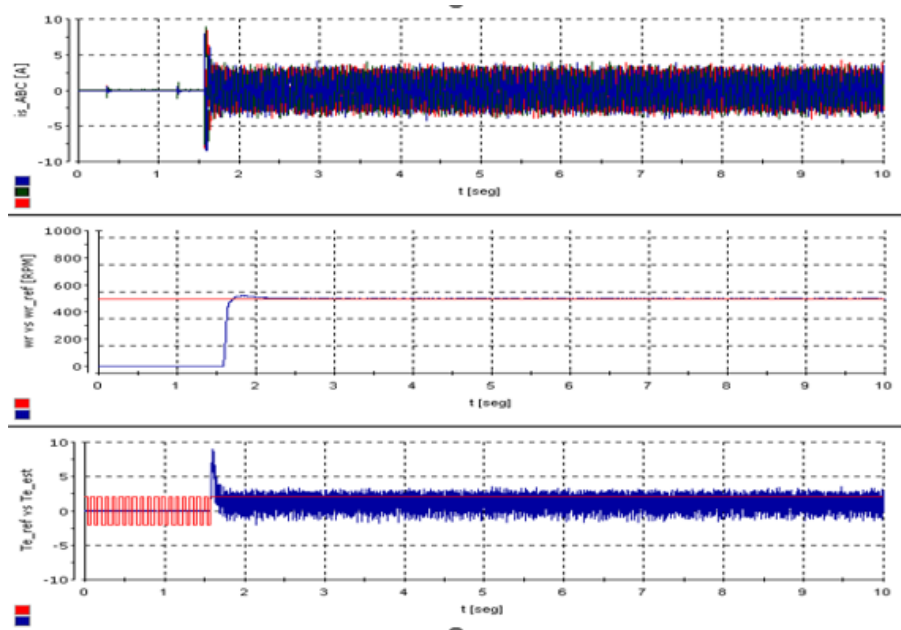


Figura 104.- Corriente, velocidad y torque a 500 rpm

Este arranque se hizo en 500 rpm a un escalón instantáneo en el segundo 0, sin embargo, como se nota en la segunda parte de la imagen, la velocidad real tarda 1.5 segundos en alcanzar la velocidad de consigna, esto debido a que el troque que se aplicó como consigna es de 2.5 unidades, el torque tiene una elevación mayor ya al arrancar en escalón rompe la fuerza contraelectromotriz generando un pico en la corriente de arranque, lo que genera que rebase por un momento al torque de consigna que enseguida se estabiliza dando como resultado un buen comportamiento en el control.

### 5.3.3 Arranque en escalón 1400 RPM

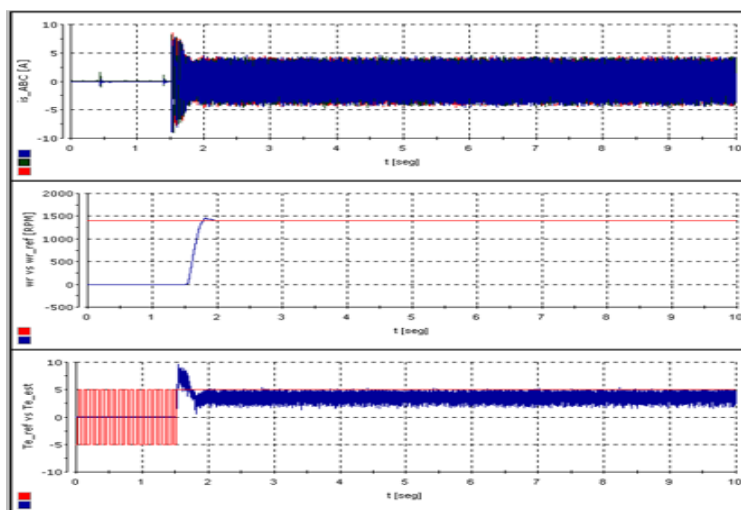


Figura 105.- Corriente, velocidad y torque a 1400 rpm

El comportamiento del arranque en escalón a 1400 rpm en la figura 105 es muy similar al arranque a 500 rpm ya que alcanza a la velocidad consigna al mismo tiempo, la diferencia es el corriente que aumenta un poco y el torque se vuelve más estable ya que está trabajando a velocidad nominal donde el torque tiene el mejor comportamiento, el control sigue siendo estable ya que no se encuentran distorsiones en la velocidad o torque que afecten al sistema.

