

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE CUENCA

CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

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

PROYECTO TÉCNICO CON ENFOQUE INVESTIGATIVO:

**“DESARROLLO DE UN MODELO DINÁMICO VBR DE LA MÁQUINA DE
INDUCCIÓN EN ATP-EMTP”**

AUTORES:

FRANKLIN BOLIVAR TOLEDO SOLANO

FRANKLIN PATRICIO URGILES PALACIOS

TUTOR:

Dr. JOSÉ MANUEL ALLER CASTRO

CUENCA – ECUADOR

2021

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros, Franklin Bolivar Toledo Solano con documento de identificación N° 0105196174, y Franklin Patricio Urgiles Palacios con documento de identificación N° 0105261093, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación: **“DESARROLLO DE UN MODELO DINÁMICO VBR DE LA MÁQUINA DE INDUCCIÓN EN ATP-EMTP”**, mismo que 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 aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, julio de 2021



Franklin Bolivar Toledo Solano
CI: 0105196174



Franklin Patricio Urgiles Palacios
CI: 0105261093

CERTIFICACIÓN

Yo, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: “**DESARROLLO DE UN MODELO DINÁMICO VBR DE LA MÁQUINA DE INDUCCIÓN EN ATP-EMTP**”, realizado por Franklin Bolivar Toledo Solano y Franklin Patricio Urgiles Palacios, obteniendo el *Proyecto Técnico*, que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, julio de 2021

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'José Manuel Aller Castro', written in a cursive style.

Dr. José Manuel Aller Castro

CI: 0151561800

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, Franklin Bolivar Toledo Solano con documento de identificación N° 0105196174 y Franklin Patricio Urgiles Palacios con documento de identificación N° 0105261093, autores del trabajo de titulación: **“DESARROLLO DE UN MODELO DINÁMICO VBR DE LA MÁQUINA DE INDUCCIÓN EN ATP-EMTP”**, certifico que el total contenido del *Proyecto Técnico* es de mi exclusiva responsabilidad y autoría

Cuenca, julio de 2021



Franklin Bolivar Toledo Solano

CI: 0105196174



Franklin Patricio Urgiles Palacios

CI: 0105261093

DEDICATORIA

Al finalizar mi tesis primeramente quiero dar gracias a mi Divino Niño Jesús por tantos milagros que ha realizado en mi vida y me ayudado en todo momento, agradeciendo de igual manera a mis padres en especial al apoyo constante de mi mami la cual fue un pilar fundamental para cumplir con un objetivo más en mi vida sin ella no hubiera sido posible la culminación de esta etapa de mi vida, gracias mami por levantarme en mis momentos más duros de mi vida y brindarme su apoyo incondicional. También quiero agradecer de forma muy especial el apoyo brindado de un gran profesional que fue más que mi profesor, es un amigo verdadero el Ing. Giovanni Sagbay, gracias por brindarme su amistad y sus sabios consejos, de igual manera gracias infinitas al Dr. Jose Manuel Aller por siempre solucionar las dudas, inquietudes que surgieron en este camino de la elaboración de la tesis. Agradezco también a mis amigos: Angélica, David, José, Daniel, Víctor, que juntos recorrimos la carrera universitaria en las buenas y malas. De igual manera a mi gran amigo y compañero de fórmula para esta tesis Patricio ya que siempre con buen humor y chistes lo logramos lo que parecía imposible.

Franklin T.

Cuenca, julio de 2021

DEDICATORIA

Mi trabajo de titulación se lo dedico a Dios, por brindarme sabiduría y paciencia para culminar este proceso; a la Virgen del Cisne porque en Ella deposité toda mi fe y confianza; a mis amados padres, Segundo y Florencia, por ser el motor principal para lograr mis metas, por todo el sacrificio y esfuerzo diario por verme triunfar, por creer en mí y por brindarme su apoyo incondicional; a mis maestros y compañero de tesis, por sus conocimientos impartidos a lo largo de este camino, de manera especial a mi director de tesis, por guiar esta investigación y formar parte de la culminación de mi carrera

Franklin U.

Cuenca, julio de 2021

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Dios por la vida que nos da y por concluir este trabajo de titulación, agradecemos a nuestros padres por el apoyo brindado durante este camino, también queremos agradecer a nuestro tutor Dr. Jose Manuel Aller por el apoyo incondicional para la realización de este trabajo de titulación, ya que sin importar las horas siempre nos brinda su apoyo.

Franklin B. Toledo S.

Franklin P. Urgiles P.

RESUMEN

En este documento se presenta el desarrollo de un modelo dinámico de la máquina de inducción mediante la metodología VBR, utilizando las herramientas ATPDraw y Simulink de Matlab, con el propósito de comparar los resultados de ambas modelaciones. La ventaja de realizar las modelaciones VBR de la máquina de inducción en ATP es que es una herramienta muy poderosa y de uso libre, aunque es necesario gestionar su licencia con los grupos de soporte. Esta herramienta dispone de sus propios modelos de máquinas eléctricas y es conveniente extender estos modelos con la técnica VBR.

ABSTRACT

In this document, a dynamic model of the induction machine will be developed using the VBR methodology, using Matlab's ATPDraw and Simulink tools, in order to compare the results of both models. The advantage of performing VBR modeling of the induction machine in ATP is that it is a very powerful and free-to-use tool, although it is necessary to manage its license with the support groups. This tool has its own models of electric machines and it is convenient to extend these models with the VBR technique.

PREFACIO

La máquina de inducción, debido a sus características constructivas y su naturaleza de funcionamiento, es un sistema de gran complejidad, por esta razón es difícil de analizar y modelar. Algunas contribuciones para resolver este problema en la literatura se fundamentan en diversas idealizaciones, con el objetivo de obtener un modelo de orden reducido. La desventaja de esta metodología es que con estos modelos es imposible describir por completo el sistema a controlar. Por esta razón, se utilizan transformaciones de variables que permiten obtener modelos más simples para el motor de inducción, reduciendo las idealizaciones de la máquina [1].

El modelo basado en fuente de voltaje detrás de reactancia (VBR, por sus siglas en inglés), consiste en representar la máquina de inducción trifásica mediante tres impedancias y tres fuentes de tensión, una por cada fase (*abc*). Los modelos VBR son muy convenientes para su utilización en programas de simulación circuital tales como PSIM, Simulink, SPICE, Proteus, ATP, entre muchos otros, y ofrecen ventajas en términos de precisión numérica y eficiencia [2, 3, 4]. Estos modelos VBR permiten una interconexión directa con circuitos eléctricos externos tales como inversores o controladores electrónicos ampliamente utilizados en la industria.

