



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE CUENCA

CARRERA DE ELECTRICIDAD

**MODELACIÓN DINÁMICA DE MÁQUINAS DE INDUCCIÓN
MONOFÁSICAS EN ATPDRAW**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
título de Ingeniero Eléctrico

AUTORES: FABIÁN GUSTAVO ARPI PANZA
JUAN HERIBERTO MUÑOZ TENEZACA

TUTOR: ING. JOSÉ MANUEL ALLER CASTRO, PhD.

Cuenca - Ecuador

2024


**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN**

Nosotros, Fabián Gustavo Arpi Panza con documento de identificación N° 0150382562 y Juan Heriberto Muñoz Tenezaca con documento de identificación N° 0302624564; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 6 de septiembre del 2024

Atentamente,



Fabián Gustavo Arpi Panza
0150382562



Juan Heriberto Muñoz Tenezaca
0302624564


**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, Fabián Gustavo Arpi Panza con documento de identificación N° 0150382562 y Juan Heriberto Muñoz Tenezaca con documento de identificación N° 0302624564, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto Técnico: “Modelación Dinámica de Máquinas de Inducción Monofásicas en ATPDRAW”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 6 de septiembre del 2024

Atentamente,



Fabián Gustavo Arpi Panza
0150382562



Juan Heriberto Muñoz Tenezaca
0302624564

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, José Manuel Aller Castro, con documento de identificación N° 0151561800, docente de la Universidad Politécnica Salesiana - Sede Cuenca, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: MODELACIÓN DINÁMICA DE MÁQUINAS DE INDUCCIÓN MONOFÁSICAS EN ATP-DRAW, realizado por Fabián Gustavo Arpi Panza con documento de identificación N° 0150382562 y por Juan Heriberto Muñoz Tenezaca con documento de identificación N° 0302624564, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto técnico con enfoque investigativo que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 6 de septiembre del 2024

Atentamente,



Ing. José Manuel Aller Castro, PhD.
0151561800

AGRADECIMIENTO

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento al Dr. José Manuel Aller, nuestro estimado tutor y mentor a lo largo de este proyecto de tesis. Su vasta experiencia, dedicación y paciencia han sido fundamentales para guiarnos en este trayecto académico. Sus invaluable conocimientos, su visión crítica y sus acertadas recomendaciones han sido determinantes para culminar esta investigación con éxito. Más allá de ser un excelente académico, el Dr. Aller ha demostrado ser un ejemplo a seguir tanto profesional como personalmente, brindándonos su apoyo incondicional en todo momento. Le estaremos eternamente agradecidos por haber confiado en nosotros y por darnos la oportunidad de trabajar bajo su dirección. Sus enseñanzas y su legado perdurarán en nosotros a lo largo de nuestras carreras.

Con profunda gratitud y admiración.

Fabián y Juan

DEDICATORIA

Agradezco a Dios por ser la fuente de fortaleza y sabiduría que me ha guiado a lo largo de este camino.

A mis queridos padres, Manuel y María, quienes han sido mi guía y apoyo incondicional en cada etapa de mi vida. Su amor, sacrificio y sabiduría son el fundamento de cada logro en mi formación académica y personal. Este éxito se debe a ustedes.

A todos aquellos que han estado a mi lado durante esta travesía, brindándome aliento y compañía. Su apoyo ha sido invaluable tanto en los momentos difíciles como en los logros alcanzados. Gracias por ser mi refugio y fortaleza en cada paso de este camino.

Con todo mi aprecio y gratitud,

Fabián Arpi

DEDICATORIA

Mi trabajo de titulación se la dedico a mi Dios, fuente de toda sabiduría y fortaleza, quien me ha bendecido y guiado para culminar este proceso. A mis amados padres, Isabel Tenezaca y Segundo Muñoz, por su incondicional apoyo, guía y amor a lo largo de toda mi vida. A mis hermanos, Jessica y Carlos, por ser mis compañeros de vida y motivarme a ser mejor cada día. A mi esposa, Beatriz, y a mi hijo, Alejandro, quienes son mi mayor inspiración y fuente de felicidad. Al Dr. Jose Manuel Aller, director de mi tesis, por su invaluable conocimiento impartidos, paciencia durante este proceso. A mi compañero de tesis, Fabian, por su compromiso y colaboración. A todos ustedes, dedico con profunda gratitud este logro.

Juan Heriberto Muñoz Tenezaca

RESUMEN

Este trabajo se orienta a la modelación dinámica de la máquina de inducción monofásica desequilibrada utilizando el modelo VBR (Voltaje detrás de la reactancia). Para este fin, se determina su comportamiento en condiciones transitorias y estacionarias, desarrollando modelos en vectores espaciales. Se utiliza el programa ATP-EMTP y su entorno gráfico ATPDraw, comparando estos modelos mediante el programa Simulink del entorno MATLAB. ATP-EMTP en conjunto con ATPDraw es una herramienta de simulación para el análisis de transitorios electromagnéticos en sistemas eléctricos. Esta herramienta permite la implementación del modelo de la máquina de inducción monofásica utilizando módulos de control TACS y el lenguaje de programación MODELS. El objetivo de este trabajo consiste en evaluar y verificar los resultados de la simulación de máquinas monofásicas asimétricas, incluyendo variables tales como el par eléctrico, la velocidad angular, las corrientes de los devanados y los enlaces de flujo.

Palabras clave: Máquinas de inducción monofásica, ATP-EMTP, ATPDraw, vectores espaciales, modelo VBR, Simulink.

ABSTRACT

This work focuses on the dynamic modeling of an unbalanced single-phase induction machine using the VBR model (Voltage Behind Reactance). To this end, its behavior under transient and steady-state conditions is determined by developing models in space vectors. The ATP-EMTP software and its graphical interface ATPDraw are used, comparing these models through the Simulink program in the MATLAB environment. ATP-EMTP, together with ATPDraw, is a simulation tool for analyzing electromagnetic transients in electrical systems. This tool enables the implementation of the single-phase induction machine model using TACS control modules and the MODELS programming language. The objective of this work is to evaluate and verify the simulation results of asymmetric single-phase machines, including variables such as electric torque, angular velocity, winding currents, and flux linkages.

Keywords: Single-phase induction machines, ATP-EMT, ATPDraw, spatial vectors, VBR model, Simulink.

ÍNDICE

1	MOTOR DE INDUCCIÓN BIFÁSICA	3
1.1	Antecedentes	3
1.2	Justificación	6
1.3	Grupo Objetivo	7
1.4	Objetivos	7
1.5	Objetivo General	7
1.6	Objetivos Específicos	7
2	MÁQUINA DE INDUCCIÓN BIFÁSICA	9
2.1	Análisis del modelo de la máquina de inducción bifásica en coordenadas naturales	11
2.2	Análisis del modelo de la máquina de inducción bifásica simétrica referido al estator	15
2.3	Análisis del modelo de la máquina de inducción bifásica simétrica en sistema de coordenadas del estator	16
2.4	Análisis de modelo VBR de máquina de inducción bifásico simétrico	17
2.5	Análisis en régimen permanente de la máquina de inducción bifásica .	21
3	IMPLEMENTACIÓN CIRCUITAL DE MÁQUINA DE INDUCCIÓN BIFÁSICA EN ATP EN MODELS	24
3.1	Introducción	24
3.2	Historia de ATP-EMTP	24
3.3	Licencia	25
3.4	INTERFAZ DE ATPDRAW	25
3.5	MODELS-TACS	26
3.5.1	MODELS	26
3.5.2	TACS	26
3.6	Parámetros de la Máquina de Inducción Bifásica	27
3.7	Programación en MODELS	30
3.8	Implementación circuital con el modelo VBR de la máquina de inducción bifásica simétrico en ATPDraw	33

3.9	Implementación circuital con el modelo VBR de la máquina de inducción bifásica asimétrico en ATPDraw	34
3.10	Simulación mediante ATPDraw de una máquina de inducción bifásica con modelo VBR, simétrico	35
3.10.1	Par Eléctrico T_e de la máquina de inducción bifásica con modelo VBR, simétrico	35
3.10.2	Velocidad angular ω_m de la máquina de inducción bifásica con modelo VBR, simétrico	36
3.10.3	Corrientes del estator (i_a, i_b) en la Máquina de Inducción bifásica con modelo VBR, simétrico	37
3.10.4	Enlaces de flujo F_{ry}, F_{ry} de la Máquina de Inducción bifásica con VBR, simétrico	38
3.11	Simulación en ATPDraw de una máquina de inducción bifásica con modelo VBR, asimétrica	39
3.11.1	Par Eléctrico T_e de la Máquina de Inducción bifásica con modelo VBR, asimétrica	39
3.11.2	Velocidad angular ω_m de la máquina de inducción bifásica con modelo VBR asimétrica	39
3.11.3	Corrientes del estator (i_a, i_b) en la Máquina de Inducción bifásica con modelo VBR, asimétrica	40
3.11.4	Enlaces de de flujo (F_{rx}, F_{ry}) de la Máquina de Inducción bifásica con modelo VBR, asimétrica	41
3.12	Simulación de la máquina de inducción bifásica con el modelo VBR simétrico en Simulink	42
3.13	Simulación de la máquina de inducción bifásica con VBR asimétrica en simulink	43
4	ANÁLISIS DE RESULTADOS	44
4.1	Comparación y análisis entre ATPDraw y Simulink de la máquina de inducción monofásica simétrica con VBR	44
4.1.1	Comparación y análisis entre ATPDraw y Simulink de la velocidad angular ω_m	44
4.1.2	Comparación y análisis entre ATPDraw y Simulink del par eléctrico T_e	45
4.1.3	Comparación y análisis entre ATPDraw y Simulink de las corrientes i_a y i_b	46
4.2	Comparación y análisis entre ATPDraw y Simulink de la máquina de inducción monofásica asimétrica con VBR	48

ÍNDICE

viii

4.2.1	Comparación y análisis entre ATPDraw y Simulink de la velocidad angular ω_m	49
4.2.2	Comparación y análisis entre ATPDraw y Simulink del par eléctrico T_e	50
4.2.3	Comparación y análisis entre ATPDraw y Simulink de las corrientes i_a y i_b	51
5	Conclusiones y recomendaciones	53
5.0.1	Conclusiones	53
5.0.2	Recomendaciones	54

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1	Rotor y estator de la máquina de inducción bifásica	9
2.2	Máquina de inducción monofásica en estado estacionario	10
2.3	Marco de coordenadas de la máquina de inducción bifásica	17
2.4	Motor de inducción bifásico simétrico con el modelo VBR	20
2.5	Máquina de inducción bifásica asimétrica con el modelo VBR	21
2.6	Máquina de inducción bifásica asimétrica en estado estacionario	22
3.1	Ejemplo utilizando MODELS-TACS en ATPDraw	27
3.2	Implementación circuital con el modelo VBR de la máquina de inducción bifásica simétrico	34
3.3	Implementación circuital del modelo VBR asimétrico de la máquina de inducción bifásica	35
3.4	Par eléctrico T_e	36
3.5	Velocidad angular ω_m	36
3.6	Corriente i_a	37
3.7	Corriente i_b	37
3.8	Enlace de flujo F_{rx}	38
3.9	Enlace de flujo F_{ry}	38
3.10	Par eléctrico T_e	39
3.11	Velocidad angular ω_m	40
3.12	Corriente i_a	40
3.13	Corriente i_b	41
3.14	Enlace de flujo F_{rx}	41
3.15	Enlace de flujo F_{ry}	42
3.16	Máquina de inducción bifásica simétrica con el modelo VBR en simulink	42
3.17	Máquina de inducción bifásica asimétrica con el modelo VBR en simulink	43
4.1	Velocidad angular ω_m del modelo simétrico	45
4.2	Par eléctrico T_e del modelo simétrico	46
4.3	Corriente i_a del modelo simétrico	47
4.4	Corriente i_b del modelo simétrico	48
4.5	Velocidad angular ω_m del modelo asimétrico	49

ÍNDICE DE FIGURAS

	x
4.6 Par eléctrico T_e del modelo asimétrico	50
4.7 Corriente i_a del modelo asimétrico	51
4.8 Corriente i_b del modelo asimétrico	52
5.1 Modelo dinámico de la máquina de inducción bifásica simétrico con VBR en ATPDraw	58
5.2 Modelo dinámico de la máquina de inducción bifásica asimétrico con VBR en ATPDraw	59
5.3 Modelo dinámico de la máquina de inducción bifásica simétrico con VBR en simulink	62
5.4 Modelo dinámico de la máquina de inducción bifásica asimétrico con VBR en simulink	63

Índice de tablas

3.1	Datos de placa de la máquina de inducción bifásica	27
3.2	Parámetros de la máquina de inducción bifásica [1]	28

INTRODUCCIÓN

En este proyecto se desarrolla el estudio de las máquinas de inducción monofásicas, las cuales son de uso común en situaciones donde no se dispone de potencia trifásica. Dado que existen diversos diseños para diferentes aplicaciones, resulta fundamental el modelado en estado dinámico de las máquinas de inducción monofásicas. Comprender su comportamiento a través de diferentes herramientas computacionales permite mejorar su diseño y rendimiento, identificar y corregir posibles problemas, así como asegurar su funcionamiento seguro y eficiente en condiciones reales.

En el Capítulo 1, se presentan los conceptos básicos que resaltan la importancia de la energía eléctrica en el desarrollo tecnológico, haciendo énfasis en la evolución de los motores eléctricos. Se plantea el análisis de un modelo dinámico de una máquina de inducción bifásica utilizando el entorno de ATPDraw, con el objetivo de brindar beneficios a distintos ámbitos de la sociedad. Es crucial resaltar cómo esta contribución beneficiará a diversos sectores sociales que estas máquinas son ampliamente usadas en áreas rurales.

En el Capítulo 2, se desarrolla el modelo matemático de una máquina de inducción monofásica asimétrica en estado dinámico. Este modelo se fundamenta en la transformación de las coordenadas naturales (a, b) a coordenadas de vectores espaciales \vec{x}_1, \vec{x}_2 referidos al sistema de referencia del estator. Esto permite obtener el modelo VBR (Voltaje Behind Reactance) que se incluirá en la simulación mediante ATPDraw de la máquina de inducción monofásica asimétrica.

En el Capítulo 3, introduce la simulación utilizando ATPDraw y se implementa el modelo circuital en máquinas de inducción monofásicas, simétricas y asimétricas. Durante este proceso, se utilizan las funciones proporcionadas por ATP, como los módulos (TACS) y el lenguaje de modelado (MODELS), para integrar en el modelo VBR en el entorno de simulación. Finalmente, se realiza la simulación en Simulink del mismo modelo, con el fin de realizar el respectivo análisis.

En el Capítulo 4 se analizan y comparan las características de la máquina de inducción monofásica con modelo simétrico y asimétrico, tanto en régimen permanente como transitorio. Se emplea el modelo circuital implementado en el entorno de simulación ATPDraw con modelo VBR. Posteriormente, se valida este mismo modelo de máquina en Simulink con el modelo VBR, verificando las variables medidas ω_m , T_e , i_a y i_b .

CAPITULO 1

MOTOR DE INDUCCIÓN BIFÁSICA

1.1 Antecedentes

La energía eléctrica es de vital importancia en la actualidad, debido a que su accesibilidad beneficia en gran medida los avances y logros de la ingeniería en nuestra sociedad. Sin embargo, es necesario seguir desarrollando nuevas tecnologías para su implementación en diferentes áreas, tanto en el hogar como en el trabajo [2]. La invención del motor eléctrico por Michael Faraday en 1821, fue un hito importante en el desarrollo de las máquinas eléctricas [3]. Desde entonces, se han realizado mejoras tecnológicas que han aumentado su eficiencia y potencia en campos como la generación de energía, la industria y el transporte [4]. Es fundamental contar con fuentes de energía sostenibles y que estas sean utilizadas eficientemente. En este sentido, los motores eléctricos representan un consumo significativo, alcanzando entre el 60 y el 65% de la energía generada. Por otro parte, los motores monofásicos de potencia fraccional, menores a 1 HP, utilizados en gran cantidad de aplicaciones, consumen aproximadamente entre el 12 y el 20% de la energía [2]. Para mejorar la eficiencia y reducir el consumo de esta energía, es necesario realizar, investigar e innovar en el campo [2]. Esto permitirá encontrar soluciones más eficientes que contribuirán a un uso más responsable de los recursos energéticos [5].

El motor de inducción ha tenido un impacto significativo en el desarrollo de la industria eléctrica, porque ha establecido la posición dominante de los sistemas de corriente alterna polifásicos [6]. Aproximadamente el 95% de la electricidad generada en la actualidad se produce mediante corriente alterna, lo que resalta la importancia del motor de inducción en este esquema. Aunque su invención no puede atribuirse a una sola persona, Nikola Tesla fue una figura clave en su desarrollo al comprender conceptos cruciales [7]. Nacido en 1888, el motor de inducción ha experimentado una asombrosa evolución a lo largo de la historia. Actualmente, un motor de 100 CV

ocupa el mismo espacio que una máquina de 7,5 CV en 1897, lo que representa un impresionante avance en ingeniería. Los inventos de Tesla han cambiado el rumbo de la historia. Él experimentó con la atracción magnética de un imán sobre un trozo de metal y con el movimiento de un campo magnético al aumentar la corriente en una bobina mientras disminuía en una bobina adyacente. Este conocimiento lo llevó a solicitar patentes en octubre de 1887, y en mayo de 1888 se le otorgaron varias de ellas. Posteriormente, presentó una ponencia ante el Instituto Americano de Ingenieros Eléctricos (AIEE), en la cual detalló tres variantes de este innovador invento. Cada una de ellas incluía un estatur bobinado en anillo con cuatro polos salientes. En la primera configuración, el rotor también tenía 4 polos salientes, generando así un motor de reluctancia que no se iniciaba por sí solo, sino que operaba a velocidad síncrona. La segunda versión presentaba un rotor bobinado, creando un motor de inducción que arrancaba y funcionaba a una velocidad ligeramente inferior a la síncrona. Mientras que la tercera forma daba lugar a la obtención de un verdadero motor síncrono, suministrando corriente continua al bobinado del rotor [8]. Después de esta presentación, George Westinghouse adquirió de inmediato las patentes de Tesla y lo contrató para su desarrollo [9]. Las máquinas eléctricas aparecieron aproximadamente en el siglo XIX y, en la actualidad, continúan siendo objeto de investigación e innovación constante. Varios investigadores e inventores lograron mejorar la eficacia y eficiencia del fenómeno de la energía electromagnética [4].

En el año 1927, en Estados Unidos, se llevó a cabo la producción en serie de motores monofásicos con el fin de satisfacer la demanda y los requisitos de los ferrocarriles en el país. Estos avances presentaron novedades como el incremento de su capacidad, reducción del peso y tamaño, manteniendo la misma potencia. Para las velocidades periféricas, es decir, la distancia recorrida por segundo en la periferia de la rueda, se desarrollaron motores monofásicos de 16 a 23 ciclos. Gracias a estos avances, se lograron obtener motores de mayor capacidad, como los motores de 25 ciclos, que cumplían con altas potencias por eje a altas velocidades. Cabe destacar que estos motores fueron desarrollados y construidos por la empresa Westinghouse Electric y Manufacturing Co, que ha estado activa desde la década de 1930 [10].

Es importante reconocer la labor de los diseñadores y fabricantes de Alemania, Suiza y Suecia, quienes contribuyeron a mejorar y aplicar funcionalidades como los rodillos de rodamiento en los motores para el uso en locomotoras [10].

En Ecuador, actualmente el uso de la tecnología y la ciencia impulsa una de las principales riquezas de la sociedad, siendo fundamental para el desarrollo económico y social. La energía eléctrica juega un papel crucial en el progreso de los individ-

uos [11]. En las zonas rurales, los motores de potencia inferiores a 2 HP, son ampliamente utilizados en diversas aplicaciones, como electrodomésticos y producción agrícola. La necesidad de estos motores monofásicos se debe a la falta de instalaciones de suministro de energía trifásica por parte de las empresas distribuidoras, que suelen ofrecer principalmente una conexión bifásica. Una de las características de los motores monofásicos es que su corriente nominal puede ser hasta 10 veces mayor en comparación con los motores trifásicos, donde la corriente nominal puede ser hasta 6 veces mayor. Sin embargo, es importante tener en cuenta que el arranque de estos motores puede generar un hueco de tensión en la red eléctrica, lo cual puede llegar a afectar a otros dispositivos conectados [12].

Para mejorar la eficiencia de los motores son importantes algunos aspectos como los materiales magnéticos que son utilizados para su diseño, para la reducción de las pérdidas es necesario conocer las propiedades y características de los materiales que son utilizados en núcleo del motor en diferentes condiciones arbitrarias y de flujo magnético rotativo [13]. En el presente se utiliza métodos, como la simulación por computadora para el diseño y análisis de los motores [14]. También existen nuevos desarrollos para el control de estas máquinas para la optimización de su funcionamiento: control de voltaje proporcional al par, control de frecuencia para reducir corrientes de arranque y control combinado de frecuencia y voltaje para arranques a par y flujo constante [15].