Los gráficos anteriores tienen como medida nominal el numero 5 por lo que en la siguiente tabla se expresan las medidas correspondientes.

*Tabla 7. Datos de la gráfica de corriente*

Amperes	
5 unidades	1.07 amperes
4.6 unidades	0.98 amperes
4.5 unidades	0.96 amperes

*Tabla 8. Datos de la gráfica de torque*

Torque		
5 gráfico	1 unidad	370W
2.5 gráfico	0.5 unidad	185W
0.1 gráfico	0.2 unidad	74W

Tomando en cuenta los valores del motor de inducción utilizado para la parte experimental y comparando la eficiencia real contra la que da el fabricante se obtiene lo siguiente:

*Tabla 9. Datos del motor de inducción tipo jaula de ardilla 0.37 kW*

Datos del motor	
Potencia nominal Pn	370 W
Velocidad nominal	1400 rpm
Voltaje nominal	400V (estrella)
Corriente nominal In	1.07
Factor de Potencia fp (coseno phi)	0.77

$$\eta = \frac{P_{mecanica}}{P_{eléctrica}} \cdot 100[\%]$$

$$\eta = \frac{370}{570.81} \cdot 100[\%]$$

$\eta = 64.8\%$  es similar a la eficiencia que indica el proveedor variando un factor de 0.8 unidades.

Con el experimento hecho en el laboratorio con el control vectorial directo, la corriente disminuye a 1.04 amperes a corriente nominal lo que la eficiencia aumenta en 1.8 unidades comprobando que el lazo de optimización de eficiencia mejora el consumo energético

$$\eta = \frac{370}{554.81} \cdot 100[\%]$$

$$\eta = 66.6 \%$$

Se obtienen las siguientes eficiencias con las velocidades de 500 rpm:

$$\eta = \frac{185}{523} \cdot 100[\%]$$

$$\eta = 38\%$$

y 100 rpm:

$$\eta = \frac{74}{516} \cdot 100[\%]$$

$$\eta = 14\%$$

Comparando con las eficiencias sin el sistema de control donde las eficiencias para 1400 rpm = 64.8%, para 500 rpm = 28% y para 100rpm= 10% se nota el cambio de eficiencia energética.

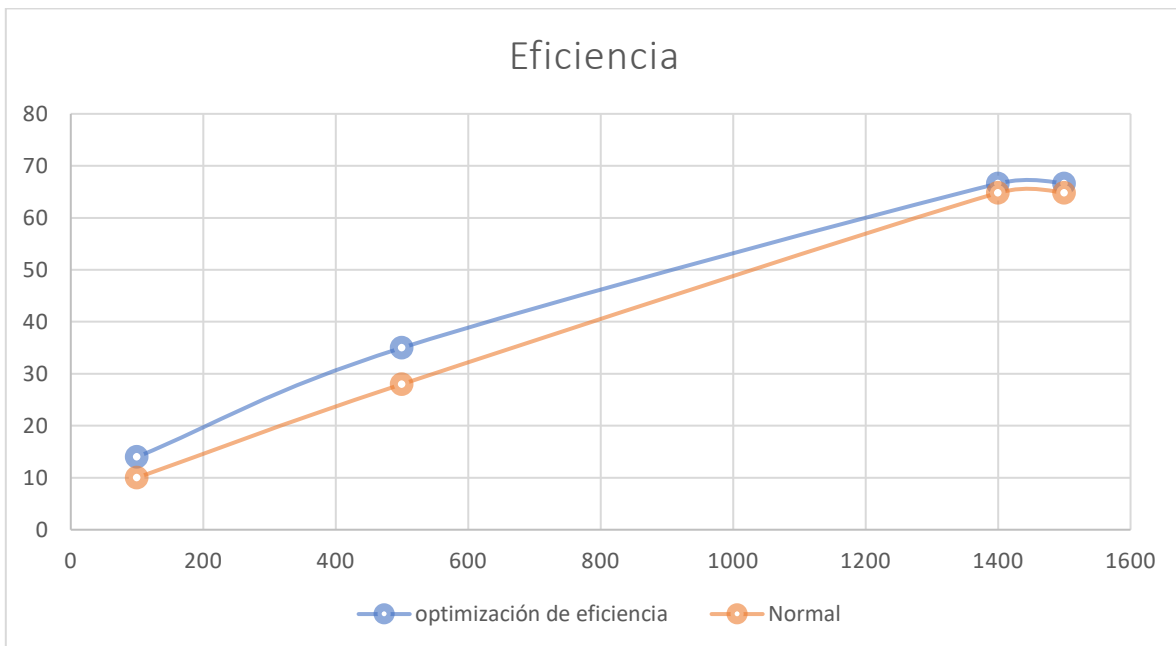


Figura 106.- Comparación de la eficiencia con control y sin control a 3 diferentes velocidades