En el grupo de investigación en energía (GIE) de la Universidad Politécnica Salesiana - Sede Cuenca, se han realizado varias investigaciones relativas a la modelación de máquinas eléctricas utilizando el método VBR [5, 4, 3, 6]. Todos estos trabajos se han implementado utilizando la herramienta Matlab/Simulink, pero en este proyecto se plantea reproducir estos resultados utilizando el programa ATPDraw, que es una interfaz gráfica y más amigable del programa ATP-EMTP. Ambas herramientas poseen un módulo de programación denominado MODELS [7, 8], que permite simulaciones extendidas fuera de los modelos disponibles en estos programas.

El programa ATP-EMTP es una herramienta que permite la simulación digital de fenómenos permanentes o transitorios de naturaleza electromagnética y electromecánica con fines de diseño, especificación de equipos o definición de parámetros eléctricos. Este programa calcula sistemas eléctricos, monofásicos o polifásicos, determinando el valor que adquieren las variables a lo largo del tiempo. Los modelos del sistema se obtienen mediante la aplicación de la regla trapezoidal [7], para representar el comportamiento de los distintos elementos constitutivos: resistencias, inductancias, condensadores, elementos de parámetros concentrados y/o distribuidos, máquinas, interruptores, etc. La capacidad de esta herramienta permite la resolución de siste-

mas de hasta 6000 nodos, 1000 ramas, 900 fuentes, 1200 interruptores, 90 máquinas síncronas y 2250 elementos no lineales [7].

Índice general

INTRODUCCIÓN	1
1 Problema de Estudio y Objetivos	2
1.1 Problema de Estudio	2
1.2 Grupo Objetivo	2
1.3 Objetivos	2
1.3.1 Objetivo General	2
1.3.2 Objetivos Específicos	2
1.4 Metodología Aplicada	3
2 Fundamentos Teóricos	4
2.1 Historia de la máquina de inducción	4
2.2 La máquina de inducción	4
2.3 Funcionamiento de la máquina de inducción	7
2.4 Modelo de la máquina de inducción	7
2.5 Modelo VBR de la máquina de inducción	10
3 El programa ATP-EMTP	12
3.1 Historia de ATP-EMTP	12
3.2 Licencia	12
3.3 Estructura general de un archivo para entrada de datos al ATP-EMTP	13
3.3.1 Formas generales para utilizar el programa	13
3.4 Ventanas operativas ATPDraw	13
3.5 MODELS	16
3.5.1 Definiciones de MODELS	16
3.5.2 Declaraciones [8]	17
3.5.3 Directivas de simulación [9]	17
3.5.4 Procedimientos de operación [9]	17
3.5.5 Lenguaje de MODELS [10]	17
3.5.6 Aspectos básicos del lenguaje de MODELS [11]	18
3.5.7 Características de simulación de MODELS [8]	18
3.5.8 Ejemplo del uso de MODELS para hacer algo simple	18
3.6 TACS	20
3.6.1 Componentes de TACS	20
3.6.2 Ejemplo del uso de TACS	22
3.7 Interrelaciones entre TACS, MODELS y el circuito	25
4 Simulaciones de la MI con VBR	28
4.1 Modelo VBR de una MI en ATPDraw	28
4.2 Modelo de la MI sin VBR	32

4.3	Modelo VBR de la MI en Simulink	33
4.3.1	Diagrama VBR de las corrientes del estator de MI	34
4.3.2	Diagrama VBR de la velocidad de la MI	34
4.3.3	Diagrama VBR de la MI para obtener el enlace de flujo y la FEM	35
4.4	Modelo dinámico de la MI en Simulink	35
4.5	Simulación de la MI con VBR en Simulink	36
4.5.1	Par Eléctrico T_e de la MI con VBR	36
4.5.2	Velocidad angular mecánica ω_m de la MI con VBR	37
4.5.3	Corrientes del estator i_a, i_b, i_c de la MI con VBR	37
4.6	Simulación de la MI con VBR en ATPDraw	38
4.6.1	Par Eléctrico T_e de MI con VBR	38
4.6.2	Velocidad angular mecánica ω_m de la MI con VBR	39
4.6.3	Corrientes del estator i_a, i_b, i_c de la MI con VBR	39
4.7	Simulación de la MI en Simulink	40
4.7.1	Par eléctrico T_e de MI equivalente	41
4.7.2	Velocidad angular mecánica ω_m de la MI equivalente	41
4.7.3	Corrientes del estator i_a, i_b, i_c de la MI equivalente en Simulink	42
4.8	Simulación de la MI equivalente en ATPDraw	43
4.8.1	Par eléctrico T_e de la MI	44
4.8.2	Velocidad angular mecánica ω_m de la MI	44
4.8.3	Corrientes del estator i_a, i_b, i_c de la MI equivalente	45
4.9	Simulaciones de la MI equivalente con VBR en Simulink	47
4.9.1	Par eléctrico T_e de la MI equivalente con VBR	47
4.9.2	Velocidad angular mecánica ω_m de la MI equivalente con VBR	47
4.9.3	Corrientes del estator i_a, i_b, i_c de la MI equivalente con VBR	48
4.10	Simulación de la MI equivalente con VBR en ATPDraw	49
4.10.1	Par eléctrico T_e de MI equivalente con VBR	49
4.10.2	Velocidad angular mecánica ω_m de la MI equivalente con VBR	49
4.10.3	Corrientes del estator i_a, i_b, i_c de la MI equivalente con VBR	50
5	Análisis de Resultados.	51
5.1	Comparaciones entre Simulink y ATPDraw de la MI con VBR	51
5.1.1	Par eléctrico T_e de la MI en VBR	51
5.1.2	Velocidad angular mecánica ω_m de la MI en VBR	52
5.1.3	Comparaciones entre las corrientes del estator i_a, i_b, i_c de la MI con VBR	54
5.2	Comparaciones entre Simulink y ATPDraw de la MI equivalente	57
5.2.1	Par eléctrico T_e de MI equivalente	58
5.2.2	Velocidad angular mecánica ω_m de la MI equivalente	59
5.2.3	Corrientes del estator i_a, i_b, i_c de la MI equivalente	60
5.3	Comparaciones de la MI equivalente con VBR entre Simulink y ATP-Draw	63
5.3.1	Par eléctrico T_e de la MI equivalente con VBR	64
5.3.2	Velocidad angular mecánica ω_m de la MI equivalente con VBR	65
5.3.3	Corrientes del estator i_a, i_b, i_c de la MI equivalente con VBR	66