La ingeniería eléctrica es un campo en constante evolución y desarrollo, especialmente en lo que respecta a la investigación y la implementación de nuevas tecnologías. En el ámbito de la electricidad, es fundamental contar con herramientas y métodos que permitan simular y estudiar el comportamiento de los sistemas eléctricos para validar modelos y diseños [16]. El ATP-EMTP, también conocido como Alternative Transients Program, es una herramienta especializada que permite simular y estudiar el comportamiento de diversos sistemas eléctricos de potencia [17]. Esta herramienta es particularmente útil para validar modelos y diseños de elementos de sistemas eléctricos en diferentes aplicaciones específicas [18].

A través del modelo desarrollado en el entorno gráfico ATPDraw, se puede estudiar el comportamiento transitorio y en régimen permanente de la máquina en diversas condiciones operativas y perturbaciones [19]. Además, es posible explorar nuevas técnicas de control avanzado con el objetivo de mejorar la estabilidad y la eficiencia de la máquina [20].

1.2 Justificación

Con este proyecto, se busca implementar un modelo de una máquina de inducción que represente las características y parámetros del motor. La modelación dinámica de máquinas de inducción monofásicas es un área de gran importancia en la ingeniería eléctrica y de potencia. Estas máquinas son ampliamente utilizadas en una variedad de aplicaciones industriales y comerciales debido a su eficiencia y simplicidad de diseño. Sin embargo, su comportamiento dinámico puede ser complejo y difícil de predecir, especialmente bajo condiciones de carga variable y perturbaciones en la red eléctrica.

El programa ATP-EMTP y su entorno gráfico ATPDraw se han consolidado como una herramienta que permite la simulación y análisis de sistemas eléctricos de potencia. Su capacidad para modelar con precisión la dinámica de los componentes de la red eléctrica lo convierte en una opción ideal para investigar el comportamiento de las máquinas de inducción monofásicas en condiciones dinámicas.

En este proyecto, se utilizará ATP-Draw para desarrollar un modelo detallado y preciso de la máquina de inducción monofásica. Este modelo permitirá estudiar y analizar su comportamiento en diferentes escenarios, tanto en condiciones transitorias como de régimen permanente. Además, se podrán explorar técnicas avanzadas de control con el objetivo de mejorar sus características operativas.

El ATP-EMTP permite representar con precisión el comportamiento transitorio de las máquinas de inducción monofásicas, teniendo en cuenta fenómenos tales como la respuesta a perturbaciones eléctricas, acoplamientos electromagnéticos, la saturación del núcleo y los efectos de carga.

La justificación de este proyecto radica en la importancia de predecir el comportamiento dinámico de las máquinas de inducción monofásicas. Al implementar un modelo preciso utilizando ATPDraw, se obtiene información valiosa para evaluar su comportamiento en situaciones reales y explorar estrategias de control que permitan optimizar su funcionamiento.

1.3 Grupo Objetivo

Esta investigación posee un potencial significativo para beneficiar a diversos sectores, como la comunidad educativa y el sector eléctrico industrial, así como a estudiantes de ingeniería y proveedores de herramientas de simulación. Su objetivo principal es proporcionar un modelo dinámico de máquinas de inducción monofásicas y facilitar su implementación en el entorno de ATP-Draw. Este enfoque permitirá a los estudiantes de ingeniería adquirir un conocimiento más detallado sobre el funcionamiento de estas máquinas, mientras que los proveedores de herramientas de simulación podrán mejorar y expandir sus productos para satisfacer las necesidades de la comunidad educativa y del sector eléctrico industrial.

En el ámbito de la ingeniería y la industria eléctrica, existen profesionales que podrían obtener beneficios significativos al utilizar el modelo dinámico desarrollado para el análisis de sistemas eléctricos que involucran máquinas bifásicas. Esta investigación abre nuevas posibilidades al permitir la toma de decisiones informadas, el diseño preciso y la optimización de sistemas eléctricos en diversos sectores industriales. La implementación de este modelo dinámico proporciona una base sólida para abordar desafíos y mejorar la eficiencia en la industria eléctrica, lo que resulta en un impacto positivo en la productividad y el rendimiento de estos sistemas.

1.4 Objetivos

1.5 Objetivo General

Desarrollar un modelo dinámico de máquinas de inducción monofásica asimétricas con la herramienta ATP-EMTP, en el entorno ATPDraw.

1.6 Objetivos Específicos

- Desarrollar el modelo matemático de la máquina de inducción monofásica en vectores espaciales referidos al estator y determinar un circuito equivalente de

reactancia detrás de la fuerza electromotriz.

- Implementar el modelo en el entorno ATPDraw utilizando elementos circuitales y programación MODELS.
- Validar el modelo desarrollado de la máquina de inducción utilizando otros modelos que se presentan en la literatura.

CAPITULO 2

MÁQUINA DE INDUCCIÓN BIFÁSICA

La máquina de inducción consta de dos devanados del estator, al tener diferentes en las resistencias y también diferentes reactancias, es decir que los numero de vueltas del devanado estator son diferentes, se observa en la siguiente Figura 2.1.

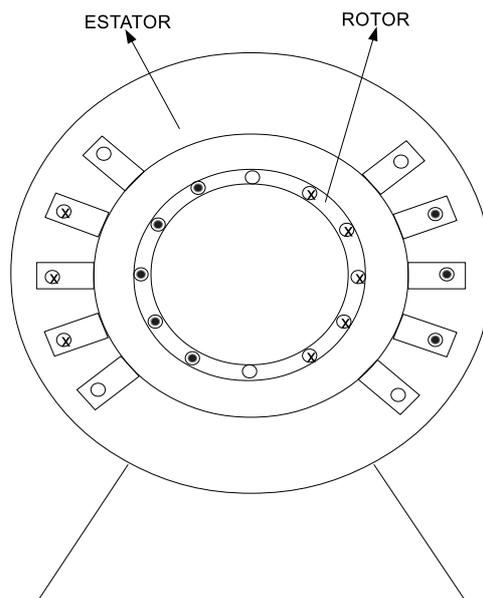


Figura 2.1: Rotor y estator de la máquina de inducción bifásica

La máquina de inducción bifásica se alimenta de dos fases con la misma tensión monofásica y cuenta con un bobinado de arranque. Los devanados del estator presentan diferencias en las resistencias y reactancias de fuga, así como en el número de vueltas. Esto se puede observar en la Figura 2.2a. En la Figura 2.2b, se muestra cómo la máquina de inducción bifásica se alimenta de tensiones desequilibradas.

Una solución consiste en implementar un nuevo sistema equivalente basado en un sistema existente, donde la máquina tiene un devanado del estator simétrico [4], que puede ser alimentada con tensión desequilibrada.

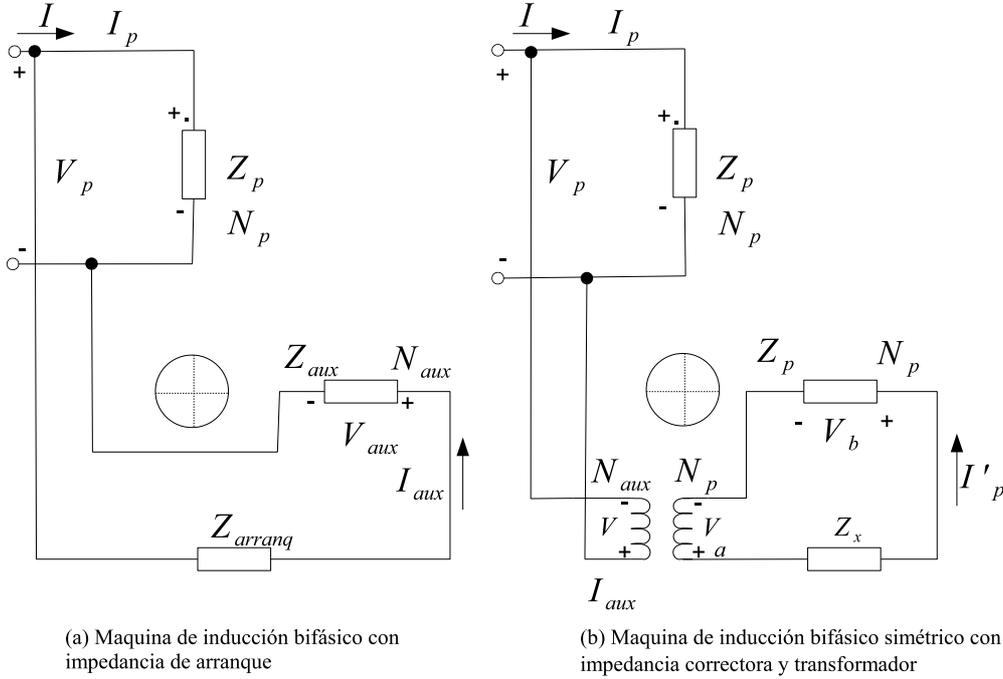


Figura 2.2: Máquina de inducción monofásica en estado estacionario

Es importante considerar que $Z = Z_{arranq}$ y Z_{aux} representan exclusivamente las resistencias de fuga de los dos bobinados del estator, sabido que $a \neq 1$.

Para solución de equilibrio, la máquina se construye las bobina separadas a 90° , y se diferencia en el número de vueltas de bobina auxiliar que se obtiene tomando en consideración de un transformador que tiene una relación N_{aux} a N_p . Las resistencias e impedancias están conectadas en serie con el devanado auxiliar con una representación de una impedancia Z_x realizando su balance en el modelo [4].

Para equilibrar la fuerza electromotriz de la bobina auxiliar, la máquina debe cumplir la siguiente condición (2.1).

$$\frac{I'_{aux}}{I_{aux}} = \frac{N_{aux}}{N_p} = \frac{1}{a} \quad (2.1)$$

La impedancia de entrada debe ser constante antes y después para equilibrar la

máquina.

$$Z_x = a^2(z_{arranq} + z_{aux}) - Z_p \quad (2.2)$$

2.1 Análisis del modelo de la máquina de inducción bifásica en coordenadas naturales

La máquina de inducción bifásica en coordenadas naturales describe el comportamiento dinámico en términos de las corrientes y voltajes en el marco de referencia del rotor.

El modelo dinámico de una máquina bifásica que describe su comportamiento en condiciones transitorias y permanentes considera la presencia de perturbaciones en diversas situaciones, como al poner en marcha la máquina o al cambiar la carga [21]. Este modelo se fundamenta en un conjunto de ecuaciones diferenciales que representan las relaciones entre las variables eléctricas y mecánicas de la máquina. [4].

El modelo en su totalidad se caracteriza por un número variable de fases tanto en el estator como en el rotor. Mientras que las bobinas del rotor permanecen en cortocircuito, se aplica un sistema que permite equilibrar las tensiones según las fases correspondientes. Las ecuaciones que describen este comportamiento se expresan de la siguiente forma (2.3),

$$[v] = [R] [i] + \rho [\lambda] = [R] [i] + [L(\theta)] \rho [i] + \dot{\theta} [\tau(\theta)] [i] \quad (2.3)$$

El modelo de la máquina de inducción bifásica, expresado en coordenadas natural, se parte de la siguiente ecuación (2.4),

$$\begin{bmatrix} v_{ae} \\ v_{be} \\ v_{ar} \\ v_{br} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_e \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \end{bmatrix} R_r \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} + \dots$$

$$\dots + p \left\{ \left[\begin{array}{cc} L_e \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} & L_m \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \\ L_m \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} & L_r \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \end{array} \right] \cdot \begin{bmatrix} i_{ae} \\ i_{be} \\ i_{ar} \\ i_{br} \end{bmatrix} \right\} \quad (2.4)$$

Para p utilizando las propiedades derivativas,

$$\cos(\theta) = \frac{d}{d\theta} - \sin(\theta), \sin(\theta) = \frac{d}{d\theta} \cos(\theta) \quad (2.5)$$

$$\begin{bmatrix} v_{ae} \\ v_{be} \\ v_{ar} \\ v_{br} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_e \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \\ R_r \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \end{bmatrix} + \dots$$

$$\dots + p \left\{ \left[\begin{array}{cc} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} & L_m \begin{bmatrix} -\sin(\theta) & -\cos(\theta) \\ \cos(\theta) & -\sin(\theta) \end{bmatrix} \\ L_m \begin{bmatrix} -\sin(\theta) & \cos(\theta) \\ -\cos(\theta) & -\sin(\theta) \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \end{array} \right] \cdot \begin{bmatrix} i_{ae} \\ i_{be} \\ i_{ar} \\ i_{br} \end{bmatrix} \right\} \quad (2.6)$$

por lo tanto, la ecuación del par eléctrico (2.8) es,

$$T_e - T_m = \frac{1}{2} [i]^t [\tau] [i] - T_m = j\ddot{\theta} + \rho\dot{\theta} \quad (2.7)$$

$$T_e = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} i_{ae} & i_{be} & i_{ar} & i_{br} \end{bmatrix} \dots$$

$$\dots p \left\{ \left[\begin{array}{cc} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} & L_m \begin{bmatrix} -\sin(\theta) & -\cos(\theta) \\ \cos(\theta) & -\sin(\theta) \end{bmatrix} \\ L_m \begin{bmatrix} -\sin(\theta) & \cos(\theta) \\ -\cos(\theta) & -\sin(\theta) \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \end{array} \right] \cdot \begin{bmatrix} i_{ae} \\ i_{be} \\ i_{ar} \\ i_{br} \end{bmatrix} \right\} \quad (2.8)$$

La matriz del par eléctrico (2.8) es simétrica, es decir, se puede expresar con la matriz de autovectores. matriz de vectores propios (2.9) es,

$$M = \begin{bmatrix} a & -b \\ b & a \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

la matriz de los autovectores se determinó su determinante, y su vez es multiplicado por la matriz identidad (2.10),

$$\det \left(\begin{bmatrix} a & -b \\ b & a \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \right) = \begin{bmatrix} a - \lambda & -b \\ b & a - \lambda \end{bmatrix} = \{[(a - \lambda)(a - \lambda)] - [(b)(-b)]\} \quad (2.10)$$

realizado la descomposición y el ordenamiento algebraico obtenemos,

$$a^2 - a\lambda - a\lambda + \lambda^2 + b^2 = \lambda^2 - 2a\lambda + a^2 + b^2 \quad (2.11)$$

se determina las respectivas raíces de la ecuación del polinomio de la ecuación (2.11),

$$\lambda_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} = \frac{-(-2a\lambda) \pm \sqrt{(-2a\lambda)^2 - 4(1)(a^2 + b^2)}}{2(1)} \quad (2.12)$$

$$\lambda_{1,2} = \frac{(2a\lambda) \pm \sqrt{4a^2 - 4a^2 - 4b^2}}{2} = a \pm jb \quad (2.13)$$

$$\lambda_1 = a + jb, \lambda_2 = a - jb \quad (2.14)$$

se despeja la ecuación (2.14) se obtiene,

$$\lambda_1 = \begin{bmatrix} -jb & -b \\ b & -jb \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} k_{11} \\ k_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, k_{11} = jk_{12} \quad (2.15)$$

analizar los términos de la ecuación (2.14) se halla la siguiente transformación,

$$\lambda_2 = \begin{bmatrix} jb & -b \\ b & jb \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} k_{11} \\ k_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}, k_{21} = jk_{22} \quad (2.16)$$

$$[T] = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ -k_{11} & k_{12} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

a partir de la transformación de la ecuación (2.17) es importante invertir la matriz, obteniendo la siguiente expresión (2.18),

$$\det \left(\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ -k_{11} & k_{12} \end{bmatrix} \right) \neq 0 \Rightarrow 2jk_{11}k_{12} \neq 0 \Rightarrow k_{11} \neq 0, k_{12} \neq 0 \quad (2.18)$$

la ecuación (2.19) define la transformación conservadora en potencia,

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ -jk_{11} & jk_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_{11} & jk_{11} \\ k_{12} & -jk_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, k_{11} = k_{12} = \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (2.19)$$

los componentes simétricos de máquina de inducción bifásica se define como,

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -j & j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

también, se define el componente simétrico inverso en la ecuación (2.21),

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & j \\ 1 & -j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

Dentro de las componentes simétricas obtenidas, es posible definir la secuencia positiva y negativa. Se introduce la expresión $\sqrt{2}$, en las transformaciones de corriente o voltaje, con el fin de conservar la potencia. Esta expresión se considera una de las secuencias definida en la siguiente expresión (2.22),

$$\vec{x}_+ = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{2}} \{ \vec{x}_a(t) + j\vec{x}_b(t) \} = \vec{x}_a(t) + j\vec{x}_b(t) \quad (2.22)$$

utilizando la ecuación (2.20) se puede expresar las componentes simétricas bifásicas

de la siguiente manera,

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -j & j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

donde \vec{v}_a y \vec{v}_e es,

$$v_a = \frac{1}{\sqrt{2}} (v_x - v_y) \quad (2.24)$$

$$v_e = \frac{1}{\sqrt{2}} (v_a - jv_b) \quad (2.25)$$

usando las ecuaciones (2.24) (2.25) se define el siguiente término,

$$v_x + jv_y = \frac{1}{\sqrt{2}}v_a + j\frac{1}{\sqrt{2}}v_b \quad (2.26)$$

se despeja (2.26), obtenemos la parte real (2.27) y la parte imaginaria (2.28) expresadas en vectores espaciales, estas ecuaciones serán utilizadas en la programación correspondiente,

$$\Re(\vec{v}_e) = \vec{v}_x = \frac{1}{\sqrt{2}}\vec{v}_a \quad (2.27)$$

$$\Re(j\vec{v}_e) = \vec{v}_y = \frac{1}{\sqrt{2}}\vec{v}_b \quad (2.28)$$

encontramos \vec{v}_a y \vec{v}_b ,

$$\vec{v}_a = \sqrt{2}\vec{v}_x \quad (2.29)$$

$$\vec{v}_b = \sqrt{2}\vec{v}_y \quad (2.30)$$

2.2 Análisis del modelo de la máquina de inducción bifásica simétrica referido al estator

La transformación a vectores espaciales para el modelo dinámico de la máquina de inducción bifásica se expresa como (2.31),

$$\begin{bmatrix} \vec{v}_e \\ \vec{v}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_e & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{i}_e \\ \vec{i}_r \end{bmatrix} + p \left\{ \begin{bmatrix} L_e & L_m e^{j\theta} \\ L_m e^{-j\theta} & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{i}_e \\ \vec{i}_r \end{bmatrix} \right\} \dots$$

$$\dots = [R] \left[\begin{matrix} \vec{i} \end{matrix} \right] + p \left[\begin{matrix} \vec{\lambda} \end{matrix} \right] \quad (2.31)$$

donde el par (2.32) que es igual a,

$$T_e = \frac{1}{2} \left[\begin{matrix} \vec{i} \end{matrix} \right]^t \left[\begin{matrix} 0 & j\dot{\theta}L_m e^{j\theta} \\ -j\dot{\theta}L_m e^{-j\theta} & 0 \end{matrix} \right] \left[\begin{matrix} \vec{i} \end{matrix} \right] = L_m \left\{ \vec{i}_e \left(\vec{i}_r e^{j\theta} \right) \right\} \quad (2.32)$$

Se deduce los vectores espaciales en las ecuaciones (2.31) y (2.32).

$$\vec{x}_e = x_{as}(t) + jx_{bs}(t), \vec{x}_r = x_{ar}(t) + jx_{br}(t), \forall x \in \{v, i, \lambda\} \quad (2.33)$$

Los parámetros de modelo de máquina de inducción monofásica son:

- R_e Resistencia del estator
- R_r Resistencia del rotor
- L_e Inductancia del estator
- L_r Inductancia del rotor
- L_m Inductancia de magnetización
- \vec{v}_e Voltaje del estator
- \vec{v}_r Voltaje del rotor referido al estator
- \vec{i}_e Corriente del estator
- \vec{i}_r Corriente del rotor referida al estator
- $\vec{\lambda}_e$ Enlace de flujo del estator
- $\vec{\lambda}_r$ Enlace de flujo del rotor referido al estator

2.3 Análisis del modelo de la máquina de inducción bifásica simétrica en sistema de coordenadas del estator

En la máquina de inducción bifásica, el rotor se sincroniza con los ejes de referencia del estator, lo cual se logra mediante una transformación representada en la Figura 2.3b. Esta transformación se explica a través de la ecuación 2.34.