Como se observa la eficiencia aumenta cuando se emplea el control vectorial directo a 100 rpm aumenta un 4% en 500 rpm aumenta un 7% y en 1400 rpm aumenta 1.8 %, esto debido a que la corriente disminuye generando el mismo torque, lo cual es un indicativo de que el objetivo de mejorar el consumo energético se cumple.

### 5.3.4 Arranque en rampa 1400 RPM

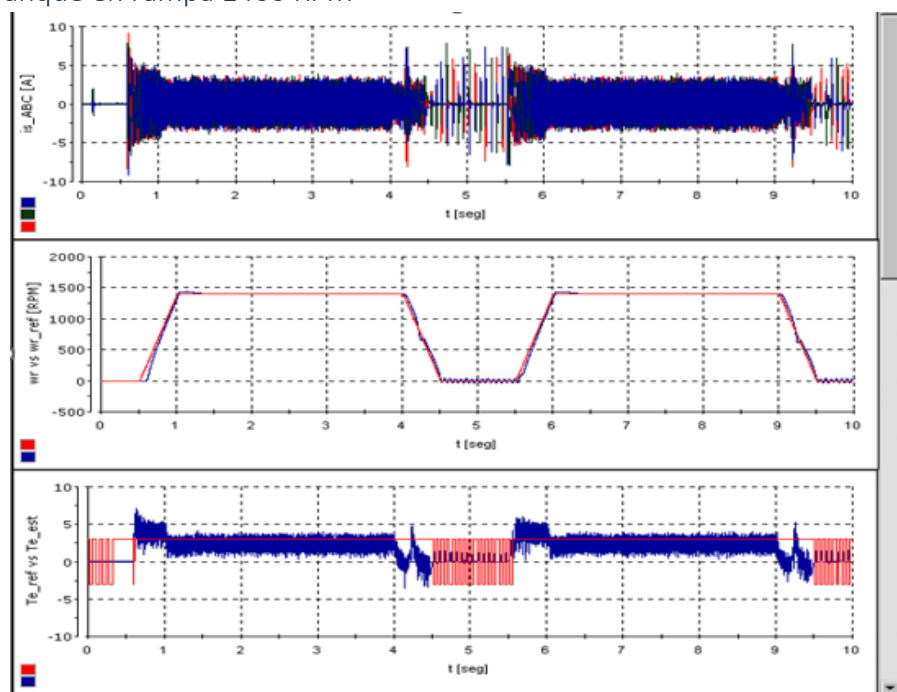


Figura 107.- Corriente, velocidad y torque en arranque en rampa a 1400 rpm

Un arranque en rampa beneficia a la calidad de vida de un motor de inducción, ya que disminuye la sobre corriente de arranque debido a que va aumentando gradualmente la velocidad, produciendo menos calor en sus bobinas, como puede observarse en la figura 106, la corriente da un pico al arranque y va disminuyendo respecto al tiempo, manteniéndose constante cuando la velocidad real llega a la velocidad de consigna, al disminuir la velocidad la corriente baja y al volver a llegar a la velocidad deseada la corriente sube gradualmente, por otro lado, el torque permanece constante una vez que alcanza el torque de consigna y al bajar la corriente el torque disminuye.

La siguiente tabla muestra la comparativa con otros dos trabajos relacionados el primero; Neural Estimators for Shaft Sensorless FOC Control of Induction Motor [37] que por su reciente experimento puede ser comparado con el tema de tesis desarrollado en este documento y el segundo; Diseño de un controlador de velocidad para un motor de inducción utilizando control vectorial [24] que por su desarrollo similar es interesante comparar con este tema de tesis, indicando las ventajas que se han logrado con este método de optimización de eficiencia.