6	Conclusiones y Recomendaciones	70
6.1	Conclusiones	70
6.2	Recomendaciones	71
A	Anexos	72
A.1	Anexo 1: Modelo dinámico de la máquina de inducción con VBR en ATPDraw	72
A.2	Anexo 2: Código implementado en MODEL	73
A.3	Anexo 3: Modelado dinámico de la máquina de inducción equivalente	75
A.4	Anexo 4: Parámetros de la máquina de inducción equivalente	76
A.5	Anexo 5: Modelo dinámico de la máquina de inducción con VBR en Simulink	77
A.6	Anexo 6: Modelo VBR de la máquina de inducción	78
A.7	Anexo 7: Modelos de la máquina de inducción equivalente en Simulink	79
	Bibliografía	80

Índice de figuras

2.1. Máquina de inducción.	5
2.2. Detalles del estator de la máquina de inducción.	5
2.3. Partes de un rotor tipo jaula de ardilla.	6
2.4. Rotor bobinado o con anillos.	6
2.5. Diagrama esquemático de las bobinas de una máquina de inducción trifásica en el rotor y estator.	8
2.6. Modelo VBR de la máquina de inducción en Simulink. [6]	11
3.1. Menú principal de ATPDraw.	14
3.2. Sintaxis utilizada para la definición de un modelo.	16
3.3. Circuito utilizando MODELS en ATPDraw.	18
3.4. Parámetros de la fuente del circuito.	19
3.5. Programación dentro de Models.	19
3.6. Voltaje de la fuente del circuito.	20
3.7. Voltaje y corriente de salida del modelo.	20
3.8. Tipo de fuentes en TACS.	21
3.9. Bloque de función de transferencia en TACS.	21
3.10. Bloque Device en TACS.	22
3.11. Probadores de TACS.	22
3.12. Circuito utilizado en TACS en ATPDraw.	23
3.13. Parámetros de la fuente.	23
3.14. Parámetros de la fuente en TACS.	23
3.15. Parámetros establecido en Fortran de TACS.	24
3.16. Voltaje de la fuente en TACS.	24
3.17. Voltaje de salida del circuito en ATPDraw.	25
3.18. Circuito básico entre TACS y MODELS.	25
3.19. Parámetros del circuito en ATPDraw.	26
3.20. Programación en MODELS.	26
3.21. Voltaje de la fuente del circuito implementado en ATPDraw.	27
3.22. Voltaje de salida del circuito pasando por TACS.	27
3.23. Voltaje de salida del circuito pasando por MODELS.	27
4.1. Diseño de un modelo dinámico VBR de la máquina de inducción en ATPDraw.	29
4.2. Diseño de un modelo dinámico de la máquina de inducción equivalente en ATPDraw.	33
4.3. Modelo dinámico VBR de la máquina de inducción.	33
4.4. Modelo dinámico VBR de la máquina de inducción en Simulink.	34
4.5. Diagrama VBR de las corrientes i_a, i_b, i_c	34
4.6. Diagrama VBR de la velocidad de la MI.	35
4.7. Diagrama VBR de MI para obtener el enlace de flujo y la fem.	35

4.8. Modelo dinámico de la máquina de inducción equivalente en Simulink.	36
4.9. Par eléctrico T_e de la máquina de inducción con VBR en Simulink. . .	37
4.10. Velocidad angular mecánica ω_m de la MI en VBR en Simulink.	37
4.11. Corrientes del estator i_a, i_b, i_c en Simulink de la máquina de inducción con VBR.	38
4.12. Par eléctrico T_e en ATPDraw de la máquina de inducción con VBR. . .	39
4.13. Velocidad angular mecánica ω_m en ATPDraw de la MI con VBR. . .	39
4.14. Corrientes del estator i_a, i_b, i_c en ATPDraw de la MI con VBR. . . .	40
4.15. Par eléctrico T_e en Simulink de la MI equivalente.	41
4.16. Velocidad angular mecánica ω_m en Simulink de la MI equivalente. . .	42
4.17. Corrientes del estator i_a, i_b, i_c en Simulink de la máquina de inducción equivalente.	43
4.18. Parámetros de la fuente en ATPDraw de la MI equivalente.	44
4.19. Par eléctrico T_e en ATPDraw de la MI equivalente.	44
4.20. Velocidad angular mecánica ω_m en ATPDraw de la MI equivalente. . .	45
4.21. Corrientes del estator i_a, i_b, i_c en ATPDraw de la MI equivalente. . .	46
4.22. Par eléctrico T_e en Simulink de la MI equivalente con VBR.	47
4.23. Velocidad angular mecánica ω_m en Simulink de la MI equivalente con VBR.	47
4.24. Corrientes del estator i_a, i_b, i_c en Simulink de la MI equivalente con VBR.	48
4.25. Par eléctrico T_e en ATPDraw de la MI equivalente con VBR.	49
4.26. Velocidad angular mecánica ω_m en ATPDraw de la MI equivalente con VBR.	49
4.27. Corrientes del estator i_a, i_b, i_c en ATPDraw de la MI equivalente con VBR.	50
5.1. Comparación del par eléctrico T_e entre Simulink y ATPDraw de la MI con modelo VBR.	51
5.2. Comparación y error del par eléctrico T_e entre Simulink y ATPDraw de la máquina de inducción con modelo VBR.	52
5.3. Error del par eléctrico T_e (ATPDraw - Simulink) de la MI con modelo VBR.	52
5.4. Comparación de la velocidad angular mecánica ω_m entre Simulink y ATPDraw de la MI con modelo VBR.	53
5.5. Comparaciones y error de la velocidad angular ω_m entre Simulink y ATPDraw de la MI con modelo VBR.	53
5.6. Error de la velocidad angular mecánica ω_m entre Simulink y ATPDraw de la MI con modelo VBR.	54
5.7. Comparación entre Simulink y ATPDraw de las corrientes del estator de la máquina de inducción con modelo VBR.	55
5.8. Comparaciones y error entre Simulink y ATPDraw de las corrientes del estator de la máquina de inducción con modelo VBR.	56
5.9. Errores de las corrientes del estator i_a, i_b, i_c entre Simulink y ATPDraw de la máquina de inducción con modelo VBR.	57
5.10. Comparación del par eléctrico T_e entre Simulink y ATPDraw de la MI equivalente.	58