$$\vec{x}_r^e = e^{j\theta} \vec{x}_r = x_{dr} + jx_{qr} \quad (2.34)$$

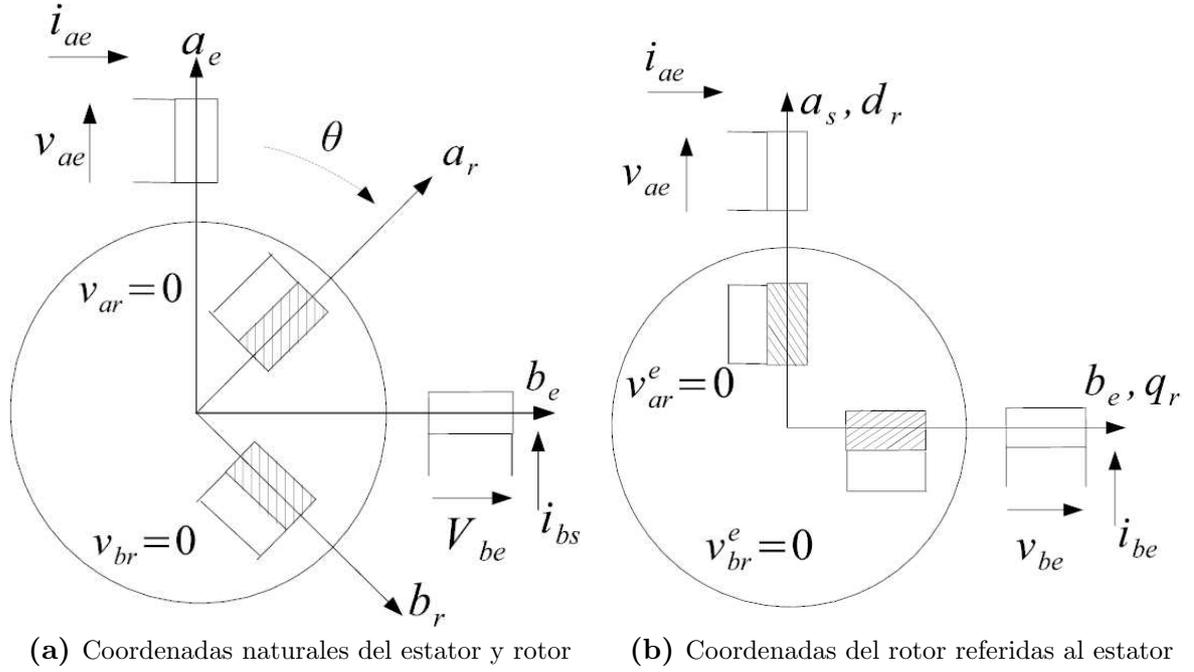


Figura 2.3: Marco de coordenadas de la máquina de inducción bifásica

Para llegar al modelo que describe la máquina de inducción bifásica simétrica en vectores espaciales referida al estator, se utilizó la ecuación (2.34) para llegar en la siguiente expresión (2.35).

$$\begin{bmatrix} \vec{v}_e^{\rightarrow} \\ \vec{v}_r^{\leftarrow} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_e & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{i}_e^{\rightarrow} \\ \vec{i}_r^{\leftarrow} \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} L_e & L_m \\ L_m & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{i}_e^{\rightarrow} \\ \vec{i}_r^{\leftarrow} \end{bmatrix} - j\dot{\theta} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ L_m & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{i}_e^{\rightarrow} \\ \vec{i}_r^{\leftarrow} \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

2.4 Análisis de modelo VBR de máquina de inducción bifásico simétrico

El modelo VRB (Voltaje detrás de la reactancia) facilita la integración de circuitos del modelo de la máquina con otros elementos en sistemas de potencia y electrónica de potencia dentro de diferentes software de simulación. Este modelo emplea las ecuaciones del estator en estado estacionario de referencia, considerando los estados de flujo del rotor y la corriente del estator en forma de vectores espaciales.

$$\begin{bmatrix} \vec{v}_e^{\rightarrow} \\ \vec{v}_r^{\leftarrow} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_e & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{i}_e^{\rightarrow} \\ \vec{i}_r^{\leftarrow} \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} \vec{\lambda}_e^{\rightarrow} \\ \vec{\lambda}_r^{\leftarrow} \end{bmatrix} - j\dot{\theta} \begin{bmatrix} \vec{\lambda}_e^{\rightarrow} \\ \vec{\lambda}_r^{\leftarrow} \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

Partiendo del modelo de máquina de inducción bifásica simétrica en vectores espaciales referidos al estator, como se presenta en la ecuación (2.36), podemos deducir los enlaces de flujo del estator y del rotor de la siguiente manera,

$$\begin{bmatrix} \vec{\lambda}_e \\ \vec{\lambda}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_e & L_m \\ L_m & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{i}_e \\ \vec{i}_r \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

empleando la ecuación (2.37) se puede obtener el enlace de flujo referido al estator (2.38),

$$\vec{\lambda}_r = L_m \vec{i}_e + L_r \vec{i}_r \quad (2.38)$$

despejando el término λ_r^e , obtenido la corriente referida al estator (2.39) y remplazando llegamos a la siguiente expresión (2.42) del enlace de flujo referida al estator,

$$\vec{i}_r = \frac{1}{L_r} \left(\vec{\lambda}_r - L_m \vec{i}_e \right) \quad (2.39)$$

donde $j\dot{\theta} = j\omega$ es la velocidad mecánica, en *rad/s* y demás considerando $\vec{v}_e = 0$,

$$0 = R_r \vec{i}_r + p \vec{\lambda}_r - j\omega \vec{\lambda}_r \quad (2.40)$$

$$p \vec{\lambda}_r = -R_r \vec{i}_r + j\omega \vec{\lambda}_r \quad (2.41)$$

$$p \vec{\lambda}_r = -\frac{R_r}{L_r} \left(\frac{\vec{\lambda}_r - L_m \vec{i}_e}{L_r} \right) + j\omega \vec{\lambda}_r \quad (2.42)$$

a partir de la ecuación (2.36) se puede encontrar \vec{v}_e ,

$$\vec{v}_e = R_r \vec{i}_e + p L_e \vec{i}_e + p L_m \vec{i}_r \quad (2.43)$$

utilizando (2.39) se obtiene,

$$\vec{v}_e = R_r \vec{i}_e + p L_e \vec{i}_e + L_m p \left\{ \frac{1}{L_r} \left(\vec{\lambda}_r - L_m \vec{i}_e \right) \right\} \quad (2.44)$$

remplazando la ecuación (2.42) en (2.44),

$$\vec{v}_s = R_r \vec{i}_e + p L_e \vec{i}_e + L_m p \left\{ \frac{1}{L_r} \left[\left(-R_r \vec{i}_r + j\omega \vec{\lambda}_r \right) - L_m \vec{i}_e \right] \right\} \quad (2.45)$$

adecuamos y factorizamos las ecuaciones, obtenemos la siguiente expresión (2.46),

$$\vec{v}_e = R_r \vec{i}_e + pL_e \vec{i}_e + L_m p \left\{ \frac{1}{L_r} - R_r \left[\frac{1}{L_r} \left(\vec{\lambda}_r^e - L_m \vec{i}_e \right) \right] + j\omega \vec{i}_r^e - L_m \vec{i}_e \right\} \quad (2.46)$$

la ecuación (2.47) representa el modelo de la máquina de inducción bifásica \vec{V}_s . En esta ecuación, el primer término representa R_{eq} , el segundo término es L_{eq} y el último término define la tensión detrás de la reactancia,

$$\vec{v}_e = \left(R_e + R_r \frac{L_m^2}{L_e^2} \right) \vec{i}_e + p \left(L_e - \frac{L_m}{L_r} \right) \vec{i}_e + \frac{L_m}{L_e} \left(j\omega - \frac{R_r}{L_r} \right) \vec{\lambda}_r^e \quad (2.47)$$

El par eléctrico se realiza el producto cruz entre el enlace de flujo del estator y la corriente del estator, utilizando y reemplazando el enlace de flujo del estator (2.39).

$$T_e = \vec{\lambda}_e \times \vec{i}_e = \left(L_e \vec{i}_e + L_m \vec{i}_r^e \right) \times \vec{i}_e \quad (2.48)$$

finalmente, el par eléctrico de la máquina de inducción bifásica queda expresado de la siguiente manera (2.49),

$$T_e = 2L_m \left(\frac{\vec{\lambda}_r^e - L_m \vec{i}_e}{L_r} \right) \times \vec{i}_e = 2 \frac{L_m}{L_r} \vec{\lambda}_r^e \times \vec{i}_e \quad (2.49)$$

El modelo del circuito motor bifásico, que se muestra en la Figura 2.4, representa el modelo simétrico en estado estacionario en VBR, acompañado de las ecuaciones correspondientes que ya han sido determinadas.

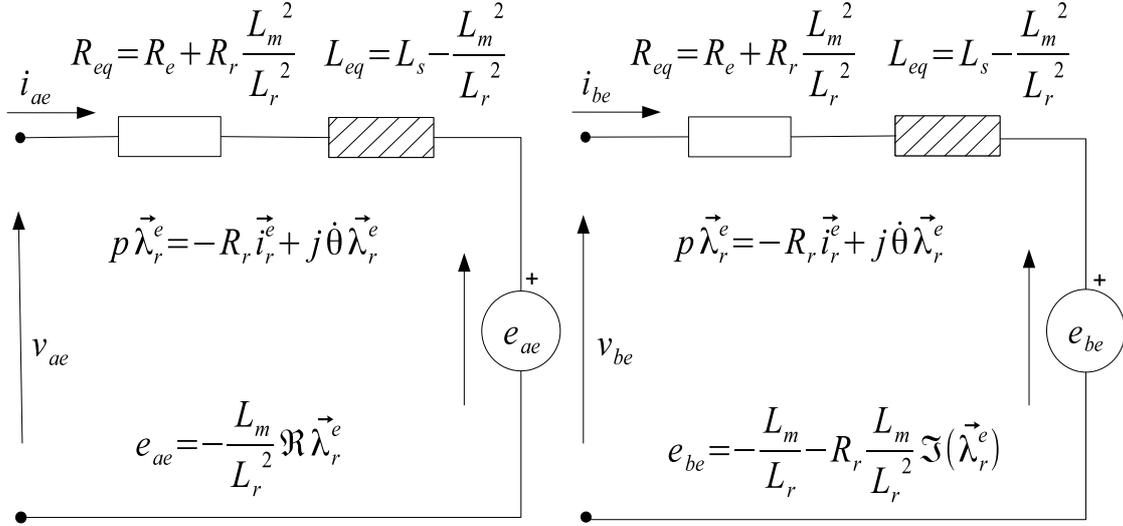


Figura 2.4: Motor de inducción bifásico simétrico con el modelo VBR

El modelo de la máquina de inducción bifásica asimétrica requiere la incorporación del modelo VBR, se observa en la siguiente Figura 2.5, considerando la resistencia, la inductancia correctiva y también la capacitancia que se implementa en el modelo. Además, en este tipo de motores se utiliza un condensador de arranque que se desconecta cuando la velocidad alcanza el 75% de la velocidad sincrónica a través de un interruptor centrífugo.

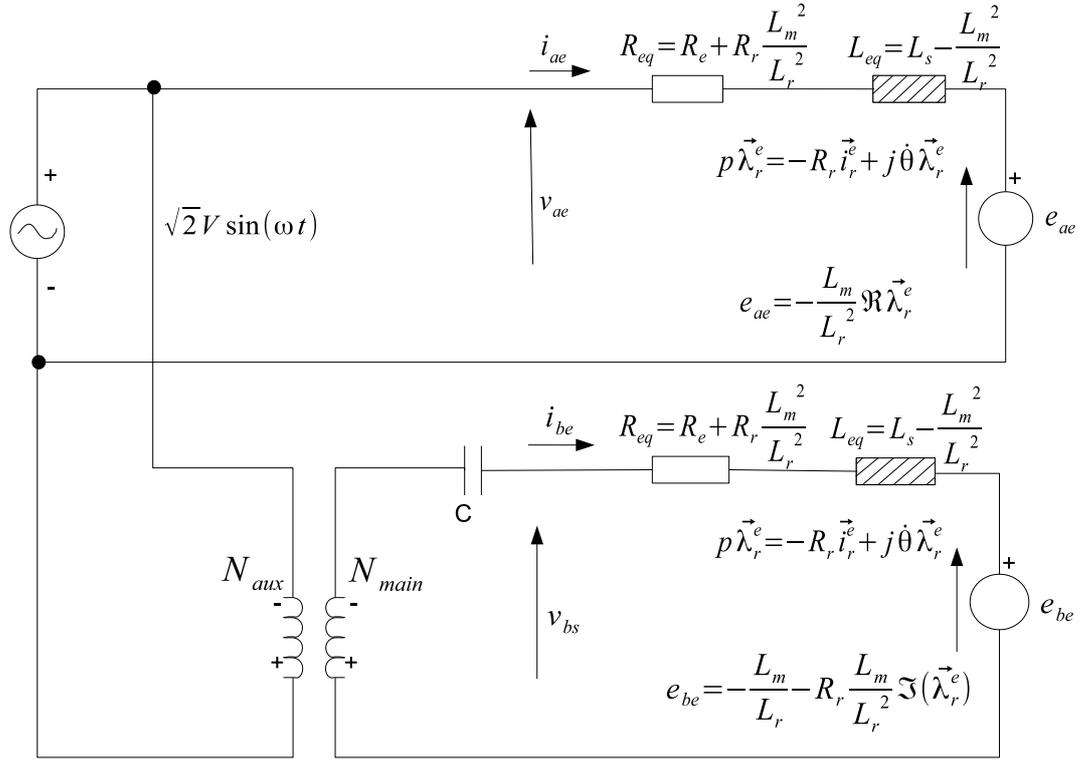


Figura 2.5: Máquina de inducción bifásica asimétrica con el modelo VBR

2.5 Análisis en régimen permanente de la máquina de inducción bifásica

En la máquina monofásica en régimen permanente, es posible representar los acoplamientos utilizando matrices cíclicas. Estas matrices se aplican mediante el método modal para determinar la transformación de componentes simétricos, cuya demostración se encuentra en la ecuación (2.20).

Partiendo de la demostración de transformaciones de secuencia simétrica, directa e inversa [4].

$$\begin{bmatrix} X_+ \\ X_- \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & j \\ 1 & -j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -j & j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_+ \\ X_- \end{bmatrix} \quad (2.50)$$

Para analizar el circuito equivalente de un motor bifásico con condensador de arranque, es necesario tener en cuenta las componentes simétricas. En este sentido,

podemos obtener la siguiente ecuación (2.51) considerando la definición de Z_x que se encuentra definido en la ecuación (2.2).

$$\begin{bmatrix} \frac{1+j\alpha}{\sqrt{2}} V \\ \frac{1-j\alpha}{\sqrt{2}} V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (Z_+ + \frac{Z_x}{2}) & -\frac{Z_x}{2} \\ -\frac{Z_x}{2} & (Z_- + \frac{Z_x}{2}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_+ \\ I_- \end{bmatrix} \quad (2.51)$$

donde,

$$Z_+ = R_e + X_{l_e} + Z_m \parallel (jX_{lr} + \frac{R_r}{s}) \quad (2.52)$$

$$Z_- = R_e + Z_{l_e} + Z_m \parallel (jX_{lr} + \frac{R_r}{2-s}) \quad (2.53)$$

Este sistema representa el circuito equivalente, donde impedancias de secuencia positiva y negativa z_+ y z_- representan la secuencia negativa y positiva de las ecuaciones (2.52) y (2.53).

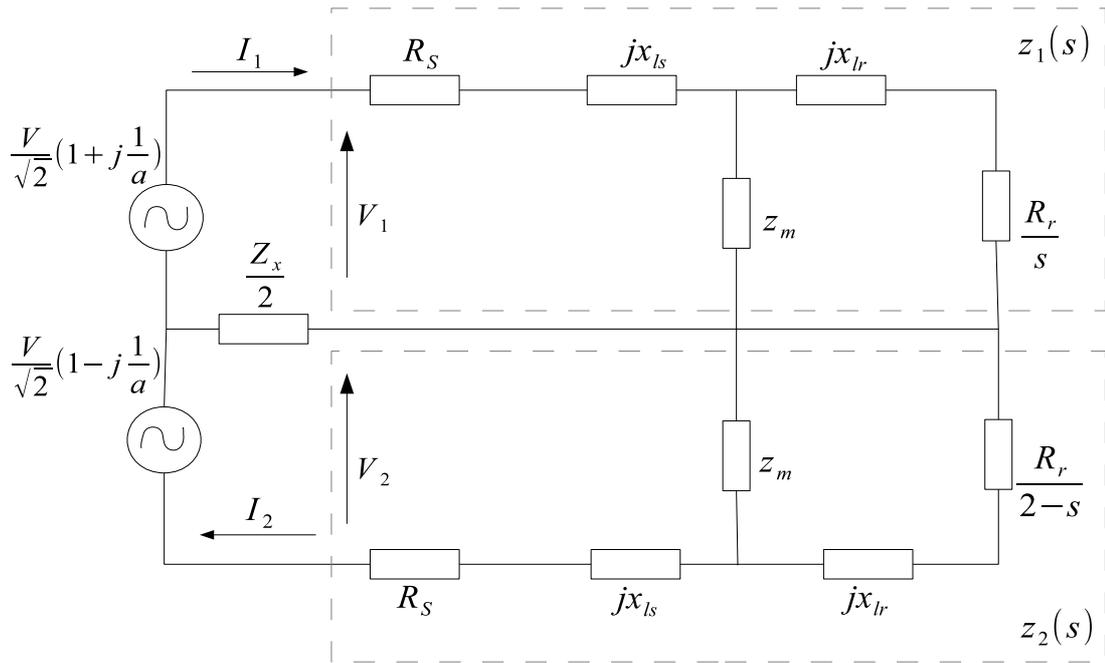


Figura 2.6: Máquina de inducción bifásica asimétrica en estado estacionario

La ecuación (2.51) describe de forma analítica la máquina de inducción bifásica, considerando la impedancia de fuga del devanado principal, la resistencia del rotor y las impedancias de fuga referidas al devanado principal. Estos parámetros se pueden observar en la Figura 2.6.

En el presente apartado, se abordará la relación existente entre la tensión de los devanados del motor, representada como V , y las corrientes de dichos devanados, denominadas I_p y I_{aux} . Además, se analizará cómo se puede representar la corriente de secuencia negativa y positiva utilizando las corrientes de los devanados, según la ecuación 2.54.

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & j \\ 1 & -j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_p \\ I'_{aux} \end{bmatrix} \quad (2.54)$$

la corriente de secuencia negativa conduce a,

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & j \\ 1 & -j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_p \\ aI_{aux} \end{bmatrix} \quad (2.55)$$

el voltaje de secuencia negativa del estator de una máquina de inducción bifásica simétrica, como se puede observar en la Figura 2.2 b, se representa como,

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & j \\ 1 & -j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_p \\ V_b \end{bmatrix} \quad (2.56)$$

donde $V_p = V$ y la segunda fase se refiere a V_b ,

$$V_b = \frac{V}{a} - Z_x I'_{aux} \quad (2.57)$$

entonces se define,

$$\begin{bmatrix} \vec{I}_1 \\ \vec{I}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & j \\ 1 & -j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_P \\ aI_{aux} \end{bmatrix} \quad (2.58)$$

la corriente en términos de componentes simétricas puede expresarse de la siguiente manera (2.59),

$$\begin{bmatrix} I_P \\ I'_{aux} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -j & j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_+ \\ I_- \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} \vec{I}_1 + \vec{I}_2 \\ -j\vec{I}_1 + j\vec{I}_2 \end{bmatrix} \quad (2.59)$$

CAPITULO 3

IMPLEMENTACIÓN CIRCUITAL DE MÁQUINA DE INDUCCIÓN BIFÁSICA EN ATP EN MODELS

3.1 Introducción

ATPDraw es una herramienta gráfica controlada por ratón diseñada específicamente para la versión ATP del Programa de Transitorios Electromagnéticos (EMTP) en la plataforma MS-Windows. Mediante ATPDraw, los usuarios pueden construir circuitos eléctricos de manera intuitiva seleccionando componentes de los menús disponibles utilizando el ratón [22]. De manera automática, ATPDraw genera el archivo de entrada ATP en el formato adecuado a partir de la interfaz gráfica [23].

3.2 Historia de ATP-EMTP

El programa ATP fue desarrollado en los años 70, cuando un grupo de investigadores empezó a desarrollar una herramienta para simular transitorios electromagnéticos. El desarrollo inicial del ATP-EMTP se llevó a cabo en la Bonneville Power Administration (BPA), en Estados Unidos. En 1968 se publicó la primera versión del programa, conocido como Electromagnetic Transients Programme (EMTP), centrado principalmente en el análisis de sistemas de transmisión de energía y transitorios asociados.