Tabla 10. Comparativa

	Neural Estimators for Shaft Sensorless FOC Control of Induction Motor [37]	Diseño de un controlador de velocidad para un Motor de inducción utilizando control vectorial [24]	<b>Accionamiento eléctrico para un motor de inducción para alta eficiencia con estimación de la velocidad [Esta tesis]</b>
<b>Variación en la velocidad</b>	Hay una variación en la velocidad de 100 rpm con un tiempo de control de casi 1 segundo.	Hay una variación en la velocidad de 80 rpm con un tiempo de respuesta de 0.4 segundos.	La variación de la velocidad no rebasa una revolución, teniendo un tiempo de respuesta de 0.2 segundos
<b>Variación en la corriente</b>	No lo muestra.	La corriente no muestra un cambio significativo cuando se hace el cambio de torque lo que indica que consume más energía	La corriente disminuye cuando el torque disminuye, lo que indica que el consumo energético es menor al bajar el torque.
<b>Tiempo de respuesta de control</b>	1 segundo.	0.4 segundos.	0.2 segundos.
<b>Torque</b>	Al hacer el cambio de torque la velocidad varia muy poco lo que indica que la perturbación no afecta al sistema.	Cuando se hace un cambio en el torque, la velocidad tiende a alejarse de la velocidad de referencia, esto indica que la perturbación afecta al sistema.	Se observa un cambio a la velocidad no más de una revolución y se controla inmediatamente indicando que la perturbación no afecta al sistema.
<b>Eficiencia</b>	No lo muestra.	la eficiencia energética es pobre, debido a que la corriente no varía cuando la velocidad y torque es bajo, indicando que el consumo es alto a bajas velocidades.	La eficiencia aumenta considerablemente a velocidades bajas y a velocidad nominal aumenta al 1.8 % lo que indica que la optimización de eficiencia cumple con el objetivo.

## Conclusiones

- Tomando en cuenta los resultados obtenidos de este proyecto se concluye que el objetivo de optimizar la eficiencia se logró como se observa en la gráfica de optimización de eficiencia, logrando aumentar el rendimiento de hasta un 7% a baja velocidad tomado en cuenta que los motores de inducción a bajas velocidades se vuelven ineficientes, por otro lado, a velocidad y torque nominal se logró aumentar hasta un 1.8% en su eficiencia, enfatizando que es complicado aumentar la eficiencia de un motor de inducción a velocidad y torque nominal ya que en teoría es el mejor rendimiento que pueda alcanzar.
- Las pruebas indican que el control vectorial aplicado para este proyecto funciona en óptimas condiciones en estado permanente de operación del motor, ya que la respuesta de control para la velocidad y torque es rápida.
- Una ventaja de este proyecto es que se pueden eliminar los sensores de corriente ya que al ser un sistema balanceado con un solo sensor se puede deducir la corriente de las otras dos fases, por otro lado, también por la teoría de transformadas de Clark y Park que es aplicado a este control ya que convierte un sistema trifásico a un sistema bifásico retórico, simulando que es un control para un motor de corriente continua.
- Las gráficas de las figuras 103,104,105 y 107 indican que los controles de velocidad tienen un tiempo de respuesta rápido en 100 rpm es instantáneo, en 500 y 1400 rpm demora solo 1.5 s en alcanzar la velocidad de referencia ya que es una señal escalón, en el caso del torque en los tres casos el tiempo de respuesta es de 0.1 segundos indicando la rápida estabilidad debido a que los controles PI son estables y están bien sintonizados, ya que esta sintonización se hizo manualmente, conforme se fueron haciendo las pruebas simuladas y posteriormente físicas. Por otro lado, la gráfica de la figura 107 que es una señal en rampa indica un tiempo de respuesta mejor a 1400 rpm comparada con la respuesta a la señal escalón a la misma velocidad, así también la estimación del flujo es muy precisa y eficiente ya que no consume muchos recursos en el sistema digital lo que lo hace más rápido. Cabe mencionar que este control puede trabajar a velocidad 0 teniendo un torque debido a que es un control estable y robusto. Esto puede considerarse como una mejora al control vectorial directo.
- Por último, al hacer las pruebas físicas se obtiene una aportación extra al tema de tesis ya que los objetivos de esta tenían un alcance solo de simulación, por lo cual no podría probarse si el control funciona correctamente en una aplicación física.
- Por esta razón se notó que en estado estacionario no genera una buena eficiencia que este dato podría ser insignificante ya que el motor la mayoría del tiempo opera en estado permanente.

## Trabajos futuros

- Como futuras líneas de investigación se considera que puede desarrollarse este mismo control para motores de mayor potencia, se propone a motores con capacidad mayor a 7.4 kW que su eficiencia esta arriba del 90%.
- También sería interesante trabajar en conjunto con motores de inducción tipo jaula de ardilla de alta eficiencia “High-Efficiency (IE2)” ya que por su tipo de construcción su eficiencia energética rebasa el 93 % lo cual permitiría alcanzar quizá un mejor rendimiento.
- Hacer una investigación para trabajar el control vectorial directo con control lógico difuso, para hacer una variación al control vectorial directo tradicional.