5.11. Comparación y error del par eléctrico T_e entre Simulink y ATPDraw de la MI equivalente.	58
5.12. Error del par eléctrico T_e (Simulink - ATPDraw) de la MI equivalente.	59
5.13. Comparación de la velocidad angular mecánica ω_m entre Simulink y ATPDraw de la MI equivalente.	59
5.14. Comparación y error de la velocidad angular mecánica ω_m entre Simulink y ATPDraw de la MI equivalente.	60
5.15. Error de la velocidad angular mecánica ω_m (Simulink - ATPDraw) de la MI equivalente.	60
5.16. Comparación de las corrientes del estator i_a, i_b, i_c entre Simulink y ATPDraw de la MI equivalente.	61
5.17. Comparación y error de las corrientes i_a, i_b, i_c entre Simulink y ATPDraw de la MI equivalente.	62
5.18. Error de las corrientes del estator i_a, i_b, i_c (Simulink - ATPDraw) de la MI equivalente.	63
5.19. Comparación del par eléctrico T_e entre Simulink y ATPDraw de la MI equivalente con modelo VBR.	64
5.20. Comparación y error del par eléctrico T_e entre Simulink y ATPDraw de la MI equivalente con modelo VBR.	64
5.21. Error del par eléctrico T_e (Simulink - ATPDraw) de la MI equivalente con modelo VBR.	65
5.22. Comparación de la velocidad angular mecánica ω_m entre Simulink y ATPDraw de la MI equivalente con modelo VBR.	65
5.23. Comparación y error de la velocidad angular mecánica ω_m entre Simulink y ATPDraw de la MI equivalente con modelo VBR.	66
5.24. Error de la velocidad angular mecánica ω_m (Simulink - ATPDraw) de la MI equivalente con modelo VBR.	66
5.25. Comparación de las corrientes i_a, i_b, i_c entre Simulink y ATPDraw de la MI equivalente con modelo VBR.	67
5.26. Comparación y el error de las corrientes i_a, i_b, i_c entre Simulink y ATPDraw de la MI equivalente con modelo VBR.	68
5.27. Error de las corrientes del estator i_a, i_b, i_c (Simulink - ATPDraw) de la MI equivalente con modelo VBR.	69
A.1. Modelo dinámico de la MI con VBR en ATPDraw.	72
A.2. Modelado dinámico de la máquina de inducción equivalente en ATPDraw.	75
A.3. Modelado dinámico de MI con VBR en Simulink.	77
A.4. Modelo VBR de la máquina de inducción en Simulink.	78
A.5. Modelo de la MI equivalente en Simulink.	79

Índice de cuadros

4.1. Parámetros de la máquina de inducción en VBR.	36
4.2. Parámetros de la máquina de inducción equivalente.	41
A.1. Parámetros de la máquina de inducción equivalente.	76

Glosario

DFIG	Generadores de inducción doblemente alimentados.
e_a, e_b, e_c	Fuerzas electromotrices detrás de las reactancias.
f	Frecuencia.
GIE	Grupo de investigación de energías de la Universidad Politécnica Salesiana.
FEM	Fuerza electromotriz.
F_{rx}	Componentes real del flujo rotórico.
F_{ry}	Componente imaginaria del flujo rotórico.
i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}	Corrientes del estator.
J	Inercia.
K_r	Coeficiente de fricción.
L_{le}	Inductancia del estator.
L_{lr}	Inductancia del rotor.
M_{er}	Inductancia mutua.
MI	Máquina de inducción.
p	Pares de polos.
pF_{xy}	Flujos del rotor.
pF_{xy}	Flujos del rotor.
pwm	Velocidad angular.
T_e	Par eléctrico.
VBR	Voltage behind reactance (por sus siglas en inglés).
WECS	Sistemas de generación eólica.
ω_m	Velocidad angular mecánica.

INTRODUCCIÓN

Las máquinas de inducción tienen un circuito magnético sin polos salientes estando ranurados tanto el estator como el rotor, los cuáles van a estar sometidos a la acción de campos magnéticos giratorios que darán lugar a pérdidas magnéticas. En consecuencia, ambos órganos de la máquina se fabrican a base de apilar chapas delgadas de acero al silicio para reducir estas pérdidas. El documento que se presenta contiene el desarrollo de un modelo dinámico de la máquina de inducción en VBR realizada en Simulink, este modelo de la máquina se simulará también en el software ATPDraw que es un programa para simulaciones de sistemas eléctricos enfocados a la simulación de transitorios electromagnéticos y electromecánicos en sistemas polifásicos, implantado el modelo que se desarrolló en Simulink se procede a comparar los resultados del par, velocidad y corrientes de la máquina y posibles errores entre los dos simuladores.

1 Problema de Estudio y Objetivos

1.1. Problema de Estudio

El modelo VBR de una máquina de inducción puede mejorar la precisión numérica y la eficiencia de cálculo, en comparación con la representación tradicional qd o en los basados en el dominio de fase. El modelo desarrollado consiste en utilizar un circuito constituido por una fuente de voltaje detrás de la reactancia (VBR, por sus siglas en inglés). En este trabajo se presenta un modelo existente en el cual se modela en la herramienta ATPDraw y en MATLAB/Simulink, con el objetivo de realizar una comparación entre estos dos simuladores. Para implantar este modelo en ATPDraw se utiliza la programación en MODELS, que es un lenguaje de programación que permite hacer cálculos directos que pueden ser enviados a los modelos circuitales o recibir variables medidas de estos. En este trabajo se presentan los modelos realizados en ambos simuladores, con el fin de probar la similitud de resultados de la máquina de inducción. También se realizan comparaciones de los resultados con otros modelos disponibles en MATLAB y ATP-EMTP.

1.2. Grupo Objetivo

La importancia de este proyecto de titulación radica en la incorporación de modelos VBR de las máquinas de inducción, que beneficiará a investigadores en el área de máquinas eléctricas. Será un aporte importante para los desarrollos en el área del Grupo de investigación de Energías de la Universidad Politécnica Salesiana (GIE), posibilitando la exploración de técnicas novedosas para el desarrollo de algunas investigaciones en el futuro.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Implementar en el programa ATPDraw el modelo dinámico de la máquina de inducción utilizando la metodología VBR y comparar los resultados obtenidos con otros métodos de simulación.

1.3.2. Objetivos Específicos

1. Desarrollar el modelo VBR de la máquina de inducción para análisis dinámico para su implantación en el programa ATP.

2. Implantación del modelo desarrollado en ATPDraw.
3. Comparación de los resultados de la implantación con programas desarrollados en MATLAB y modelos preexistentes en Simulink y en ATP.