Durante las décadas de 1970 y 1980, el programa siguió desarrollándose y ampliando sus capacidades. En 1984, se creó un grupo internacional de investigadores y programadores, el “ATP Users Group”, para mantener y mejorar el software. En 1987, se introdujo una versión del ATP (Alternative Transients Programme) que

aportaba una serie de mejoras y funciones adicionales. Entre ellas, la inclusión de modelos de máquinas eléctricas más avanzados, la capacidad de modelar fenómenos en estado estacionario y la inclusión de interfaces gráficas de usuario (GUI) más intuitivas. La implementación de nuevos modelos

Desde entonces, ATP-EMTP ha seguido evolucionando y se ha convertido en una herramienta fundamental para el análisis y el diseño de sistemas eléctricos y electromagnéticos. Se utiliza ampliamente en la industria eléctrica, en la investigación académica y en el desarrollo de nuevas tecnologías. Algunas de las aplicaciones más importantes del ATP-EMTP son:

- Análisis de transitorios electromagnéticos en sistemas de transmisión y distribución de energía
- Diseño y evaluación de dispositivos electrónicos de potencia
- modelización de fallas y cortocircuitos en redes eléctricas
- Determinación de armónicos
- Diseño de máquinas eléctricas

3.3 Licencia

La política de licencias de ATP-EMTP tiene como objetivo promover el uso del software en la comunidad académica y de investigación y proporcionar a los usuarios cualificados acceso gratuito a esta herramienta avanzada, manteniendo al mismo tiempo un modelo de licencia comercial para uso corporativo [23].

3.4 INTERFAZ DE ATPDRAW

El menú principal de ATPDraw. ATPDraw utiliza una interfaz fácil de usar que facilita la introducción de datos. ATPDraw dispone de herramientas para calcular parámetros de líneas y cables de transmisión, máquinas eléctricas, transformadores, etc. Permite analizar estudios y elaborar diagramas para las variables deseadas.

3.5 MODELS-TACS

3.5.1 MODELS

En la Figura 3.1, se puede visualizar la estructura de models aplicado a un circuito. MODELS es un lenguaje de programación similar a Pascal o Python. Permite cálculos más complejos porque tiene acceso a una gama más amplia de estructuras de control, como las sentencias for, while e if. Además, MODELS puede trabajar con un mayor número de variables de implementación, como timex o timesteep. Otra ventaja de MODELS es que permite acceder a más información que TACS. El lenguaje admite el uso de matrices, arrays y operadores lógicos, lo que lo hace más flexible. Los modelos creados en MODELS constan de tres componentes principales: instrucciones, instrucciones de simulación y procedimientos operativos, que proporcionan una estructura más robusta y detallada en comparación con otros lenguajes de modelado [23].

3.5.2 TACS

TACS(Transients analysis of control system) es un subprograma de ATP que nos permite la simulación digital. Los TACS se utilizan como meta-datos asociados a los distintos elementos del diagrama. Cada TACS consta de un nombre y, en su caso, de un valor. Desde un punto de vista técnico, las etiquetas se almacenan en la representación interna del diagrama, que suele basarse en formato XML o JSON. Una vez cargado el diagrama en ATPDraw, la aplicación procesa esta estructura de datos y expone las anotaciones a través de la API programática y la interfaz de usuario.

En la Figura 3.1, se puede visualizar un ejemplo de circuito en ATPDraw aplicando componentes que pueden ser controlados mediante Tacs-Models. Este es un modelo híbrido donde se encuentra un TACSSOUR que permite que las señales TACS se puedan conectar directamente a la entrada de un Models. La salida del Models nos permite enviar de vuelta a Tacs que a través del componente TMODVAR que se encuentra en las fuentes de Tacs.

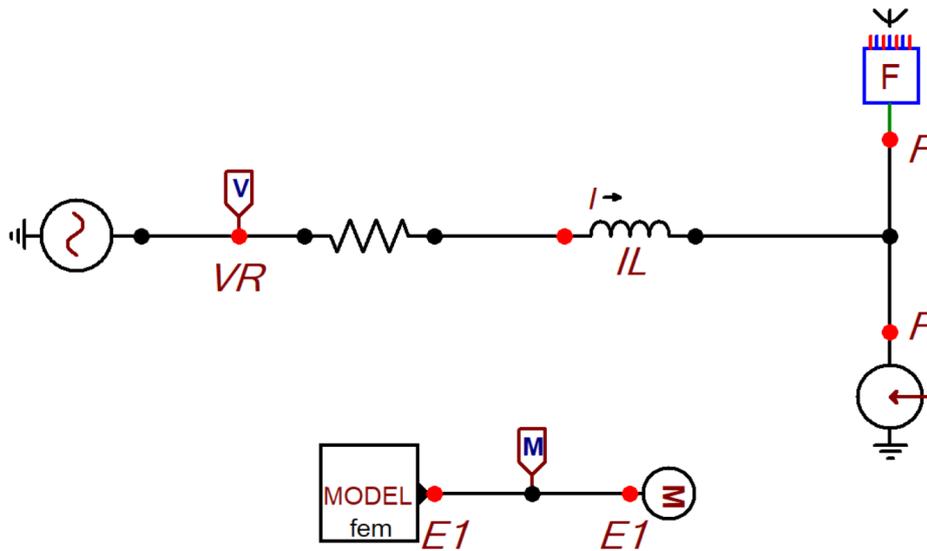


Figura 3.1: Ejemplo utilizando MODELS-TACS en ATPDraw

3.6 Parámetros de la Máquina de Inducción Bifásica

Para la implementación de la máquina de inducción bifásica, se utilizaron los parámetros obtenidos del artículo previamente citado, el cual fue extraído de IEEE y proveniente de la Universidad de Colorado [1]. En este proceso, la compañía Baldor proporcionó datos de diseño de placa que se encuentran considerables en la placa del motor, se observa en la tabla 3.1.

Tabla 3.1: Datos de placa de la máquina de inducción bifásica

Baldor Industrial Motor—Single Phase		
Cat. no. L1233T	Ser F780	Hp 2
Spec. 35 G22-2208	Frame 145 T	ph1
Volts 115/208-230	rpm 1725	Hz 60
Amps 24/12	ser. f. 1.15	class B
full load eff 73%	code G	des. L
rating 40°C amb.	cont	

Tabla 3.2: Parámetros de la máquina de inducción bifásica [1]

Parámetros		
P_n	2	HP
V_n	115	V
f	60	Hz
p	2	Pares de polos
R_e	0.42	Ω
R_r	0.29	Ω
L_e	1.5384	mH
L_r	2.4934	mH
L_m	36.34	mH
J	0.042	kgm^2
K	0	Newtons
C	780	μF
Transformador	99.71/115	V
Z_x	1.9857-j6.0144	Ω
$C_{correctivo}$	441	μF

Cálculo de parámetros y valores base para el modelo de la máquina de inducción bifásica,

Cálculo de la potencia base para el modelo de la máquina de inducción bifásica,

$$S_B = 2 hp \times 746 W = 1492 W \quad (3.1)$$

Cálculo del voltaje base para el modelo de la máquina de inducción bifásica,

$$V_B = 115 V \quad (3.2)$$

Cálculo de la corriente base para el modelo de la máquina de inducción bifásica,

$$Z_B = \frac{V_B^2}{S_B} = \frac{(115)^2}{1492} = 8.86 \Omega \quad (3.3)$$

Cálculo de la inercia del sistema para el modelo de la máquina de inducción bifásica,

$$J = \frac{\frac{1}{2} (1492)^2 (2)}{\left(\frac{377}{2}\right)^2} = 0.042 \text{ Kg/m}^2 \quad (3.4)$$

Para el cálculo de la impedancia en el modelo asimétrico de la máquina de inducción bifásica, se utiliza la ecuación (2.2), para determinar y corregir la asimetría de la máquina. Se añade una impedancia en serie Z_x que considera la resistencia e inductancia de fuga de los devanados del estator.

$$Z_x = a^2 (Z_{aux} + Z_{arranq}) + Z_p \quad (3.5)$$

Los parámetros de la máquina fueron extraídos del artículo mencionado para llevar a cabo el cálculo pertinente, donde a representa la relación de transformación, R_s la resistencia del secundario y X_p la impedancia principal,

$$a = 1.33 \quad (3.6)$$

$$R_s = 0.42[\Omega] \quad (3.7)$$

$$X_p = 0.58[\Omega] \quad (3.8)$$

A continuación, se reemplaza los valores correspondientes en la ecuación (3.9),

$$X_{aux} = \frac{X_p}{a^2} = \frac{0.58}{(1.33)^2}[\Omega] \quad (3.9)$$

$$X_{aux} = 0.3278[\Omega] \quad (3.10)$$

Determinamos la impedancia de arranque, representada como Z_{arranq} , utilizando la ecuación (3.11), cabe destacar que, según la información proporcionada, la máquina de inducción bifásica utiliza un capacitor de arranque de $780\mu F$ [1].

$$Z_{arranq} = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{377(780 * 10^{-6})} = -j3.40 \quad (3.11)$$

Al sustituir los valores específicos, obtenemos el resultado de la impedancia Z_x ,

$$Z_x = (1.33)^2 (1.36 + j0.3278 - j3.40) - (0.42 + j0.58) \quad (3.12)$$

$$Z_x = 1.9857 - j6.0144 \Omega \quad (3.13)$$

$$C = \frac{1}{(377)(6.0144)} [\mu F] \quad (3.14)$$

Posterior al cálculo de la impedancia Z_x , se determina el valor adecuado del capacitor para el modelo asimétrico de la máquina de inducción bifásica,

$$C = 441 \mu F \quad (3.15)$$

Para constatar el modelo de la máquina de inducción bifásica, se sube los parámetros reportados del artículo [1], en el entorno de ATPDraw. Específicamente, los valores de resistencia del devanado del rotor R_{eq} y L_{eq} y como los parámetros definidos en el bloque de ‘MODELS’ del circuito son ingresados directamente en el esquema. Esto me permite recrear el modelo de la máquina y se procede con las simulaciones correspondientes.

3.7 Programación en MODELS

El entorno de programación MODELS se utiliza para representar las ecuaciones diferenciales que modelan la máquina de inducción. Este módulo comienza inicializando las variables a ingresar, así como las variables de entrada y salida de la máquina que será simulada. En el Algoritmo 3.1, se presenta el código de los parámetros del motor bifásico: resistencia estator R_e , resistencia de rotor, R_r inductancia del estator L_{le} , inductancia del rotor L_{lr} , inductancia mutua M_{sr} , inercia J , coeficiente de fricción k_r y el par de polos p .

En el modelo se definen las variables de entrada tales como las corrientes de

las fases i_a e i_b y el par mecánico T_m . Posteriormente, las variables de salida: la fuerza electromotriz detrás de la reactancia de la fase e_a y e_b , las componentes real e imaginaria del flujo retórico F_{rx} y F_{ry} , el par eléctrico T_e y la velocidad angular del rotor w_m . También se determina las constantes y variables que se utilizan en la determinación algunas constantes utilizadas en las transformaciones de variables mediante el comando CONST. El comando VAR definen las variables del modelo: e_a , e_b , son las fuerzas electromotrices de las fases A y B, F_{rx} , F_{ry} , son las componentes de los enlaces de flujo rotor en coordenadas espaciales, T_e es el par eléctrico, w_m , es la velocidad angular del rotor, i_x e i_y , es la corriente del estator en coordenadas espaciales, pF_{rx} , pF_{ry} , son las derivadas de los flujos, e_x , e_y , son las componentes de las fuerzas electromotrices en coordenadas espaciales, pw_m , es la derivada de la velocidad angular, L_r es la inductancia propia del rotor, y M , es las inductancias mutuas entre el estator y el rotor.

```

MODEL VBR_BI
-- Parametros del motor bifasico
DATA Re {dflt: 0.02},Rr {dflt: 0.06}
DATA Lle {dflt: 3.1},Llr {dflt: 3.0},Msr {dflt: 60.e-3};
DATA J {dflt: 0.163},Kr {dflt:0},p {dflt:2}
-- Entradas
INPUT ia, ib, Tm
-- Salidas
OUTPUT ea,eb,FrxFry,Te,wm
-- constantes
CONST SQR1_2{val: 0.707106781}, SQR2_2{val: 1.414213562}
-- variables
VAR ea,eb,FrxFry,Te,wm,ix,iy,pFrxFry
VAR ex,ey,pwm,Lr,M

```

Listing 3.1: Variables en MODELS

En el algoritmo 3.2, de HISTORY, donde se realiza el almacenamiento de las variables, que deben realizar la derivada e integración de los flujos pF_{rx} , pF_{ry} la velocidad angular pw_m .

```

History
pFrxFry {dflt:0}          -- dv flujos
integral(pFrxFry) {dflt:0}
pFry {dflt:0}
integral(pFry) {dflt:0}
pwm {dflt:0}             -- dv PWM
integral(pwm) {dflt:0}

```

Listing 3.2: Comandos HISTORY de variables en MODELS

En el algoritmo 3.3, se inicializan las variables, para posteriormente comenzar la ejecución del programa, donde son asignados valores a las diferentes variables como: e_a , e_b , wm , pwm , pFr_x , pFr_y , Fr_x y Fr_y , se inicializan con valor 0.

```

INIT
-- Condiciones iniciales
ea:=0
eb:=0
wm:=0
pwm:=0
pFr_x:=0
pFr_y:=0
Fr_x:=0
Fr_y:=0
ENDINIT

```

Listing 3.3: Inicializacion de variables

En el algoritmo 3.4, indica el modelo matemático de la máquina de inducción bifásico, donde se definen las variables necesarias dentro del cálculo del programa como el primer paso conociste en calcular la inductancia total del rotor L_r , M_{rs} y se asigna la inductancia mutua M . También se realizan las transformaciones de las corrientes del estator en referencia a vectores espaciales (a, b) a (x, y) . Posteriormente se calcula las derivadas de los flujos pFr_x y pFr_y , donde se realiza la integración para obtener los flujos Fr_x y Fr_y . Se calcula la fuerza electromotriz (FEM) e_x , e_y , la cual se convierte a coordenadas espaciales e_a y e_b , que son salidas para programar la fuente dependiente del circuito. Finalmente, se calcula el par eléctrico T_e . Cabe destacar que, en este caso, se trabaja en secuencia positiva, por lo que el par se debe multiplicar por 2. Esto se debe a que la potencia se divide a partes iguales entre la secuencia positiva y la negativa, como despreciamos la secuencia negativa tenemos que corregir el par y a su vez se integra la ecuación dinámica para la obtención de la velocidad angular ω_m .

```

EXEC
Lr:=(Llr+Msr)*1e-3  -- Inductacia de rotor.
M := Msr*1e-3      -- Inductacia mutua.

-- Componentes de cordenadas naturales a vectores espaciales
bifasicas.
ix:= SQRT1_2*(ia)
iy:= SQRT1_2*(ib)

-- Derivada del flujos
pFr_x:=-Rr*Fr_x/Lr-p*wm*Fr_y+Rr*M*ix/Lr
pFr_y:=-Rr*Fr_y/Lr+p*wm*Fr_x+Rr*M*iy/Lr

```

```

--Calculo de la integral de flujo del rotor por integracion
Frx:=INTEGRAL(pFrx)
Fry:=INTEGRAL(pFry)

-- Calculo de la fuerza electromotriz en coordenadas vectoriales
espaciales
ex:=-M*Rr*Frx/(Lr**2)-M*p*ωm*Fry/Lr
ey:=-M*Rr*Fry/(Lr**2)+M*p*ωm*Frx/Lr

-- Calculo de vectores espaciales a coordenadas naturales
ea:=SQRT_2*(ex)
eb:=SQRT_2*(ey)

-- Calculo del Par electrico
Te:= 2*p*M*(Frx*iy-Fry*ix)/Lr

-- calculo Pwm
pwm:=(Te-Tm-Kr*ωm)/J

-- Calculo de la velocidad angular
ωm:=INTEGRAL(pwm)
ENDEXEC
ENDMODEL

```

Listing 3.4: Código de ejecución del modelo VBR de la máquina de inducción monofásica en MODELS.

3.8 Implementación circuital con el modelo VBR de la máquina de inducción bifásica simétrico en ATPDraw

En la Figura 3.2, se muestra el circuito equivalente de una máquina bifásica simétrica. La ventaja del modelo VBR consiste en permitir la implementación en programas de simulación de circuitos eléctricos. El modelo realizado permite simular las ecuaciones del estator en coordenadas referidas al estator, teniendo en cuenta la variable de estado de los enlaces de flujo del rotor y las resistencias R_{eq} y L_{eq} , que modelan los parámetros de la máquina referidos al estator. El bloque MODELS contiene los parámetros y características de la máquina bifásica. Los terminales i_a , i_b , F_x , F_y , T_e y ω_m , representan las corrientes del estator, los enlaces de flujo, el par y velocidad angular de la máquina. Esta representación circuital permite modelar, simular y analizar el comportamiento de estas máquinas, sometida a diferentes tipos de fuentes o alimentada mediante puentes inversores.

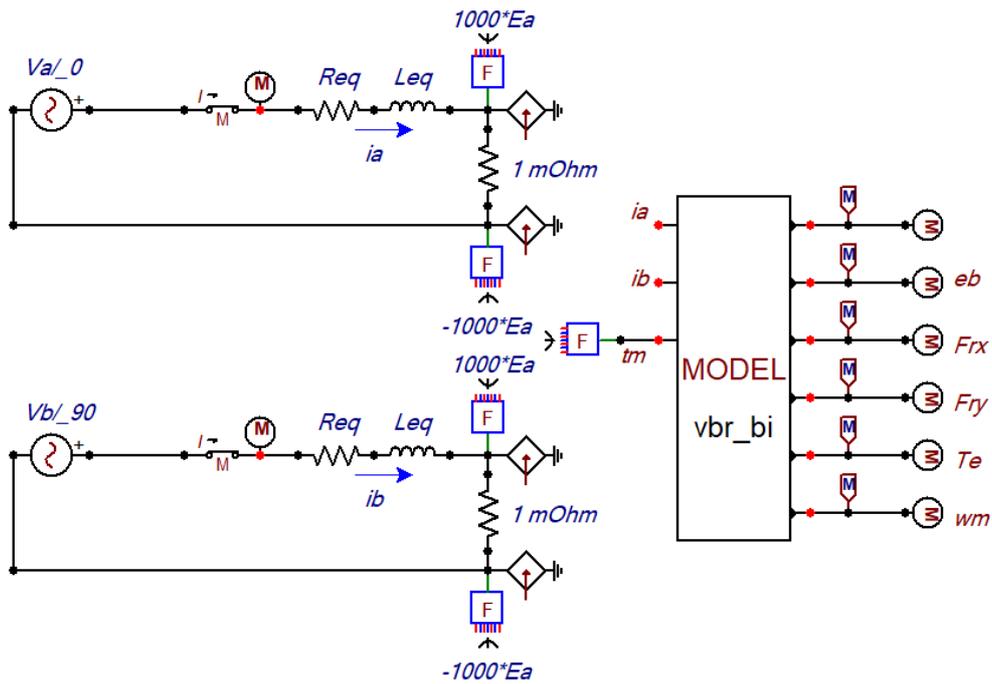


Figura 3.2: Implementación circuital con el modelo VBR de la máquina de inducción bifásica simétrica

3.9 Implementación circuital con el modelo VBR de la máquina de inducción bifásica asimétrico en ATPDraw

En la Figura 3.3, se muestra el circuito de un modelo dinámico bifásico, el cual es similar al modelo de estado estacionario. Se propone este modelo dinámico del motor de inducción asimétrico, desarrollado mediante la técnica VBR, el cual consta de componentes pasivas tales como resistencias e inductancias, conjuntamente con la capacitancia del condensador, como se puede observar.

En los motores de inducción de fase dividida, no se coloca un condensador, pero existen diferencias en las impedancias entre los devanados principal y auxiliar. En el caso de los motores de arranque con condensador, este se puede desconectar cuando la velocidad alcanza alrededor del 75% de la velocidad sincrónica utilizando un interruptor centrífugo para realizar esta desconexión.

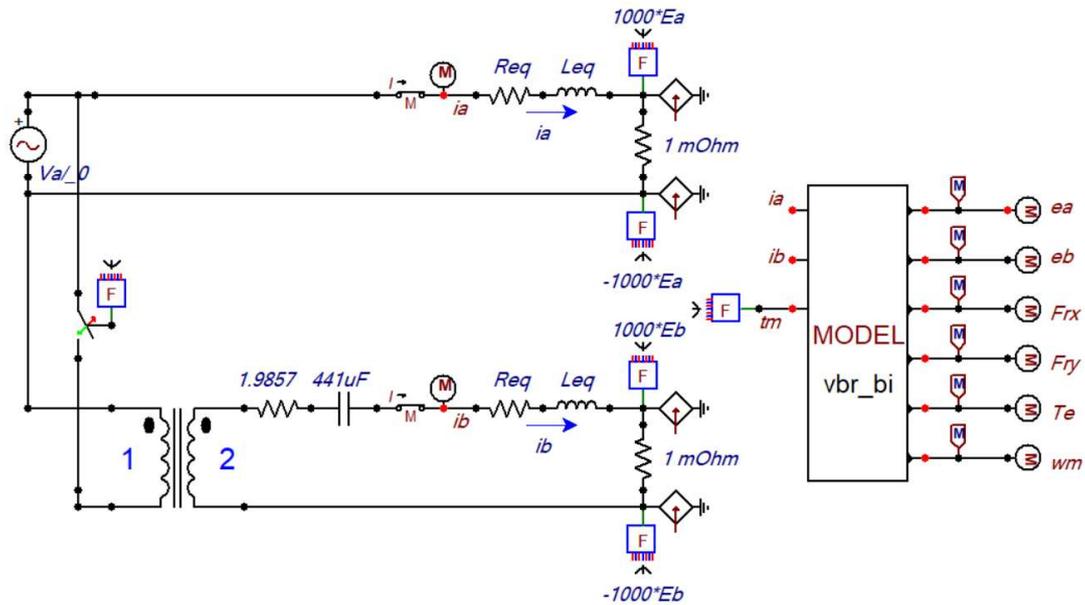


Figura 3.3: Implementación circuital del modelo VBR asimétrico de la máquina de inducción bifásica

3.10 Simulación mediante ATPDraw de una máquina de inducción bifásica con modelo VBR, simétrico

3.10.1 Par Eléctrico T_e de la máquina de inducción bifásica con modelo VBR, simétrico

En la Figura 3.4, se observa el comportamiento del par eléctrico T_e , de la máquina de inducción bifásica equilibrada realizado en ATPDraw durante el tiempo de 0.8 s. Se puede observar el transitorio de energización donde se establece el flujo en el entrehierro de la máquina.