## Referencias

- [1] S. M. de Pancorbo, G. Ugalde, J. Poza and A. Egea, "Comparative study between induction motor and Synchronous Reluctance Motor for electrical railway traction applications," *2015 5th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*, Nuremberg, Germany, 2015, pp. 1-5, doi: 10.1109/EDPC.2015.7323219.
- [2] P. C. Valencia-Manrique and R. Jesus Coaquira-Castillo, "Speed Performance Comparative of Indirect Field Oriented Control based on current model for Induction Motors in Educational Equipment," *2020 IEEE XXVII International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON)*, Lima, Peru, 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/INTERCON50315.2020.9220202
- [3] J. Titus, P. Harikrishnan and K. Hatua, "Sensorless Vector Control for a Load Commutated Inverter fed Active-Reactive Induction Motor Drive," *2019 IEEE 13th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG)*, Sonderborg, Denmark, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/CPE.2019.8862386.
- [4] W. R. Finley, M. Nordmeyer and Z. Merana, "Understanding Alternate Methods of Motor Starting, an Investigation on Advantages and Disadvantages," *2019 IEEE Petroleum and Chemical Industry Committee Conference (PCIC)*, Vancouver, BC, Canada, 2019, pp. 61-70, doi: 10.1109/PCIC30934.2019.9074518.
- [5] M. Deeb, N. F. Kotelenets, T. Assaf, H. M. Sultan and A. S. A. akaysheedep, "Three-Phase Induction Motor Short Circuits Fault Diagnosis using MCSA and NSC," *2021 3rd International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE)*, Moscow, Russia, 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/REEPE51337.2021.9388051.
- [6] Z. Yang, F. Shang, I. P. Brown and M. Krishnamurthy, "Comparative Study of Interior Permanent Magnet, Induction, and Switched Reluctance Motor Drives for EV and HEV Applications," in *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 1, no. 3, pp. 245-254, Oct. 2015, doi: 10.1109/TTE.2015.2470092.
- [7] A. Gauri, B. R. Vinod and G. Shiny, "Vector Control Method for Induction Motor Drive Based on Hysteresis Controller and PI Controller Comparative Study," *2019 IEEE International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT)*, Coimbatore, India, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICECCT.2019.8869497.

- [8] D. Sandeep, P. Srikanth, B. S. Praneeth, J. Peter and S. Athikkal, "Investigations on Space Vector based Bus Clamping PWM Strategies on Speed Control of Induction Motor Drive," *2019 International Conference on Power Electronics Applications and Technology in Present Energy Scenario (PETPES)*, Mangalore, India, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/PETPES47060.2019.9004015.
- [9] K. Chenchireddy, V. Kumar and K. R. Sreejyothi, "Investigation of Performance Vector Control Single-Phase Induction Motor," *2021 7th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS)*, Coimbatore, India, 2021, pp. 887-891, doi: 10.1109/ICACCS51430.2021.9441773.
- [10] E. Purwanto *et al.*, "Implementation of Genetic Algorithm for Induction Motor Speed Control Based on Vector Control Method," *2019 International Seminar on Research of Information Technology and Intelligent Systems (ISRITI)*, Yogyakarta, Indonesia, 2019, pp. 244-247, doi: 10.1109/ISRITI48646.2019.9034674.
- [11] Alzate. Gomes. A., "Control vectorial de la máquina de inducción", 43rd ed. Universidad Tecnológica de Pereira: Scientia et Technica Año XV, 2009, p. 6.
- [12] Vargas-Machuca Saldarriaga, F., 1990. "Máquinas eléctricas rotativas". Perú: Megaprint Ediciones s.a., p.272.
- [13] Bimal K. Bose., "Neural network applications in power electronics and motor drives an introduction and perspective". IEEE transactions on industrial electronics, volume 54, NO. 1, February 2007.
- [14] Dr. Dhiya Ali Al-Nimma. "Modeling and simulation of a speed sensor less vector-controlled induction motor drive system". Elec. Eng. Dept. Univ. of Mosul, Iraq. IEEE CCECE 2011 – 00003.
- [15] M. Gallo Nieves, J. Diaz Rodriguez and J. González Castellanos, "Speed estimation of an induction motor with sensorless vector control at low-speed range using neural networks". Pamplona, Colombia: WEA 2019, CCIS 1052, 2021, pp. 276-284.
- [16] Rashid, M. (1993). "Electrónica de potencia. México": Prentice-Hall.
- [17] Simotics El portafolio de motores eléctricos más amplio del mundo SIEMENS. Disponible en: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:782b04d0-82f4-488a-936b-514cd8bb5d5f/version:1580149154/artemimpresioncatalogosimotics.pdf>
- [18] Hoja de datos del transistor IGBT RJP30H2DPK-M0. Disponible en: [https://alltransistors.com/es/adv/pdfview.php?doc=rjp30h2dpk-m0\\_rjp30h2a.pdf&dire=renesas](https://alltransistors.com/es/adv/pdfview.php?doc=rjp30h2dpk-m0_rjp30h2a.pdf&dire=renesas)
- [19] C. J. Verucchi, C. R. Ruschetti and G. E. Kazlauskas, "High Efficiency Electric Motors: Economic and Energy Advantages", IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS, VOL. 11, NO. 6, DECEMBER 2013.
- [20] National Electrical Manufacturers Association; "NEMA Standards Publication MG 1-2003 Motors and Generators", 2003.
- [21] Norma Oficial Mexicana NOM-016-ener-2010, "eficiencia energetica de motores decorriente alterna, trifasicos, de induccion, tipo jaula de ardilla, en potencianominal de 0,746 a 373 kw. limites, metodo de prueba y marcado".
- [22] Dr. Gerardo Mino Aguilar. "Técnicas avanzadas hacia la optimización de eficiencia en motores eléctricos". Facultad de ciencias de la electronica BUAP.
- [23] STEPHEN J. CHAPMAN, British Aerospace Australia, "Maquinas eléctricas, tercera edición", MC Graw Hill, 2000.