1.4. Metodología Aplicada

La metodología utilizada en esta investigación es de tipo cuantitativo y sistemática. El desarrollo de modelos en ATPDraw y el uso de la herramienta MODELS permite el estudio sistemático de los diferentes modelos que son comparados con modelos previos desarrollados en otras herramientas. La comparación de estos modelos permite determinar la posible efectividad del ATP-EMTP y MODELS para la simulación VBR de la máquina de inducción.

2 Fundamentos Teóricos

2.1. Historia de la máquina de inducción

El desarrollo de las máquinas de inducción tuvo que esperar hasta la aparición de los sistemas eléctricos de corriente alterna, debido a que con su irrupción comenzaron los primeros estudios para adaptar los motores existentes al nuevo sistema eléctrico, con el objetivo de aprovechar las ventajas que ofrecía el uso de la corriente alterna. El primer trabajo original desarrollado se anunció en 1888 por Galileo Ferraris en Italia [12], dos meses antes que Nikola Tesla presentase un trabajo similar en los Estados Unidos [12]. Ambos investigadores basaron sus diseños en sistemas bifásicos. Dos años más tarde, Westinghouse compró las patentes de Tesla y empezó a comercializar motores de inducción en 1890 alimentados a una frecuencia de 60 Hz [12].

En 1890 Mikhail Dolivo Dobrovolsky, desarrolló el motor asíncrono empleando un rotor en forma de jaula de ardilla y utilizando un devanado distribuido en el estator [13].

En 1821 se elabora el primer motor eléctrico, utilizando la inducción electromagnética, el cual es un fenómeno para la producción de fuerza electromotriz (fem), este fenómeno es reportado por Michael Faraday en el año de 1831 [14].

Algunas mejoras de la máquina de inducción suceden posteriormente a 1941, debido al avance de la electrónica. Inicialmente, los motores trabajaban en régimen constante, después de esto, fue posible utilizar la máquina en accionamientos a velocidad variable [14].

En la actualidad los motores de inducción son utilizados en gran parte en la industria, siendo estos cada vez más pequeños y eficientes con la energía que manejan. Estos motores en la actualidad son de gran actualidad para las industrias [15].

En la actualidad los motores de inducción están evolucionando hacia reluctancia variable y optimizado su eficiencia, utilizando programas de elementos finitos para su diseño y incluyendo nuevos materiales [16].

2.2. La máquina de inducción

Las máquinas de inducción tienen un circuito magnético sin polos salientes. Tanto el estator como el rotor, poseen ranuras para alojar los conductores que producen los campos magnéticos. Estos campos magnéticos son giratorios para obtener el par en el eje de la máquina. Para reducir las pérdidas en el hierro de estas máquinas, ambos elementos, estator y rotor, se fabrican apilando chapas delgadas de acero al silicio. En la Fig. 2.1 se observa la máquina de inducción, indicando sus respectivas partes [17].

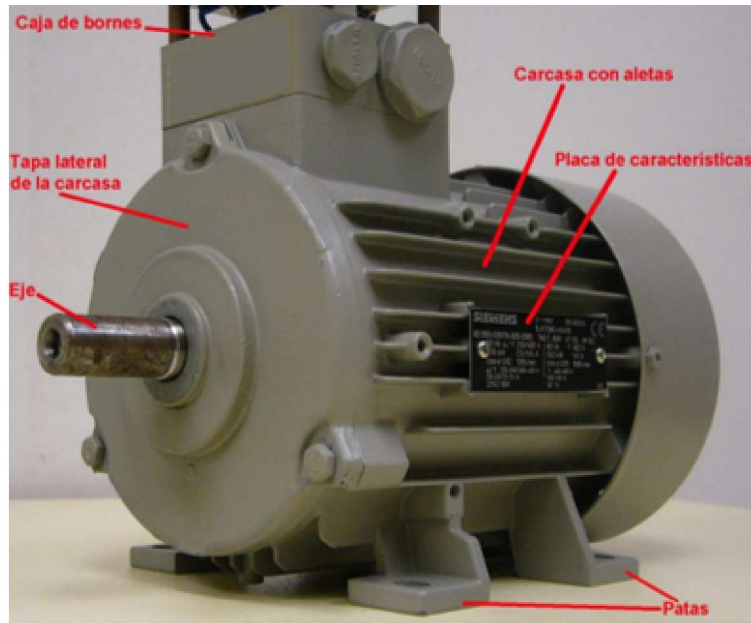


Figura 2.1: Máquina de inducción.

El devanado del estator normalmente es trifásico como se observa en la Fig. 2.2, aunque en máquinas de pequeña potencia también puede ser monofásico o bifásico. El devanado del rotor suele ser polifásico. Ambos devanados siempre tienen el mismo número de pares de polos p , independientemente del número de fases m [18, 19].

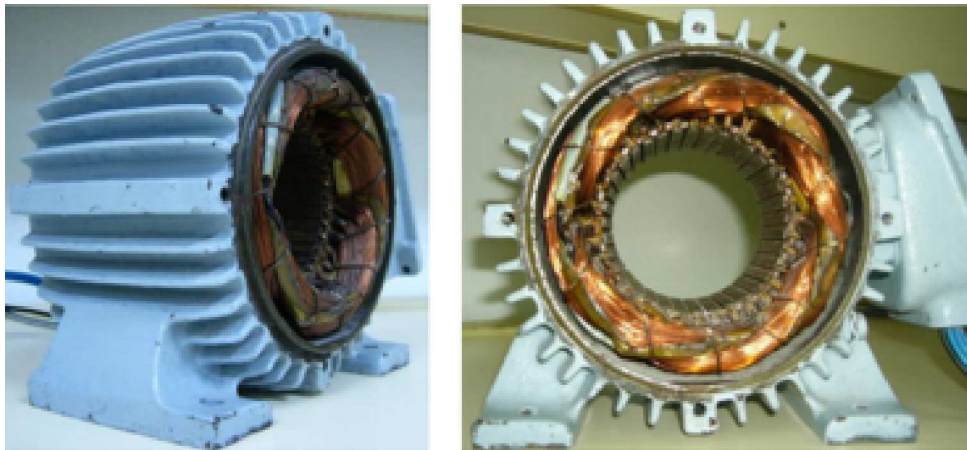
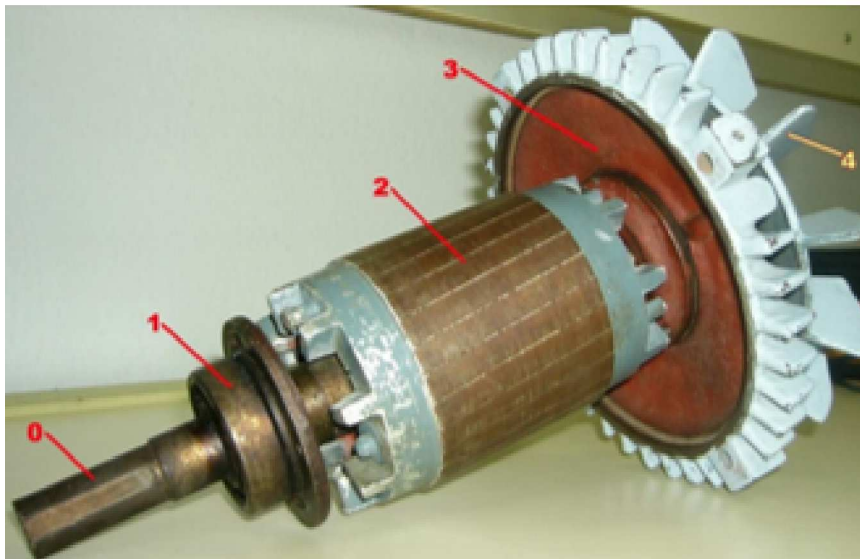