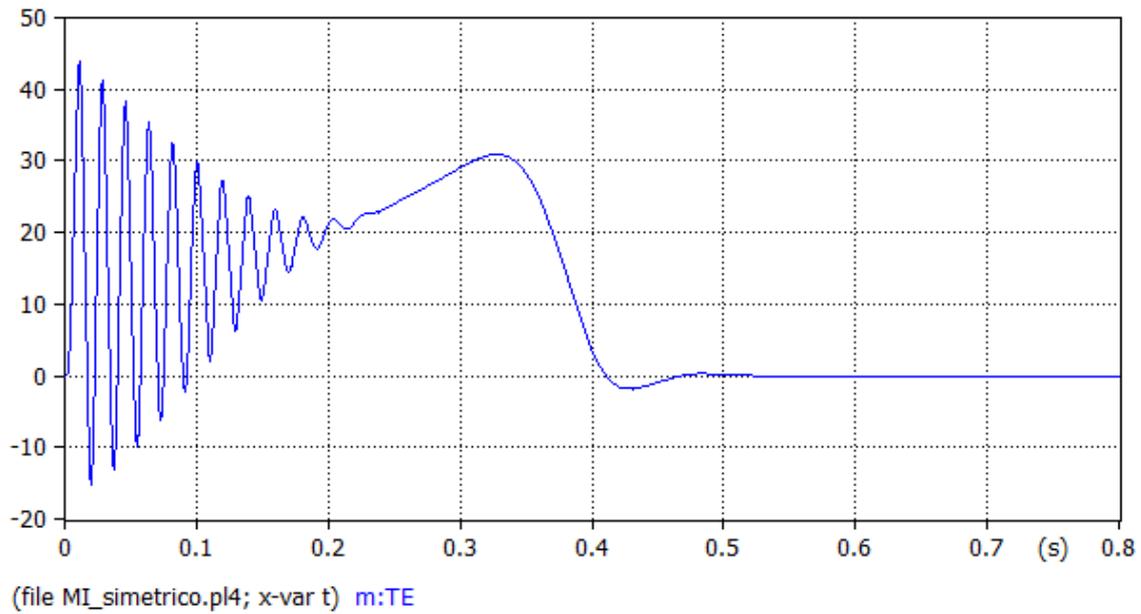


Figura 3.4: Par eléctrico T_e

3.10.2 Velocidad angular ω_m de la máquina de inducción bifásica con modelo VBR, simétrico

En la Figura 3.5, se observa que la velocidad angular ω_m de la máquina bifásica tiende a estabilizarse en un tiempo de 0.45 s.

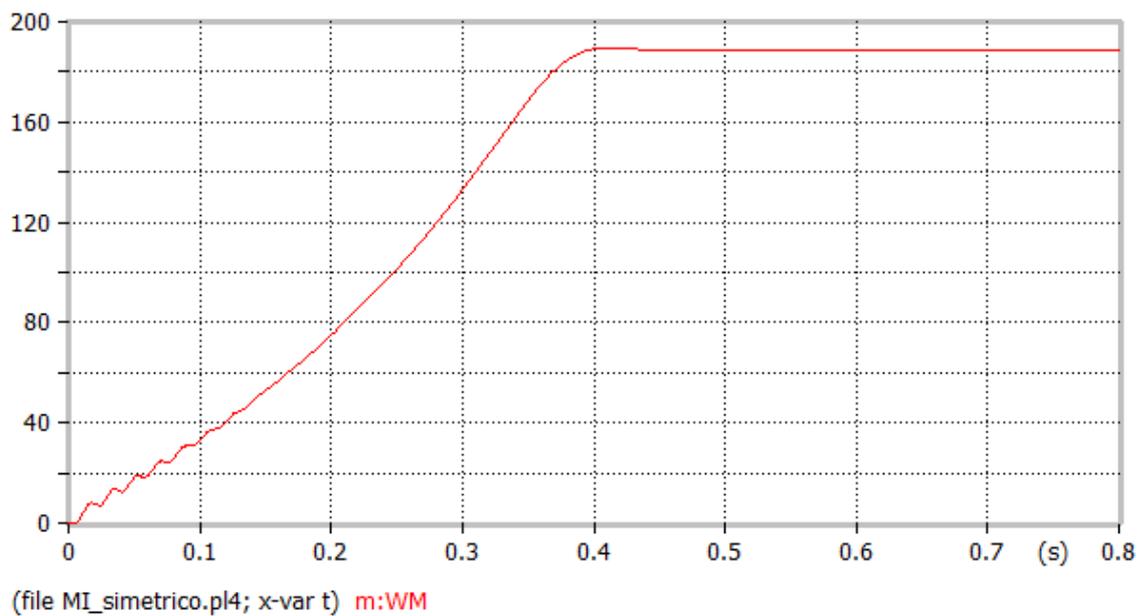


Figura 3.5: Velocidad angular ω_m

3.10.3 Corrientes del estator (i_a, i_b) en la Máquina de Inducción bifásica con modelo VBR, simétrico

En la Fig. 3.6 y 3.7, se observan las corrientes i_a e i_b de la máquina de inducción bifásica. Cada fuente tiene una tensión de 115 voltios y una frecuencia de 60 Hz. En este caso, la fase de la fuente A tiene un ángulo de desfase de 0° , mientras que la fase de la fuente B tiene un ángulo de desfase de 90° .

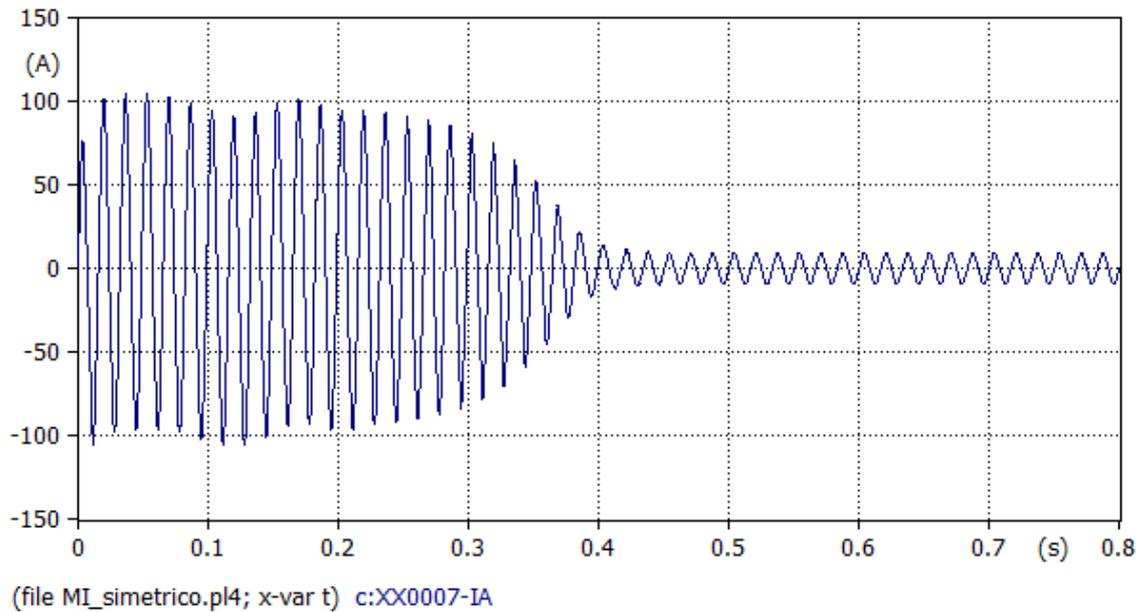


Figura 3.6: Corriente i_a

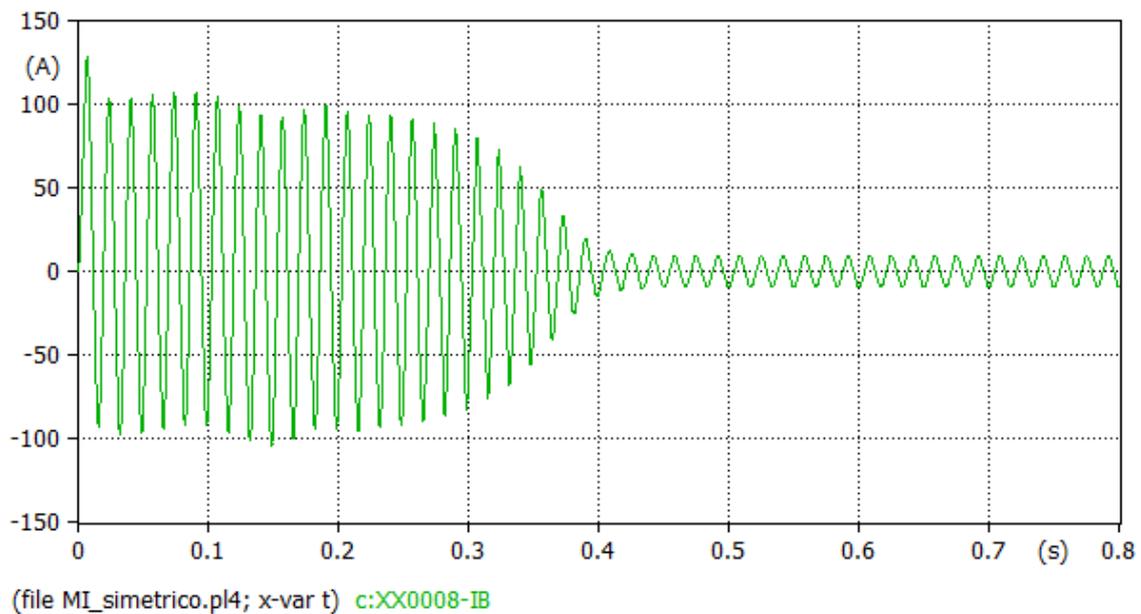


Figura 3.7: Corriente i_b

3.10.4 Enlaces de flujo F_{rx} , F_{ry} de la Máquina de Inducción bifásica con VBR, simétrico

En la Figura 3.8 y 3.9, se observan los enlaces de flujo F_{rx} y F_{ry} , de la máquina de inducción bifásica simétrica en ATPDraw.

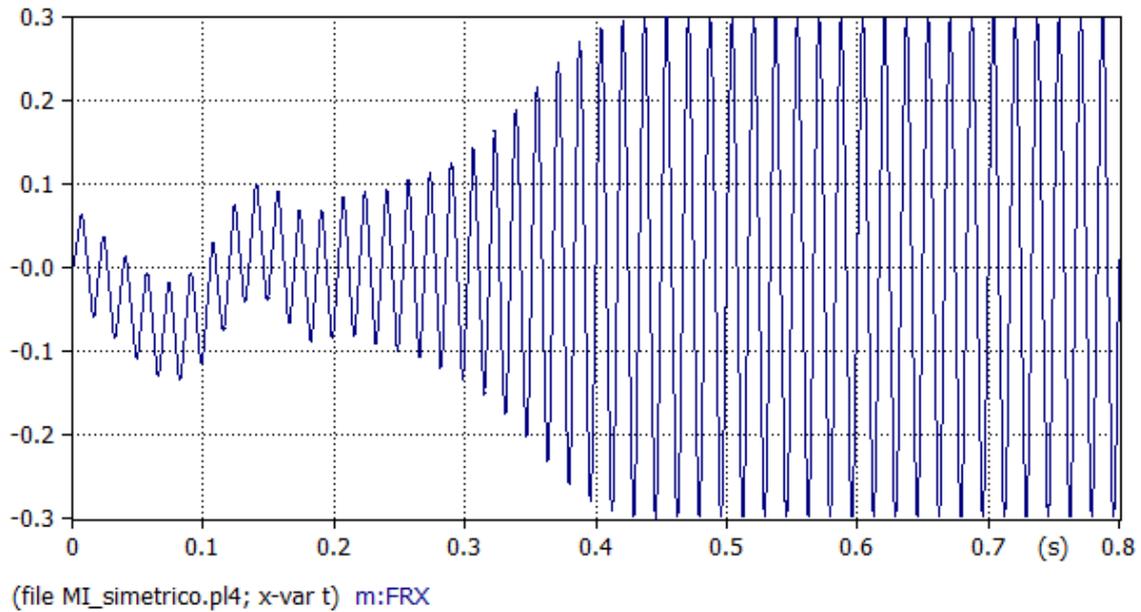


Figura 3.8: Enlace de flujo F_{rx}

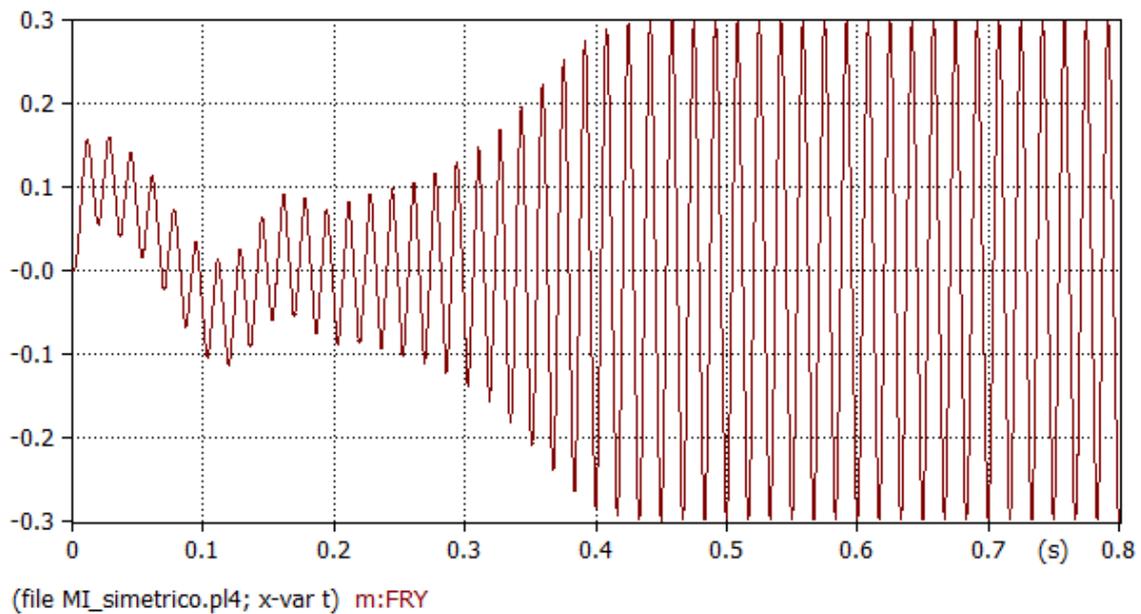


Figura 3.9: Enlace de flujo F_{ry}

3.11 Simulación en ATPDraw de una máquina de inducción bifásica con modelo VBR, asimétrica

3.11.1 Par Eléctrico T_e de la Máquina de Inducción bifásica con modelo VBR, asimétrica

En la Figura 3.10, se representa el par eléctrico T_e de la máquina de inducción bifásica asimétrica con el modelo VBR en ATPDraw.

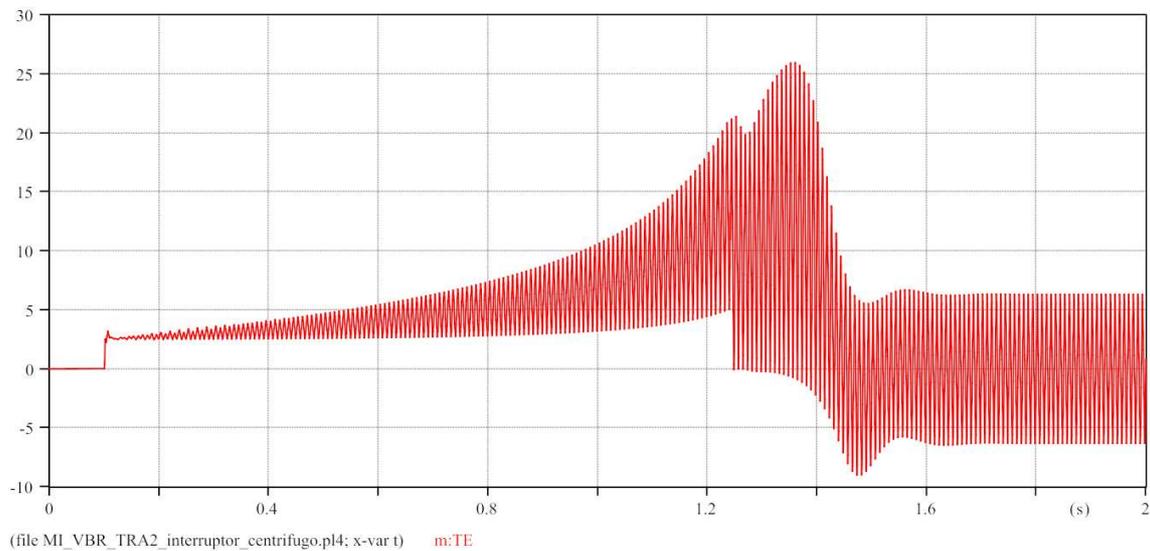


Figura 3.10: Par eléctrico T_e

3.11.2 Velocidad angular ω_m de la máquina de inducción bifásica con modelo VBR asimétrica

En la Figura 3.11, se representa el par eléctrico ω_m de la máquina de inducción bifásica asimétrica con el modelo VBR en ATPDraw.

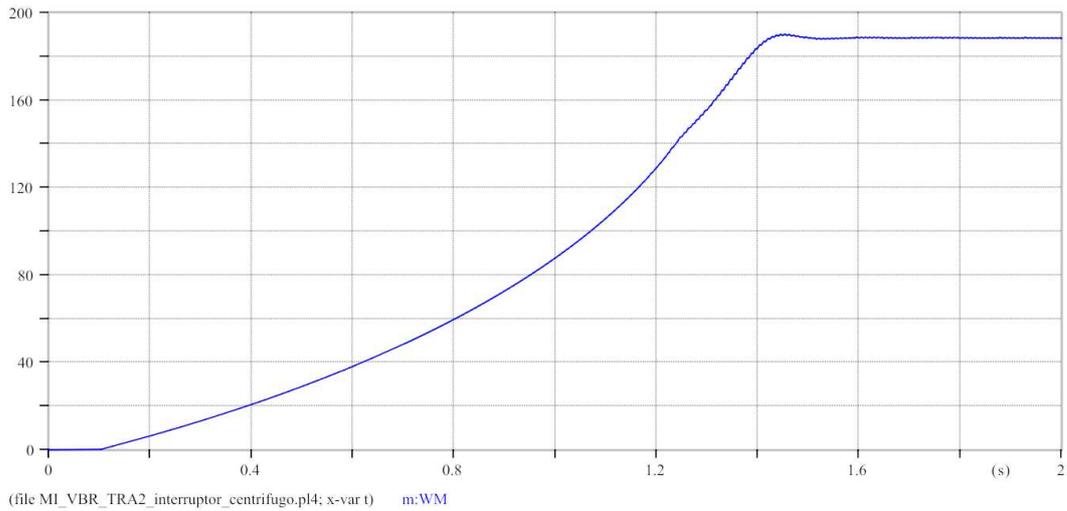


Figura 3.11: Velocidad angular ω_m

3.11.3 Corrientes del estator (i_a, i_b) en la Máquina de Inducción bifásica con modelo VBR, asimétrica

En las Figuras 3.12, 3.13 se representa el par eléctrico i_a, i_b de la máquina de inducción bifásica asimétrica con el modelo VBR en ATPDraw.