- [24] M. R. Diana Fernanda, V.S. Jorge Olmedo, "Diseño de un Controlador de Velocidad para un Motor de Inducción utilizando Control Vectorial", Tesis, Departamento de Electrónica, Instrumentación y Control, Universidad del Cauca, Popoyan, 2005
- [25] Roberto Arnanz, F. Javier García, Luis J. Miguel, "Métodos de control de motores de inducción: síntesis de la situación actual", *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial* no.13 (2016) pp.381–392
- [26] Marco A. Gallegos Lara Ricardo Álvarez Salas, Jaime A. Moreno, Gerardo Espinosa Pérez, "Control Vectorial de un Motor de Inducción con Carga Desconocida Basado en un Nuevo Observador No Lineal", *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial* ISSN: 1697-7912. Vol. 7, Núm. 4, octubre 2010, pp. 74-82
- [27] Luis Enrique Avendaño González, Juan Pablo González Tamayo, "Simulación de control vectorial a un motor de inducción", *Scientia et Technica Año XVIII*, Vol. 18, No 1, abril de 2013. Universidad Tecnológica de Pereira. ISSN 0122-1701
- [28] Dr.Roberto Cárdenas Dobson, "Control Vectorial de Máquinas de Inducción Jaula de Ardilla", Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Chile, Septiembre 2011.
- [29] Transformada de Clarke y Parke, disponible en: <https://la.mathworks.com/solutions/power-electronics-control/clarke-and-park-transforms.html>
- [30] Carlos M. Londoño-Parra (1), José L. Ramírez-Echavarría (2), "Normas de Eficiencia Energética de Motores de Inducción, ¿Está Preparada Latinoamérica?", *Tecno. Lógicas.*, ISSN 0123-7799, No. 30, enero-junio de 2013, pp. 117-147
- [31] Bonfiglioli Vectron "Brief manual" power and control solutions, VECTRON Elektronik GmbH Europark Fichtenhain A 6 47807 Krefeld.
- [32] NORMA Oficial Mexicana NOM-001-SEDE-2012, "Instalaciones Eléctricas", disponible en: [https://dof.gob.mx/nota\\_detalle\\_popup.php?codigo=5280607](https://dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5280607)
- [37] P. Girovský, J. Timko, J. Žilková and V. Fedák, "Neural estimators for shaft sensorless FOC control of induction motor," *Proceedings of 14th International Power Electronics and Motion Control Conference EPE-PEMC 2010*, Ohrid, Macedonia, 2010, pp. T7-1-T7-5, doi: 10.1109/EPEPEMC.2010.5606907.