Figura 2.2: Detalles del estator de la máquina de inducción.

El devanado del rotor forma un circuito cerrado por el que circulan corrientes forzadas por las fuerzas electromotrices inducidas por el campo magnético. El rotor puede ser de dos tipos: de jaula de ardilla y de rotor bobinado. En la Fig. 2.3, se

observa el rotor tipo jaula de ardilla. Además se indica cada parte del rotor [18]:



0	Eje mecánico
1	Rodamiento
2	Rotor de Jaula de Ardilla
3	Tapa posterior de la carcasa
4	Ventilador

Figura 2.3: Partes de un rotor tipo jaula de ardilla.

En la Fig. 2.4 se observa el rotor bobinado o conocido también de anillos deslizantes [19]. En los sistemas de generación eólica, (WECS, por sus siglas en inglés), es muy frecuente denominar estas máquinas (DFIG, por sus siglas en inglés) o generadores de inducción doblemente alimentados.



Figura 2.4: Rotor bobinado o con anillos.

2.3. Funcionamiento de la máquina de inducción

En este tipo de máquina, el bobinado del estator permite la circulación de un sistema equilibrado de corrientes que da lugar, en virtud del Teorema de Ferraris [20], a un campo magnético giratorio cuya velocidad es la conocida como velocidad de sincronismo. Cuando esta velocidad se mide en *rpm* se la denomina n y se calcula a partir de la frecuencia f de las corrientes del estator y el número de pares de polos p de la máquina, mediante la expresión,

$$n = \frac{60 \times f}{p} \quad (2.1)$$

Como el rotor gira a una velocidad diferente a la del campo magnético del estator, sus bobinas están sometidas a la acción de un flujo magnético variable y se inducen fuerzas electromotrices de rotación en ellas. El devanado del rotor está en cortocircuito, y por esta razón las FEM inducidas producen la circulación de corrientes en el rotor que, generan un campo magnético rotatorio. Este, al interactuar con el campo magnético del estator, originan el par eléctrico sobre el eje de la máquina. Este par eléctrico intentará reducir las variaciones de flujo magnético en el devanado del rotor, tratando de hacerlo girar a la misma velocidad que el campo magnético giratorio [19].

La velocidad de las máquinas de inducción con carga es ligeramente distinta a la de sincronismo, de ahí su nombre de asíncronas. Por otra parte, las corrientes que circulan por el rotor aparecen debido a las fuerzas electromotrices inducidas por el campo estático, y por esta razón también se las conoce como máquinas de inducción [19].

Cuando la máquina actúa como motor, que es generalmente su funcionamiento más habitual, la velocidad del rotor es inferior a la de sincronismo y se genera un par motor. Para que esta máquina actúe como generador es preciso accionar su eje con una máquina motriz externa, superando la velocidad de sincronismo. En este caso aparece un par de frenado en el eje [19].

2.4. Modelo de la máquina de inducción

En la Fig. 2.5, se presenta el esquema básico de las bobinas de una máquina de inducción cuyo rotor y estator son trifásicos. El modelo se puede establecer para un número arbitrario de fases tanto en el estator, como en el rotor. Como la mayoría de los motores de inducción de uso industrial son trifásicos en el estator, se desarrolla el modelo para un caso particular donde el rotor y el estator son trifásicos, y con esto el análisis no pierde generalidad. Normalmente las bobinas rotóricas se encuentran en cortocircuito. Por otra parte, en el estator se aplica generalmente un sistema trifásico y balanceado de tensiones sinusoidales. En los modelos convencionales de la máquina de inducción se desprecian los efectos que produce el ranurado, la distribución de los devanados, las excentricidades estáticas y dinámicas y en ciertos casos las pérdidas en el hierro y las pérdidas mecánicas [18].

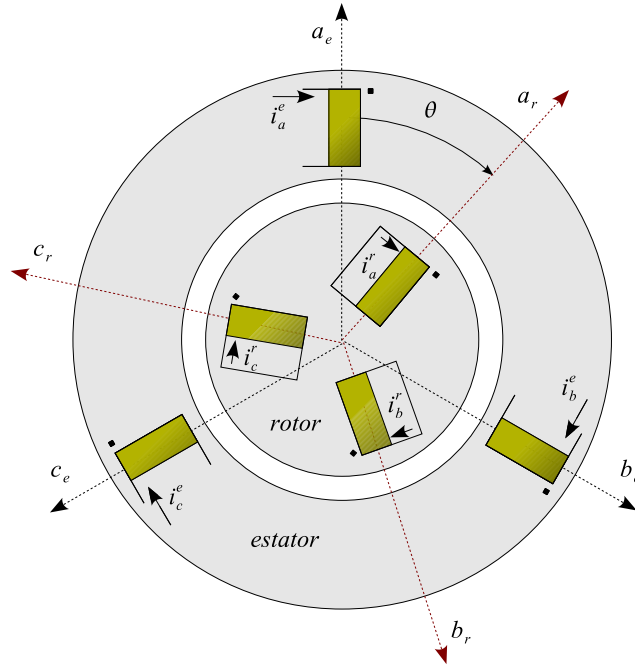


Figura 2.5: Diagrama esquemático de las bobinas de una máquina de inducción trifásica en el rotor y estator.