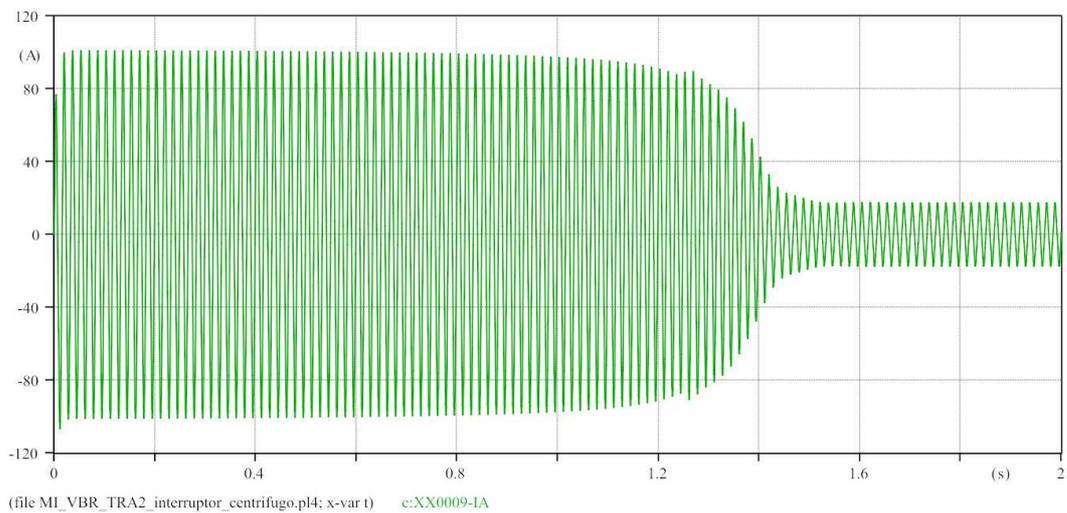


Figura 3.12: Corriente i_a

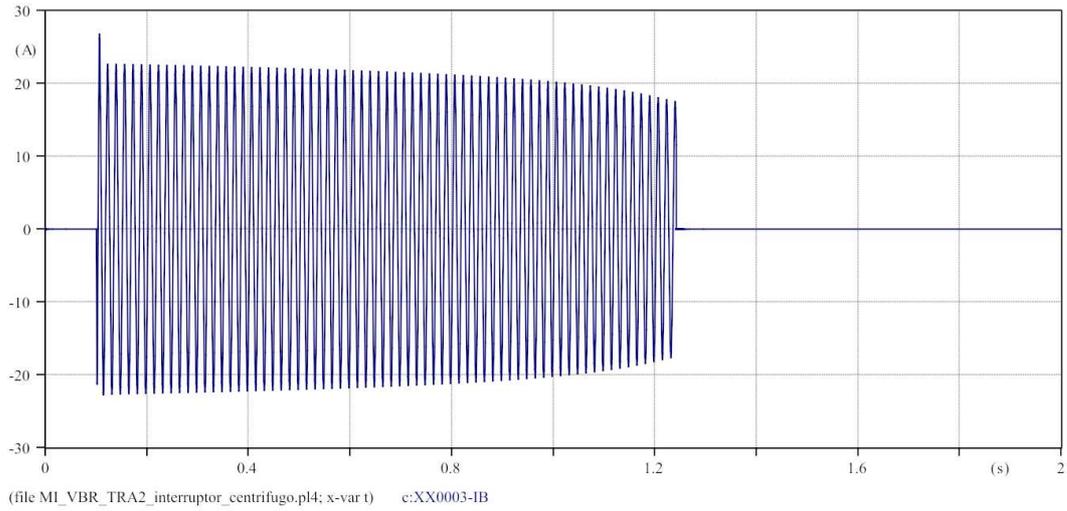


Figura 3.13: Corriente i_b

3.11.4 Enlaces de de flujo (F_{rx} , F_{ry}) de la Máquina de Inducción bifásica con modelo VBR, asimétrica

En las Figuras 3.14, 3.15 se representa el par eléctrico F_{ry} , F_{rx} de la máquina de inducción bifásica asimétrica con el modelo VBR en ATPDraw.

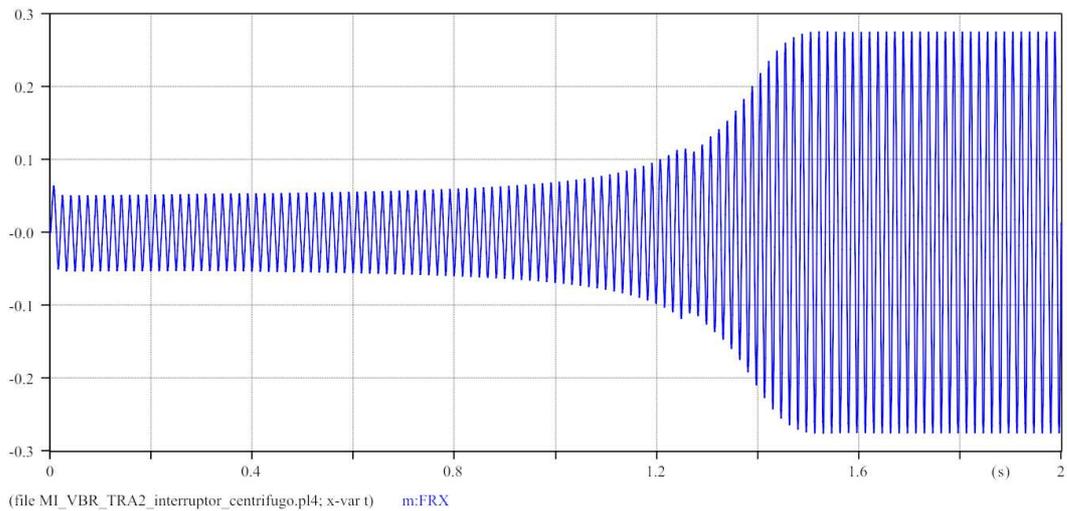


Figura 3.14: Enlace de flujo F_{rx}

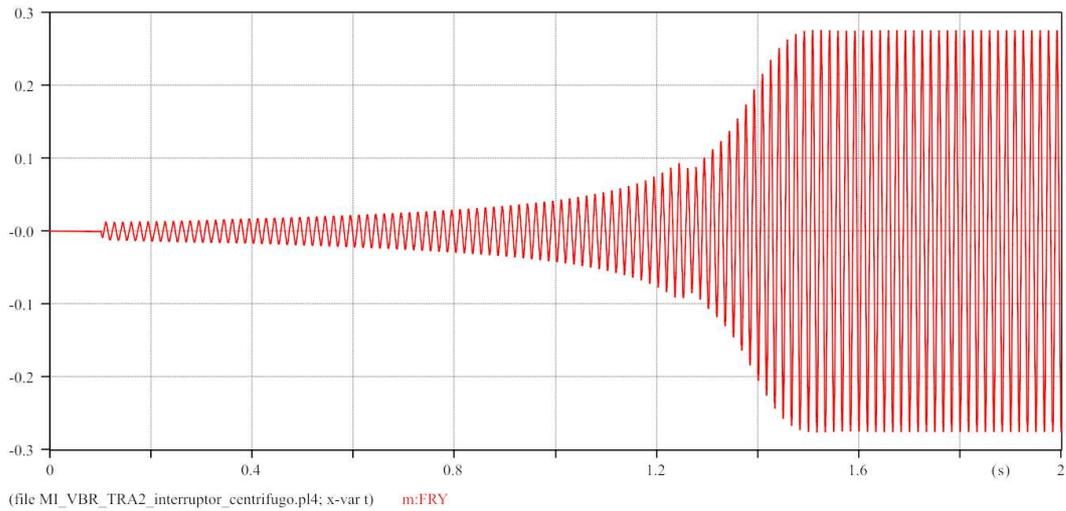


Figura 3.15: Enlace de flujo F_{ry}

3.12 Simulación de la máquina de inducción bifásica con el modelo VBR simétrico en Simulink

La máquina de inducción bifásica simétrica se alimenta con tensiones equilibradas iguales. En la Figura 3.16 se muestra la implementación utilizando el modelo VBR en Simulink.

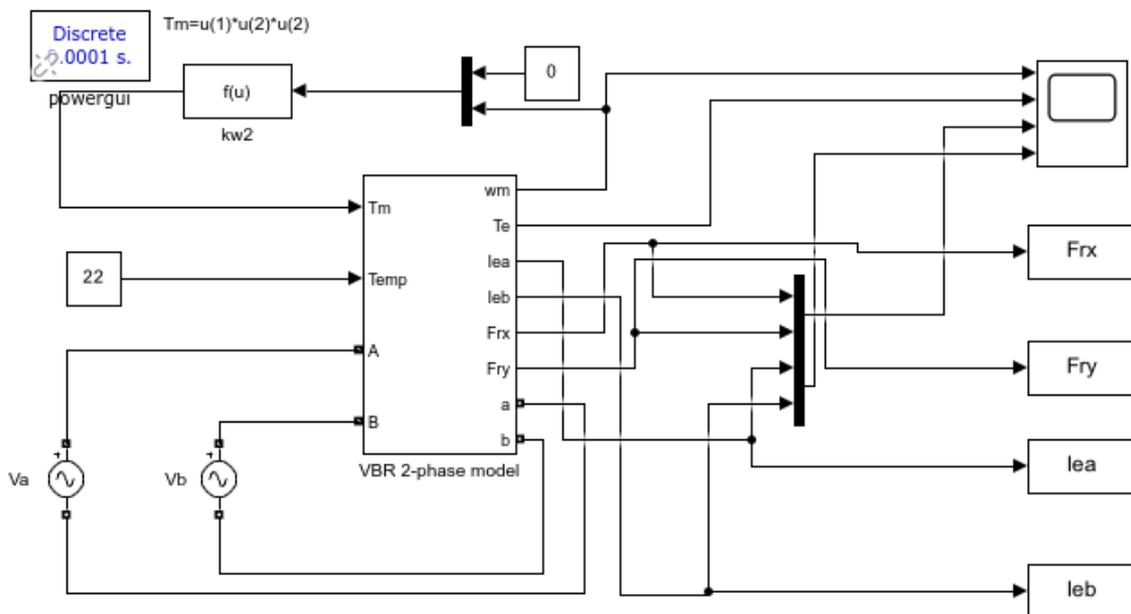


Figura 3.16: Máquina de inducción bifásica simétrica con el modelo VBR en simulink

3.13 Simulación de la máquina de inducción bifásica con VBR asimétrica en simulink

La máquina de inducción bifásica asimétrica se implementa con el modelo VBR, utilizando el valor de la resistencia e inductancia correctivas obtenidas de la ecuación (3.13), y también una capacitancia correctiva según la ecuación (3.15). Representada en la Figura 3.17, con un tiempo de simulación de 2 s.

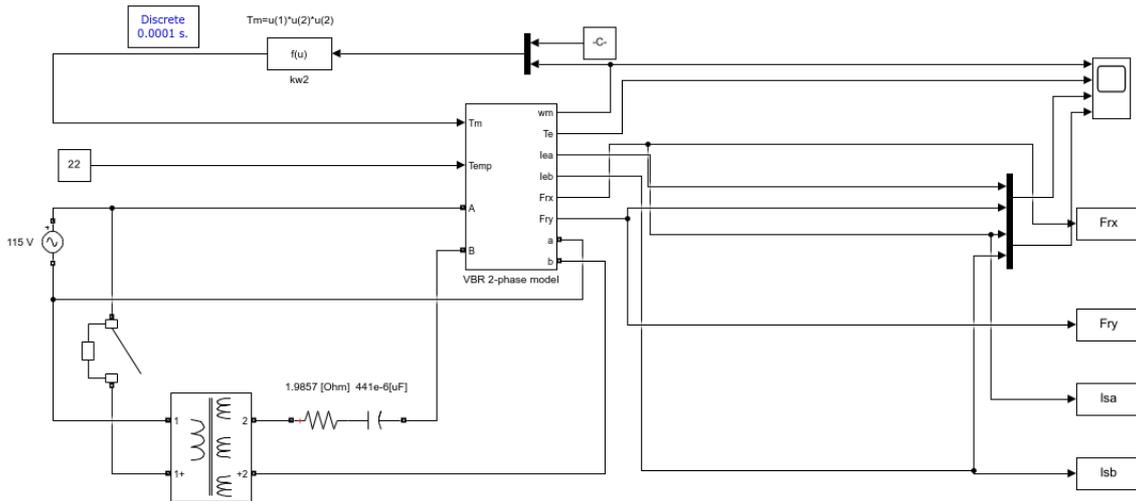


Figura 3.17: Máquina de inducción bifásica asimétrica con el modelo VBR en simulink

CAPITULO 4

ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este apartado, se realiza el análisis comparativo de los resultados obtenidos del modelado de la máquina de inducción monofásica con el modelo VBR, simétrico y asimétrico, en los entornos de ATPDraw y Simulink.

Se compararán las curvas de las variables de velocidad angular ω_m , par eléctrico T_e , y corrientes del estator i_a e i_b . A través de este análisis comparativo, se buscará evaluar el desempeño del modelo VBR implementado en ATPDraw y su comparación con los resultados obtenidos en la simulación en Simulink. Se evalúan y verifican los patrones de comportamiento en condiciones tanto transitorias como estacionarias de la máquina de inducción monofásica en ambos entornos de simulación, validando la efectividad del modelo VBR desarrollado y su capacidad para representar adecuadamente la dinámica de la máquina, tanto en el modelo simétrico. como asimétrico.

4.1 Comparación y análisis entre ATPDraw y Simulink de la máquina de inducción monofásica simétrica con VBR

4.1.1 Comparación y análisis entre ATPDraw y Simulink de la velocidad angular ω_m

En las Figuras, ATPDraw y Simulink 4.1, se puede observar el comportamiento de la velocidad en una máquina de inducción monofásica. En la fase de arranque del tiempo de 0 s a 0.45 s, se observa un rápido incremento en la velocidad angular, lo cual es característico del régimen transitorio. Al alcanzar el régimen permanente después de los 0.45 s, la velocidad se estabiliza en un valor constante, indicando que el motor ha alcanzado su velocidad de sincronismo y opera en equilibrio.

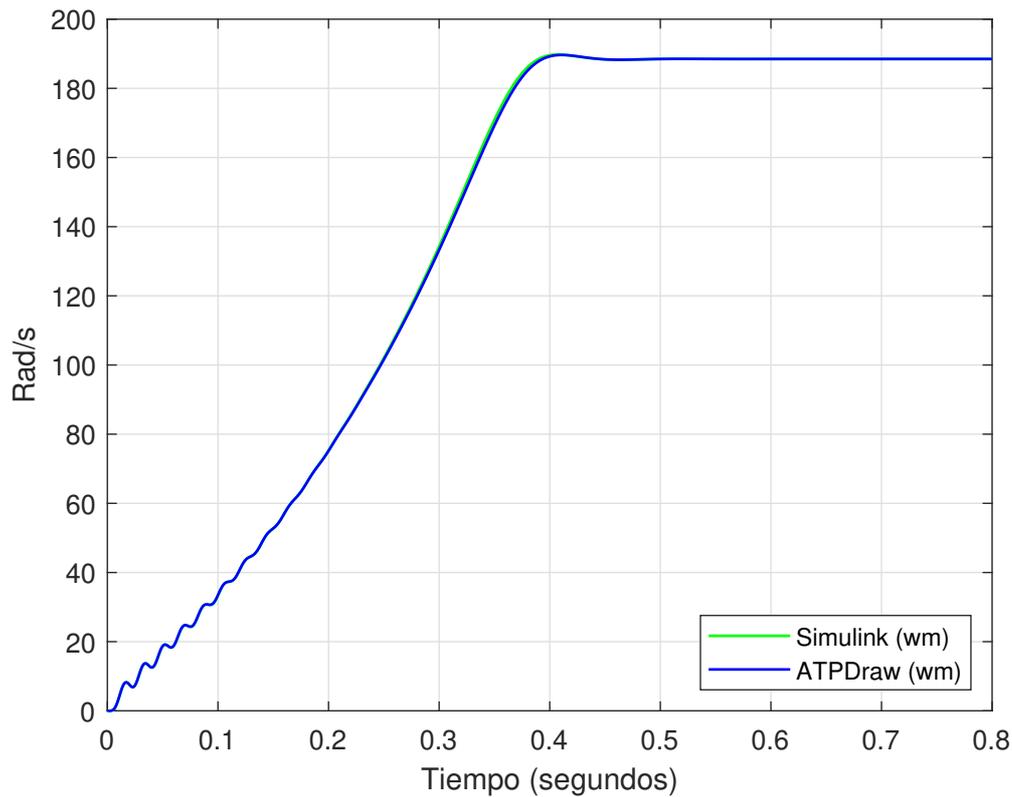


Figura 4.1: Velocidad angular ω_m del modelo simétrico

4.1.2 Comparación y análisis entre ATPDraw y Simulink del par eléctrico T_e

Las Figuras 4.2, muestran un comportamiento característico del par eléctrico T_e , en una máquina de inducción monofásica, durante el arranque y el funcionamiento en régimen permanente. En la fase de arranque de tiempo 0 s a 0.5 s aproximadamente, se observa un par pulsante de alta frecuencia debido a las interacciones entre el campo magnético rotatorio y el rotor. Al alcanzar el régimen permanente después de 0.5 s, presenta un comportamiento estable indicando que el motor ha alcanzado su velocidad de sincronismo, el par se estabiliza en valor prácticamente constante, ligeramente superior al par de carga, necesario para compensar las pérdidas mecánicas y eléctricas.

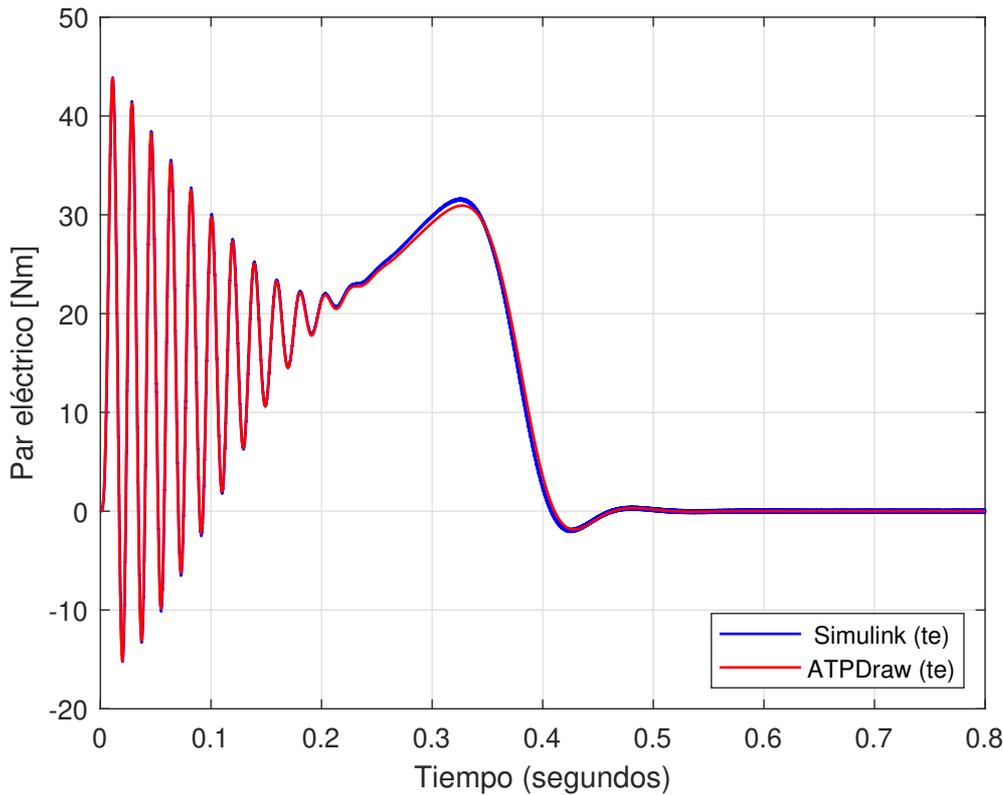


Figura 4.2: Par eléctrico T_e del modelo simétrico

4.1.3 Comparación y análisis entre ATPDraw y Simulink de las corrientes i_a y i_b

En la Figura 4.3 se observa la corriente i_a de la máquina de inducción bifásica simulada en ATPDraw. Asimismo, se muestra la corriente del estator i_a de la misma máquina, pero esta vez simulada con el modelo VBR en Simulink. Ambas fuentes operan a 115 V y una frecuencia de 60 Hz, con la fase A 0° y la fase B a -90° .

En el análisis del régimen transitorio, la corriente i_a de la máquina de inducción monofásica simétrica muestra un comportamiento similar en las simulaciones de ATPDraw y Simulink. Se observan grandes fluctuaciones iniciales de corriente que alcanzan aproximadamente ± 100 A en ATPDraw y ± 100 A en Simulink durante los primeros 0.4 s. Estas fluctuaciones disminuyen gradualmente y, alrededor de 0.4 s en ATPDraw y 0.4 s en Simulink aproximadamente, la corriente se estabiliza en un patrón periódico, indicando que la máquina ha alcanzado su estado estable. En el régimen permanente, la corriente oscila de manera constante entre valores específicos, manteniendo un patrón estable. En ATPDraw, la corriente oscila entre

$\pm 10A$, mientras que en Simulink lo hace entre $\pm 10A$. Después de $0.44 s$ en ATPDraw y $0.44 s$ en Simulink.

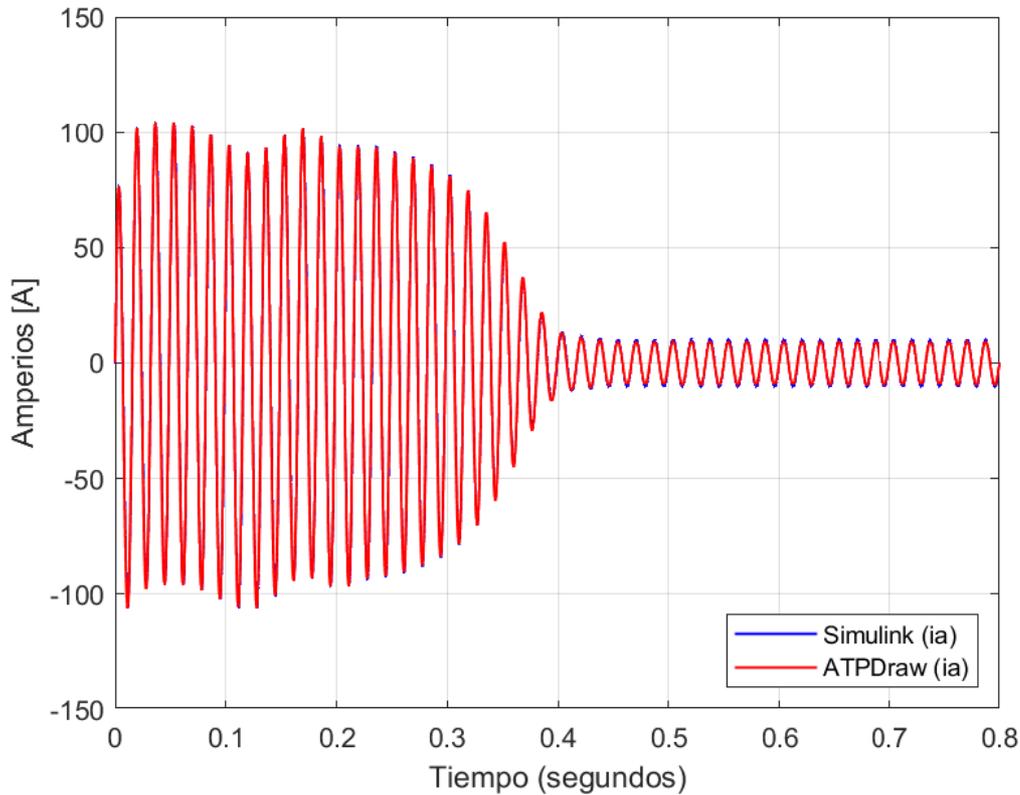


Figura 4.3: Corriente i_a del modelo simétrico

En la Figura 4.4 se observa la corriente i_b de la máquina de inducción bifásica en ATPDraw. Asimismo, se muestra la corriente del estator i_b de la misma máquina pero con el modelo VBR en Simulink. Ambas fuentes operan a $115 V$ y con una frecuencia de $60 Hz$, con la fase A con un desfase de 0° y la fase B con un desfase de -90°

En el análisis del régimen transitorio, la corriente i_b de la máquina de inducción monofásica simétrica muestra un comportamiento similar en las simulaciones de ATPDraw y Simulink. Se observan grandes fluctuaciones iniciales de corriente altas que alcanzan aproximadamente $\pm 100A$ en ATPDraw y $\pm 100A$ en Simulink durante los primeros $0.4 s$. Estas fluctuaciones disminuyen gradualmente y, alrededor de $0.4 s$ en ATPDraw y $0.4 s$ en Simulink aproximadamente, la corriente se estabiliza en un patrón periódico, indicando que la máquina ha alcanzado su estado estable. Este comportamiento transitorio dominado por altas corrientes es típico en las máquinas de inducción. En el régimen permanente, la corriente oscila de manera constante entre valores específicos, manteniendo un patrón estable. En ATPDraw, la corriente

oscila entre $\pm 10A$, mientras que en Simulink lo hace entre $\pm 10A$. Después de $0.41 s$ en ATPDraw y $0.41 s$ en Simulink.

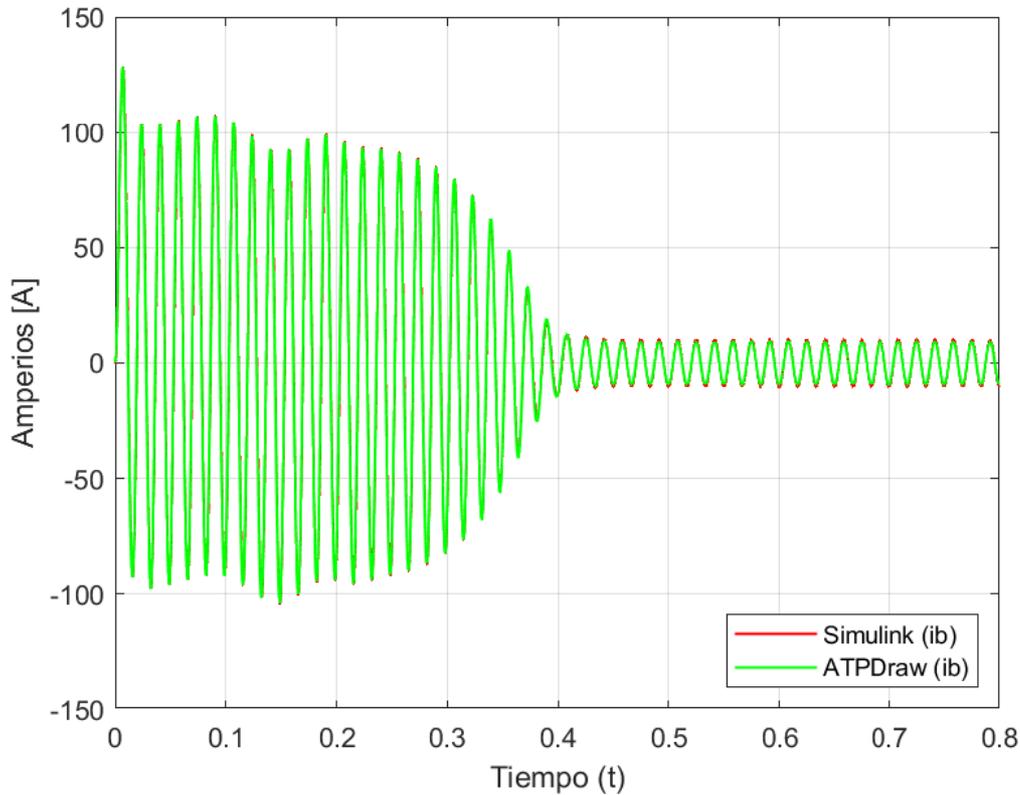


Figura 4.4: Corriente i_b del modelo simétrico

4.2 Comparación y análisis entre ATPDraw y Simulink de la máquina de inducción monofásica asimétrica con VBR

Para el modelo asimétrico se incluye la impedancia Z_x que permite la simulación de máquinas bifásicas asimétricas mediante modelos simétricos de estos convertidores, considerando las diferencias de resistencias e inductancias de fuga del estator. Adicionalmente, se introduce un transformador que permite considerar el cambio de número de vueltas de las bobinas de la máquina. También se incluye un condensador de $441 \mu F$ en serie con el devanado del estator, para cambiar la fase de las corrientes entre ambas bobinas y así generar el campo magnético giratorio elíptico durante el arranque de la máquina. También hay una resistencia en serie de 1.9787Ω que ajusta los cambios de resistencias entre ambas bobinas.

4.2.1 Comparación y análisis entre ATPDraw y Simulink de la velocidad angular ω_m

El análisis de la Figura 4.5, que representan la velocidad angular ω_m de la máquina de inducción bifásica asimétrica simulada en ATPDraw y Simulink, muestra un comportamiento similar en ambos casos: durante el régimen transitorio se aprecia un aumento gradual de la velocidad angular hasta alcanzar un estado de régimen permanente, donde las curvas se mantienen relativamente constantes con pequeñas fluctuaciones. La curva de ATPDraw es ligeramente inferior a la de Simulink, con una diferencia aproximada del 1% en los valores máximos alcanzados en 188.5 rad/s. A lo largo de toda la simulación, el sistema presenta un comportamiento estable, sin oscilaciones ni inestabilidades significativas, y después de los 1.2 s, el régimen permanente se mantiene constante. Esto indica que las diferencias observadas entre las dos herramientas de simulación se deben probablemente a pequeñas variaciones en los parámetros, pero en general, los resultados son similares.

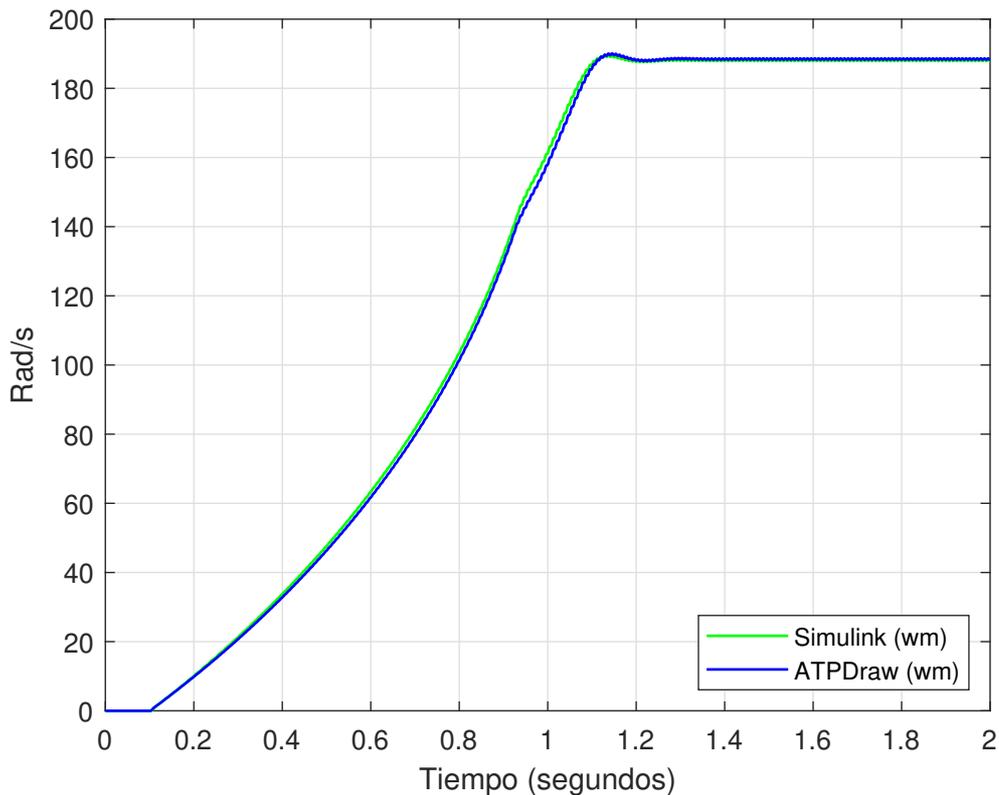


Figura 4.5: Velocidad angular ω_m del modelo asimétrico

4.2.2 Comparación y análisis entre ATPDraw y Simulink del par eléctrico T_e

El análisis de la figura 4.6, que representan el par eléctrico T_e , muestra el comportamiento durante el régimen transitorio de la simulación tanto en ATPDraw como en Simulink. Se observa un comportamiento oscilatorio que se extiende hasta los 1.2 s, alcanzando un valor máximo alrededor de 1.1 s debido a la conexión inicial y la interacción entre los componentes del sistema con un par máximo aproximado de 27 N·m. Después los 1.2 s, el sistema alcanza el régimen permanente, donde el par eléctrico se estabiliza en los valores ± 6.25 N·m en ATPDraw y 6.25 a 7.45 N·m en Simulink, lo que representa una diferencia de reflejando de los extornos de simulación que existente entre los resultados de las dos herramientas de simulación.

Las variaciones entre los resultados de ambos entornos de simulación pueden atribuirse a diferencias en las condiciones iniciales utilizadas en los modelos de simulación implementados. Es importante considerar que cada programa puede manejar las variables de entrada y los algoritmos de cálculo de manera distinta, lo que influye en los resultados obtenidos.

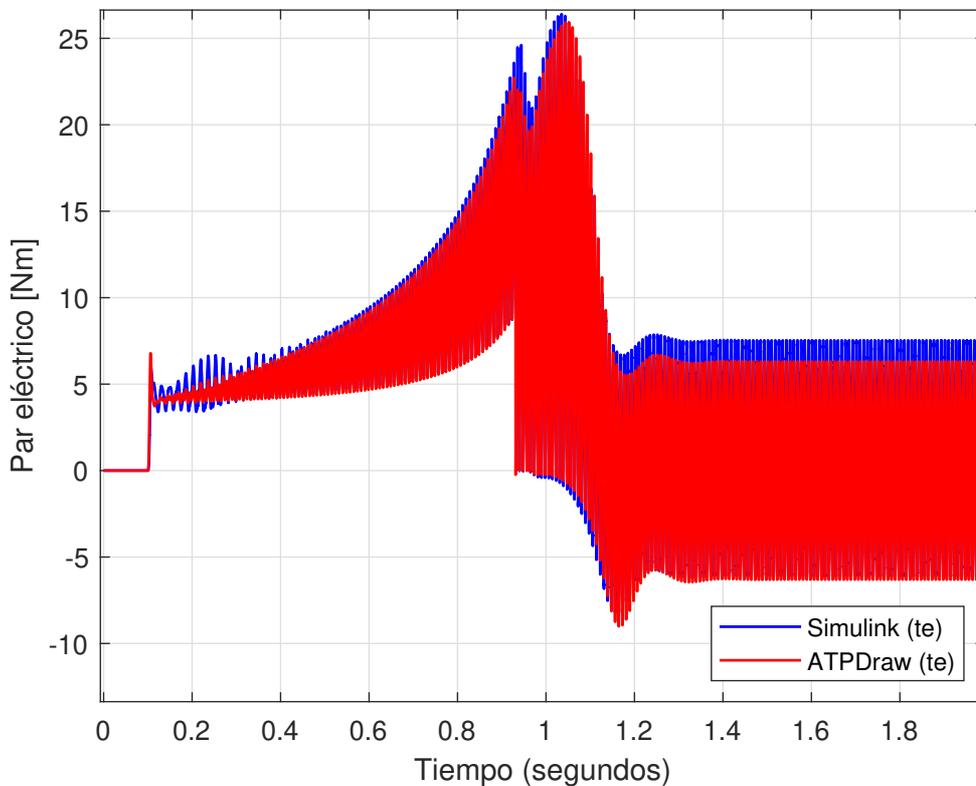


Figura 4.6: Par eléctrico T_e del modelo asimétrico

4.2.3 Comparación y análisis entre ATPDraw y Simulink de las corrientes i_a y i_b

En la Figura 4.7 se visualiza la corriente i_a de la máquina de inducción bifásica asimétrica con el modelo VBR en ATPDraw. Asimismo, muestra esta corriente del estator con el mismo modelo en Simulink, el análisis del régimen transitorio, la corriente i_a de la máquina de inducción monofásica asimétrica muestra un comportamiento similar en las simulaciones de ATPDraw y Simulink. Se observan grandes fluctuaciones iniciales, con picos de corriente que alcanzan aproximadamente $\pm 100A$ en ATPDraw y un valor pico cercano a $\pm 100A$ en Simulink durante los primeros 0.1 s. Estas fluctuaciones disminuyen gradualmente hasta un valor cercano a $\pm 100A$ y, hasta 1.3 s en Simulink y ATPDraw, la corriente se estabiliza en un patrón periódico, indicando que la máquina ha alcanzado su estado estable. Este comportamiento transitorio dominado por altas corrientes es típico en las máquinas de inducción. En el régimen permanente, la corriente oscila de manera constante entre valores específicos, manteniendo un patrón estable. En ATPDraw, la corriente oscila entre $\pm 19A$, mientras que en Simulink lo hace entre $\pm 18A$. Después de 1.2 s en ATPDraw y en Simulink, no se observan cambios significativos en el patrón de la corriente, lo que refuerza la estabilidad del sistema en ambos entornos de simulación.

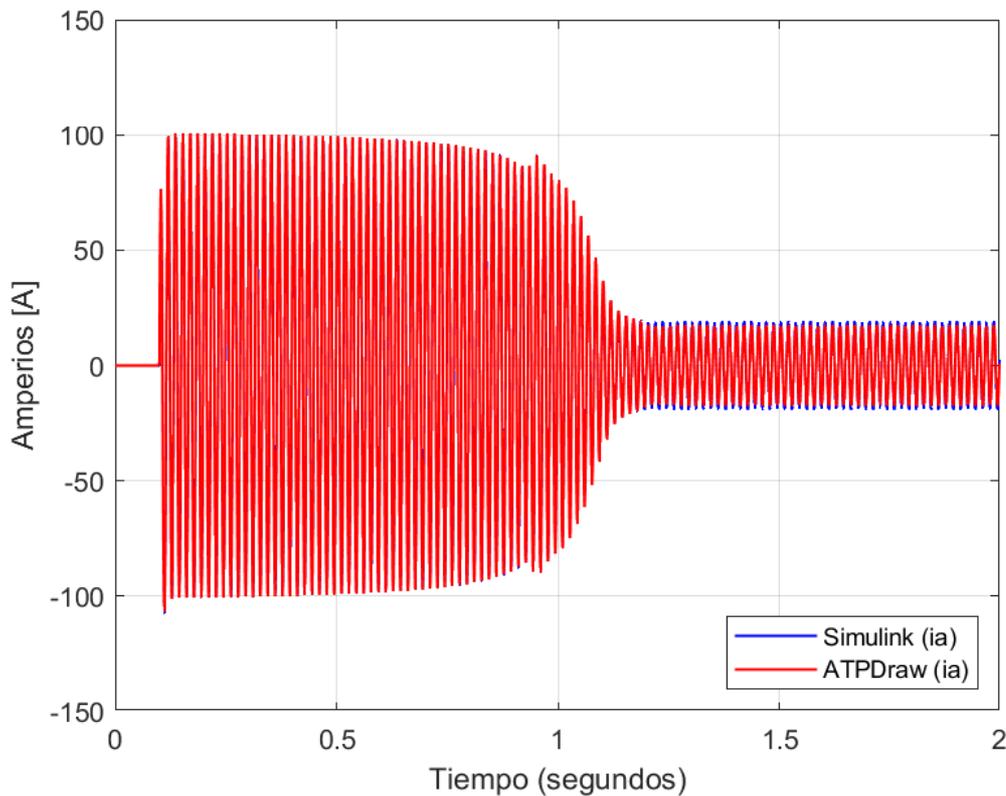


Figura 4.7: Corriente i_a del modelo asimétrico

En la Figura 4.8 se visualiza la corriente i_b de la máquina de inducción bifásica asimétrica con el modelo VBR en ATPDraw y también el mismo modelo en Simulink. En el análisis del régimen transitorio, la corriente i_b de la máquina de inducción monofásica asimétrica muestra un comportamiento similar en las simulaciones de ATPDraw y en Simulink. Se observan grandes fluctuaciones iniciales, con picos de corriente que alcanzan aproximadamente 40A en ATPDraw y 38A en Simulink durante los primeros 0.1s. Estas fluctuaciones disminuyen gradualmente hasta valor de 35A hasta el de tiempo 0.93s en ATPDraw y en Simulink. Cuando alcanza una velocidad de aproximadamente del, 75% el interruptor centrífugo desconecta su fase, como se observa que en ATPDraw, la corriente es 0A, mientras que en Simulink lo hace entre 0A. Después de aproximadamente 1.24s en ATPDraw y en Simulink, no se observan cambios significativos en el patrón de la corriente, lo que refuerza la estabilidad del sistema en ambos entornos de simulación.