Las ecuaciones diferenciales que rigen el comportamiento de la máquina de inducción en el sistema de coordenadas indicado en la figura 2.5 son [18]:

$$[\mathbf{v}] = [\mathbf{R}] [\mathbf{i}] + p[\lambda] = [\mathbf{R}] [\mathbf{i}] + [\mathbf{L}(\theta)] p[\mathbf{i}] + \dot{\theta} [\tau(\theta)] [\mathbf{i}] \quad (2.2)$$

$$T_e - T_m = \frac{1}{2} [\mathbf{i}]^t [\tau] [\mathbf{i}] - T_m = J\ddot{\theta} + \rho\dot{\theta} \quad (2.3)$$

donde:

$$[\mathbf{R}] = \begin{bmatrix} [\mathbf{R}_{ee}] & [\mathbf{R}_{er}] \\ [\mathbf{R}_{re}] & [\mathbf{R}_{rr}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_e [\mathbf{I}] & [\mathbf{0}] \\ [\mathbf{0}] & R_r [\mathbf{I}] \end{bmatrix},$$

$$[\mathbf{L}(\theta)] = \begin{bmatrix} [\mathbf{L}_{ee}] & [\mathbf{L}_{er}(\theta)] \\ [\mathbf{L}_{re}(\theta)] & [\mathbf{L}_{rr}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{\sigma e} [\mathbf{I}] + L_{me} [\mathbf{S}] & L_{er} [\mathbf{C}(\theta)] \\ L_{er} [\mathbf{C}(\theta)]^t & L_{\sigma r} [\mathbf{I}] + L_{mr} [\mathbf{S}] \end{bmatrix},$$

$$[\tau(\theta)] = \begin{bmatrix} \frac{d}{d\theta} [\mathbf{L}_{ee}] & \frac{d}{d\theta} [\mathbf{L}_{er}(\theta)] \\ \frac{d}{d\theta} [\mathbf{L}_{re}(\theta)] & \frac{d}{d\theta} [\mathbf{L}_{rr}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\mathbf{0}] & L_{er} \frac{d}{d\theta} [\mathbf{C}(\theta)] \\ L_{er} \frac{d}{d\theta} [\mathbf{C}(\theta)]^t & [\mathbf{0}] \end{bmatrix},$$

$$[\mathbf{I}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad [\mathbf{S}] = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & 1 & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix}; \quad [\mathbf{0}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$[\mathbf{C}(\theta)] = \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{4\pi}{3}) & \cos \theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{4\pi}{3}) & \cos \theta \end{bmatrix},$$

$$\frac{d}{d\theta} [\mathbf{C}(\theta)] = \begin{bmatrix} -\sin \theta & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta + \frac{4\pi}{3}) & -\sin \theta & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{4\pi}{3}) & -\sin \theta \end{bmatrix}.$$

Los parámetros que definen el comportamiento del modelo de la máquina de inducción en el sistema de coordenadas primitivas son:

- R_e : resistencia de cada una de las bobinas del estator
- R_r : resistencia de cada una de las bobinas del rotor
- $L_{\sigma e}$: inductancia de dispersión del estator
- $L_{\sigma r}$: inductancia de dispersión del rotor
- L_{me} : inductancia de magnetización del estator
- L_{mr} : inductancia de magnetización del rotor
- L_{er} : inductancia mutua de acoplamiento estator-rotor

El sistema conformado por las seis ecuaciones de tensión planteadas en (2.2) y el balance de par expresado en (2.3), representan el comportamiento dinámico de la máquina de inducción, pero la dependencia de la posición angular θ , complica notablemente la solución práctica de este modelo y resulta conveniente utilizar la técnica de transformación de coordenadas.

La transformación a vectores espaciales permite representar un sistema de tensiones, corrientes o flujos trifásicos mediante un vector en el espacio, cuya posición y magnitud dependen del tiempo [18]:

$$\mathbf{x}(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & e^{j\frac{2\pi}{3}} & e^{j\frac{4\pi}{3}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_a(t) \\ x_b(t) \\ x_c(t) \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_a(t) \\ x_b(t) \\ x_c(t) \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

La transformación del modelo de la máquina de inducción expresado en (2.2) y (2.3) se puede transformar a vectores espaciales mediante (2.4), de donde se obtiene [18]:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_e \\ \mathbf{v}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_e & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_e \\ \mathbf{i}_r \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} L_e & M_{er}e^{j\theta} \\ M_{er}e^{-j\theta} & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_e \\ \mathbf{i}_r \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

$$M_{er} \Im m \{ \mathbf{i}_e (\mathbf{i}_r e^{j\theta})^* \} - T_m(\dot{\theta}) = J\ddot{\theta} + \rho\dot{\theta} \quad (2.6)$$

Al referir las ecuaciones del rotor, al estator utilizando la transformación (2.7):

$$\mathbf{x}_r^e \equiv \mathbf{x}_r \cdot e^{j\theta} \quad (2.7)$$

se obtiene el modelo de la máquina de inducción, referido a coordenadas estatóricas:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_e \\ \mathbf{v}_r^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_e & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_e \\ \mathbf{i}_r^e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_e & M_{er} \\ M_{er} & L_r \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} \mathbf{i}_e \\ \mathbf{i}_r^e \end{bmatrix} - j\dot{\theta} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ M_{er} & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_e \\ \mathbf{i}_r^e \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

$$M_{er} \Im m \{ \mathbf{i}_e (\mathbf{i}_r^e)^* \} - T_m(\dot{\theta}) = J\ddot{\theta} + \rho\dot{\theta} \quad (2.9)$$

2.5. Modelo VBR de la máquina de inducción

Los vectores espaciales de los flujos del estator y rotor, son [6]:

$$\lambda_e = L_e \mathbf{i}_e + M_{er} \mathbf{i}_r^e \quad (2.10)$$

$$\lambda_r^e = M_{er} \mathbf{i}_e + L_r \mathbf{i}_r^e \quad (2.11)$$

La corriente del rotor referida al estator se obtiene a partir de :

$$\mathbf{i}_r^e = \frac{1}{L_r} (\lambda_r^e - M_{er} \mathbf{i}_e) \quad (2.12)$$

De la ecuación del rotor, extraída de (2.8), se obtiene:

$$\mathbf{0} = R_r \mathbf{i}_r^e + p \lambda_r^e - j \omega \lambda_r^e \Rightarrow p \lambda_r^e = -R_r \mathbf{i}_r^e + j \omega \lambda_r^e, \quad (2.13)$$

y de la ecuación de tensión del estator, obtenida de (2.8):