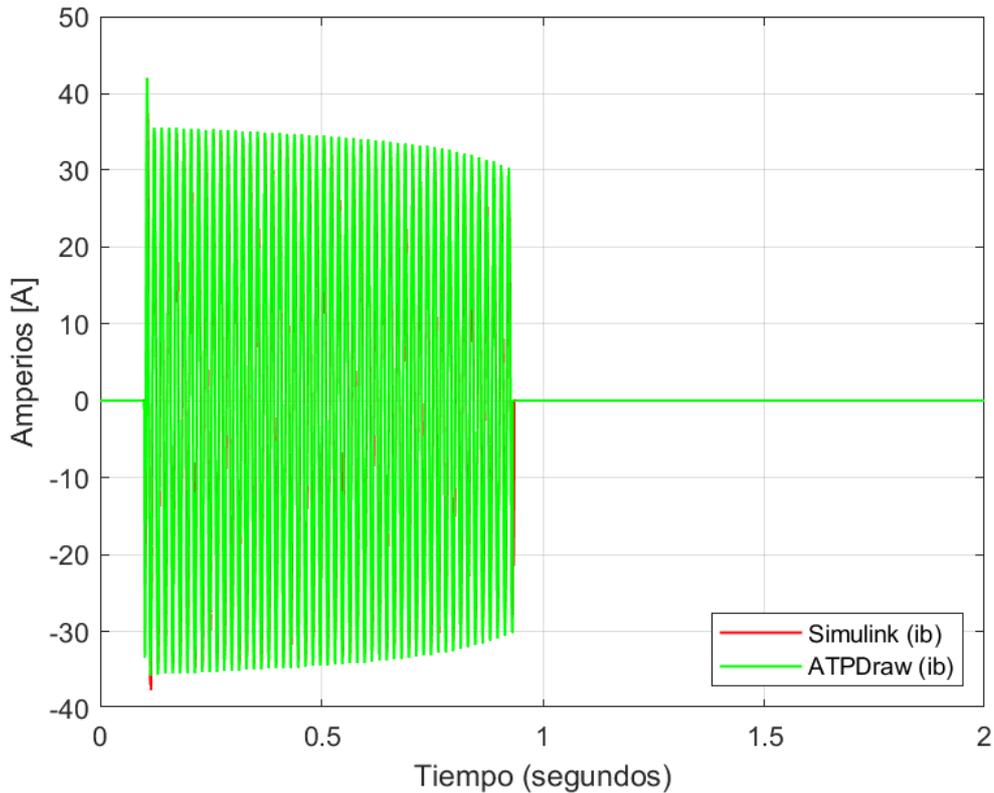


Figura 4.8: Corriente i_b del modelo asimétrico

CAPITULO 5

Conclusiones y recomendaciones para trabajos futuros

5.0.1 Conclusiones

El programa ATP-EMTP y su entorno gráfico ATPDraw, han demostrado ser una herramienta de simulación de gran utilidad para el análisis y diseño de las máquinas eléctricas. Estas herramientas poseen una gran capacidad para modelar en detalle y con precisión una amplia gama de máquinas, desde motores de inducción hasta generadores sincrónicos. Los resultados obtenidos de los entornos de simulación han permitido comprender el comportamiento dinámico y en régimen permanente de la máquina de inducción monofásica simétrica y asimétrica, lo que a su vez ayuda al desarrollo de diseños más confiables y eficientes, así como a determinar sus características operativas con diferentes tipos de alimentación y cargas.

La programación en el lenguaje MODELS permitió la implementación del modelo VBR de la máquina bifásica de inducción en vectores espaciales referidos al estator, para motores simétrico como s , aplicando las ecuaciones desarrolladas para estos modelos. El uso de los TACS fue importante porque permitió introducir en las fuentes de fuerza electromotriz del modelo circuital, los cálculos de estas fuentes realizados en el entorno MODELS.

La simulación de la máquina de inducción monofásica y bifásica utilizando la técnica VBR y los vectores espaciales es eficiente y de gran valor práctico porque puede ser implementada de forma muy simple en programas de simulación de circuitos eléctricos.

El modelo desarrollado de la máquina de inducción monofásica desequilibrada, en ATP-EMTP, utilizando el entorno gráfico ATPDraw ha permitido cumplir el objetivo propuesto en el proyecto de investigación. El modelo circuital implementado

es simple y su ejecución muy rápida y precisa. Los resultados obtenidos en ATP-EMTP y los modelos realizados en el entorno de MATLAB/Simulink demuestran que ambos son similares, pero que los resultados de ATP-EMTP son más rápidos. Los resultados de la velocidad, el par eléctrico y la corriente i_a y i_b son similares en ambos entornos de simulación. El error existente entre ATPDraw y Simulink se pudo verificar que en ningún caso supera el 1%, tanto en el modelo simétrico como en el modelo desequilibrado.

La programación y modelación de máquinas eléctricas en ATP-EMTP, utilizando su entorno gráfico MODELS resulta ser muy preciso, eficiente y práctico. Además, al ser un programa cuya licencia no tiene costo para el usuario se convierte en una herramienta muy poderosa para la investigación y análisis del comportamiento de las máquinas eléctricas en diferentes condiciones de operación que pueden incluir: transitorios, armónicas, desequilibrios, cargas variables, etc.

5.0.2 Recomendaciones

Para continuar con el desarrollo del modelo de las máquinas monofásicas y bifásicas de inducción se recomienda seguir algunas de las siguientes propuestas:

- Incluir el efecto de la saturación en el modelo de estas máquinas
- Incluir el efecto de las armónicas espaciales en la modelación de estos convertidores.
- Considerar fuentes de alimentación mediante puentes inversores que permitan reducir las corrientes durante el arranque y eliminar la necesidad del condensador auxiliar.
- Utilizar el modelo para desarrollar métodos de identificación de parámetros a partir de ensayos experimentales.
- Incluir el efecto de la variación de la temperatura en el modelo, debido al calentamiento del rotor y del estator durante la operación. También es posible incorporar en el modelo las pérdidas en el hierro de la máquina.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] E. Fuchs, A. Vandenput, J. Holl, and J. White, “Design analysis of capacitor-start, capacitor-run single-phase induction motors,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 5, no. 2, pp. 327–336, 1990.
- [2] M. A. Rahman, A. M. Osheiba, K. Kurihara, M. A. Jabbar, H. W. Ping, K. Wang, and H. M. Zubayer, “Advances on single-phase line-start high efficiency interior permanent magnet motors,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 3, pp. 1333–1345, 2012.
- [3] S. J. Chapman, *Máquinas Eléctricas*. México, D.F.: McGraw-Hill/Interamericana Editores, S.A. de C.V., 5th ed., 2024.
- [4] J. M. Aller, *Máquinas Eléctricas Rotativas: Introducción a la Teoría General*. Valle de Sartenejas, Baruta, Edo. Miranda, Venezuela: EDITORIAL EQUINOCCIO, 2006. Depósito legal LF: 2442004600958.
- [5] P. C. Sen, *Principles of electric machines and power electronics*. Wiley, 3rd ed ed., 2014.
- [6] J. F. Mora, *Maquinas electricas - 8. edicion*. Garceta Grupo Editorial, 2016.
- [7] F. Blaabjerg, F. Lungeanu, K. Skaug, and M. Tonnes, “Two-phase induction motor drives,” *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 10, no. 4, pp. 24–32, 2004.
- [8] J. F. Naranjo Anda, “Simulación digital de la máquina de inducción monofásica,” B.S. thesis, QUITO/EPN/1980, 1980.
- [9] B. G. Lamme, “The story of the induction motor,” *Journal of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 40, no. 3, pp. 203–223, 1921.
- [10] H. Jungk, “Advances in design of single-phase series motor,” *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 50, no. 1, pp. 278–283, 1931.

- [11] M. A. Rodríguez Pozueta, *Motores monofásicos de inducción*. España: Universidad de Cantabria, 2015.
- [12] G. J. M. Mieles, Y. L. Albuérne, and A. M. V. Quiroz, “Aspectos a considerar en el uso de motores eléctricos menores de 2hp en zonas rurales del ecuador,” *Polo del Conocimiento: Revista científico-profesional*, vol. 6, no. 9, pp. 1950–1961, 2021.
- [13] J. M. Aller, “Máquinas eléctricas rotativas,” *Caracas, Equinoccio*, 2008.
- [14] M. Enokizono, “Design method by vector magnetic characteristic analysis for upgrading efficiency of motor,” in *2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, vol. 1, pp. 2266–2271, Aug 2020.
- [15] M. Kizilcay, H. Hoidalén, and A. Ametani, “EMTP-ATP,” *Numerical Analysis of Power System Transients and Dynamics*, vol. 78, p. 47, 2015.
- [16] H. G. C. GUERRERO, J. J. RAMÍREZ-MATEUS, E. E. D. SEPÚLVEDA, and J. A. B. VARGAS, “Diseño y simulación de un modelo matemático de un motor monofásico de inducción,” *IV SEMANA INTERNACIONAL Y XII SEMANA DE CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN*, 2017.
- [17] J. C. C. Narváez and J. A. P. Castelo, “Validación del programa atp para estudios de flujo de carga en sistemas de potencia,” 2022. Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Eléctrico.
- [18] B. A. Lucena and G. A. Araujo, “Desarrollo de una aplicación para el análisis de transitorios en máquinas sincrónicas,” in *1ER CONGRESO IBEROAMERICANO DE ESTUDIANTES DE INGENIERÍA ELÉCTRICA - I CIBELEC*, 2004.
- [19] W. D. M. Pardo and J. P. S. Avalos, “Validación del programa ATP para estudios de cortocircuitos en sistemas eléctricos de potencia,” 2023. Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Eléctrico, Universidad Politécnica Salesiana.
- [20] R. Herrera Orozco, J. J. Mora Flores, and J. F. Patiño, “Simulación y validación del modelo polinomial de la carga utilizando ATP,” *Scientia et Technica*, vol. 18, no. 01, p. 11, 2013.
- [21] J. Aller, J. Viola, J. Restrepo, M. Fajardo, A. Ginart, J. Rengifo, J. Loja, and J. Ochoa, “Space vector control of asymmetrical single-phase induction motors,” in *2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, pp. 1684–1690, IEEE, 2018.

- [22] A. Alonso Martín, “Diseño de un motor de inducción monofásico,” B.S. thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, 2014.
- [23] F. B. Toledo Solano and F. P. Urgiles Palacios, “Desarrollo de un modelo dinámico VBR de la máquina de inducción en ATP-EMTP,” B.S. Thesis, Universidad Politécnica Salesiana- Sede Cuenca’, 2021.

ANEXOS

Anexo A

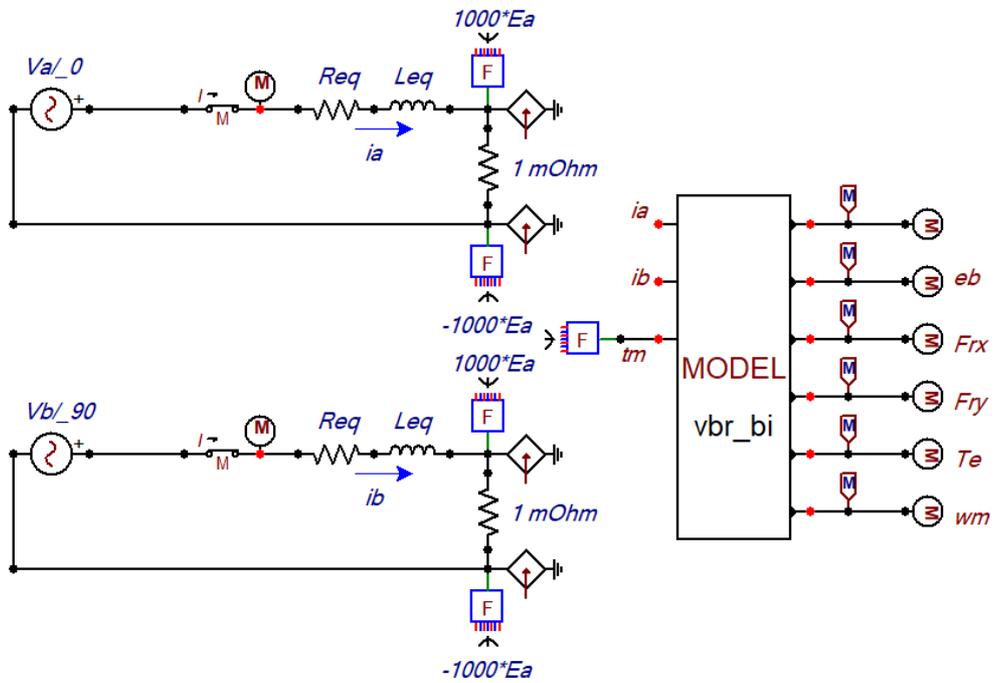


Figura 5.1: Modelo dinámico de la máquina de inducción bifásica simétrica con VBR en ATP-Draw

ANEXOS

Anexo B

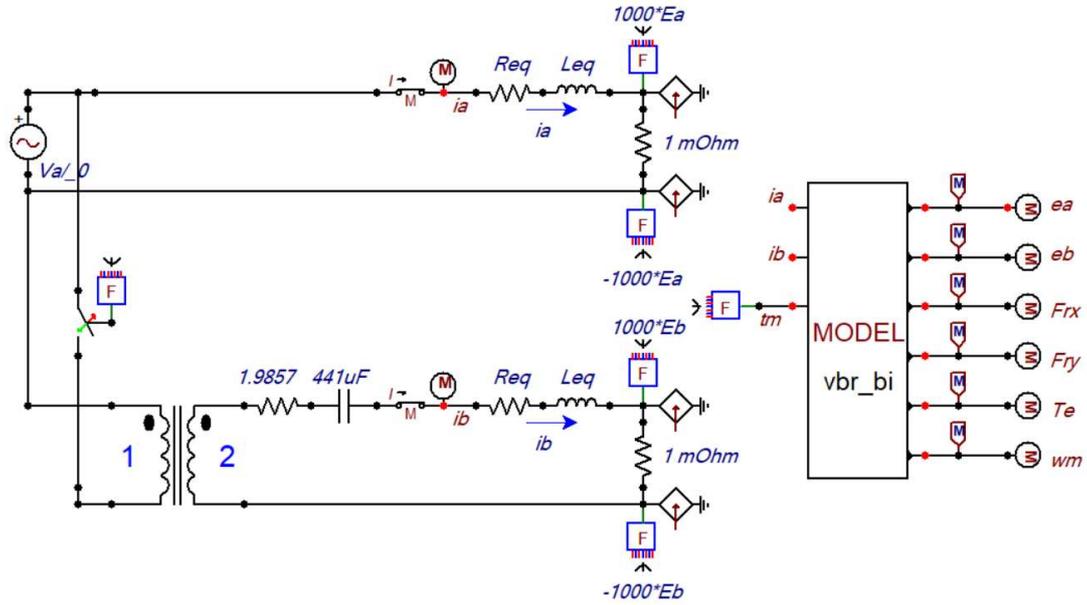


Figura 5.2: Modelo dinámico de la máquina de inducción bifásica asimétrica con VBR en AT-Draw

Anexos

Anexo A.1: Código Implementado en MODELS

```
MODEL VBR_BI
-- Parametros del motor bifasico en PU
DATA Rs {dflt: 0.02},Rr {dflt: 0.06}
DATA Lls {dflt: 3.1},Llr {dflt: 3.0},Msr {dflt: 60.e-3};
DATA J {dflt: 0.163},Kr {dflt:0},p {dflt:2}
-- Entradas
INPUT ia, ib, Tm
-- Salidas
OUTPUT ea,eb,FrX,Fry,Te,wm
-- constantes
CONST Sqrt1_2{val: 0.707106781}, Sqrt_2{val: 1.414213562}
-- variables
VAR ea,eb,FrX,Fry,Te,wm,ix,iy,pFrX,pFry
VAR ex,ey,pwm,Lr,M

History
  pFrX {dflt:0}          -- dv flujos
  integral(pFrX) {dflt:0}
  pFry {dflt:0}
  integral(pFry) {dflt:0}
  pwm {dflt:0}          -- dv PWM
  integral(pwm) {dflt:0}

INIT
-- Condiciones iniciales
ea:=0
eb:=0
wm:=0
pwm:=0
pFrX:=0
pFry:=0
FrX:=0
Fry:=0
ENDINIT
EXEC
Lr:=(Llr+Msr) -- Inductacia de rotor.
M := Msr      -- Inductacia mutua.

-- Componentes de cordenadas naturales a vectores espaciales
bifasicas.
ix:= Sqrt1_2*(ia)
iy:= Sqrt1_2*(ib)
```

```

-- Derivada del flujos
pFrx := -Rr*Frx/Lr - p*ωm*Fry + Rr*M*ix/Lr
pFry := -Rr*Fry/Lr + p*ωm*Frx + Rr*M*iy/Lr

--Calculo de la integral de flujo
Frx := INTEGRAL(pFrx)
Fry := INTEGRAL(pFry)

-- Calculo de la fuerza electromotriz en coordenadas vectoriales
espaciales
ex := -M*Rr*Frx/(Lr**2) - M*p*ωm*Fry/Lr
ey := -M*Rr*Fry/(Lr**2) + M*p*ωm*Frx/Lr

-- Calculo de vectores espaciales a coordenadas naturales
ea := SQRT_2*(ex)
eb := SQRT_2*(ey)

-- Torque electrico
Te := p*M*(Frx*iy - Fry*ix)/Lr

-- calculo Pwm
pwm := (Te - Tm - Kr*ωm)/J

-- Calculo de la velocidad angular
ωm := INTEGRAL(pwm)
ENDEXEC
ENDMODEL

```

Listing 5.1: Código de ejecución del modelo VBR de la máquina de inducción monofásica en MODELS.

ANEXOS

Anexo C

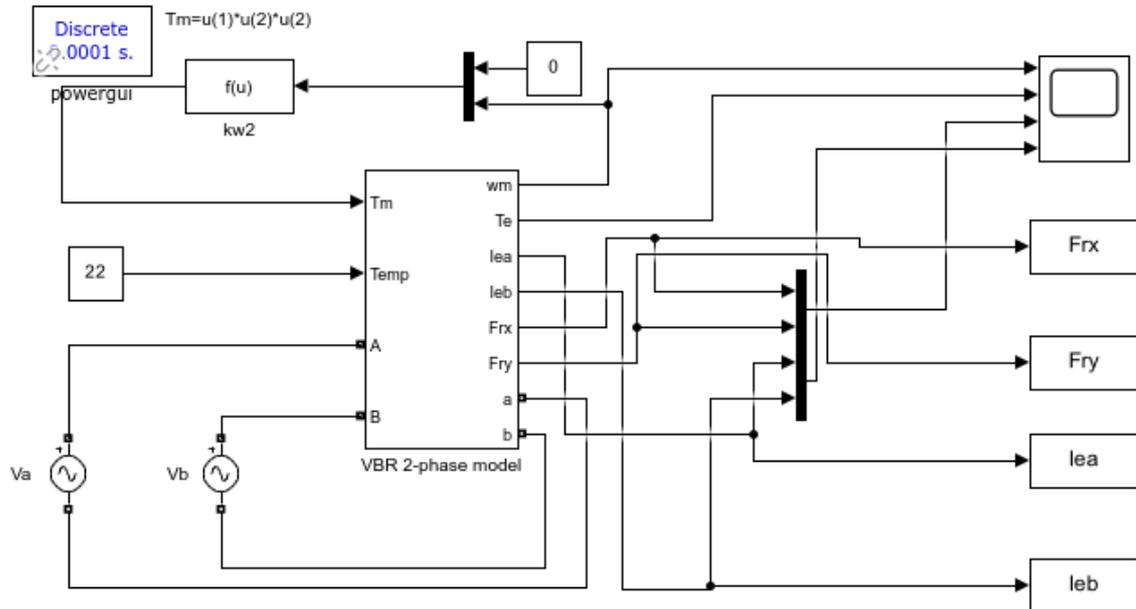


Figura 5.3: Modelo dinámico de la máquina de inducción bifásica simétrica con VBR en simulink

ANEXOS

Anexo D

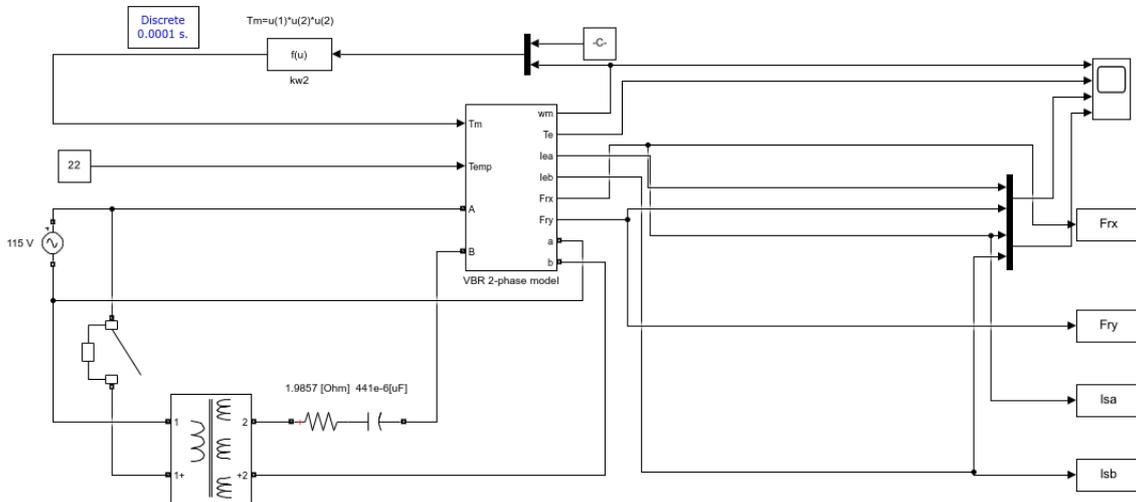


Figura 5.4: Modelo dinámico de la máquina de inducción bifásica asimétrica con VBR en simulink