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_e &= R_e \mathbf{i}_e + L_e p \mathbf{i}_e + M_{er} p \mathbf{i}_r^e = \\ &= R_e \mathbf{i}_e + L_e p \mathbf{i}_e + \frac{M_{er}}{L_r} \left(-\frac{R_r}{L_r} (\lambda_r^e - M_{er} \mathbf{i}_e) + j \omega \lambda_r^e - M_{er} p \mathbf{i}_e \right) \end{aligned} \quad (2.14)$$

Agrupando términos semejantes, se obtiene,

$$\mathbf{v}_e = \left(R_e + R_r \frac{M_{er}^2}{L_r^2} \right) \mathbf{i}_e + \left(L_e - \frac{M_{er}^2}{L_r} \right) p \mathbf{i}_e + \frac{M_{er}}{L_r} \left(j \omega - \frac{R_r}{L_r} \right) \lambda_r^e, \quad (2.15)$$

donde la tensión detrás de la reactancia es:

$$\mathbf{e}_e = \frac{M_{er}}{L_r} \left(j \omega - \frac{R_r}{L_r} \right) \lambda_r^e, \quad (2.16)$$

y los parámetros constantes del circuito equivalente son:

$$R_{eq} = R_e + R_r \frac{M_{er}^2}{L_r^2} \quad (2.17)$$

$$L_{eq} = L_e - \frac{M_{er}^2}{L_r} \quad (2.18)$$

y el enlace de flujo del rotor se obtiene integrando (2.19):

$$p \lambda_r^e = \left(-\frac{R_r}{L_r} + j \omega \right) \lambda_r^e + R_r \frac{M_{er}}{L_r} \mathbf{i}_e \quad (2.19)$$

El paso siguiente consiste en convertir las tensiones tras la reactancia a coordenadas primitivas:

$$\mathbf{e}_e = e_{ex} + j e_{ey} = \sqrt{\frac{2}{3}} (e_{ea} + \alpha e_{eb} + \alpha^2 e_{ec}) \quad (2.20)$$

y si no hay retorno por neutro,

$$e_{ca} = \sqrt{\frac{2}{3}} \Re e(\mathbf{e}_e) \quad (2.21)$$

$$e_{eb} = \sqrt{\frac{2}{3}} \Re e(\alpha^2 \mathbf{e}_e) \quad (2.22)$$

$$e_{ec} = \sqrt{\frac{2}{3}} \Re e(\alpha \mathbf{e}_e) \quad (2.23)$$

Finalmente el par eléctrico se obtiene de la siguiente forma,

$$T_e = p \Im m \{ \lambda_s \cdot (\mathbf{i}_e)^* \} = p (\lambda_{ex} i_{ey} - \lambda_{ey} i_{ex}) \quad (2.24)$$

donde p es el número de pares de polos de la máquina. En la Fig. 2.6, se puede observar la implementación del modelo VBR en Simulink para una máquina de inducción.

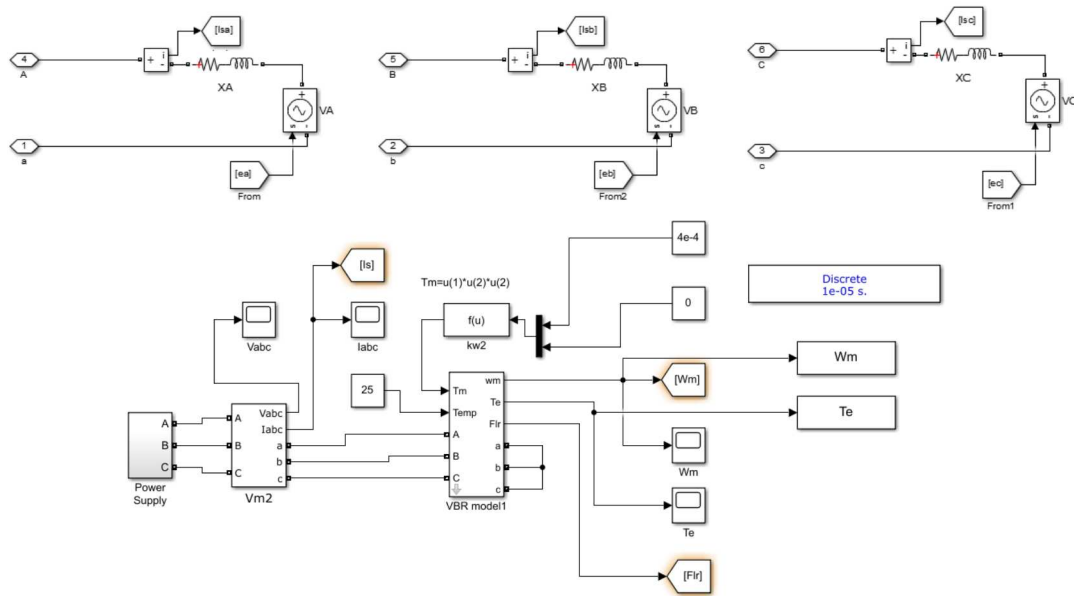


Figura 2.6: Modelo VBR de la máquina de inducción en Simulink. [6]

3 El programa ATP-EMTP

Alternative Transients Program (ATP) es un programa para simulaciones de sistemas eléctricos enfocados a la simulación de transitorios electromagnéticos y electromecánicos en sistemas polifásicos. ATP-EMTP fue desarrollado a partir de EMPT [21], en la década de los 70's, y aplicado a computadores personales, recibe la denominación ATP.

3.1. Historia de ATP-EMTP

El ATP fue desarrollado en su versión inicial por el Dr. Hermann Dommel a finales de la década de los 60 en Alemania (inicialmente con el nombre de EMTP), quien posteriormente vendería los derechos a la Bonneville Power Administration (BPA) de los Estados Unidos. A pesar de ser la BPA la que coordinara la distribución del programa entre los diferentes grupos de usuarios, muchas universidades contribuyeron al desarrollo de los diferentes modelos que constituyen lo que hoy es este programa. La implementación de nuevos modelos adicionales, se pueden realizar con TACS o con programación en la herramienta MODELS [22], ambos disponibles en ATP-EMTP.

El ATP permite hacer, entre otros, los siguientes estudios [22]:

- Simulación de arranque de motores.
- Evaluación de armónicos.
- Máquinas eléctricas.
- Simulación del control de las máquinas y del sistema de potencia.
- Calculo de parámetros en líneas aéreas y cables subterráneos.
- Estudios de ferorresonancia.
- Sobrevoltajes por maniobra.

3.2. Licencia

Aunque el programa puede ser adquirido sin costo, ATP no es de dominio público. Se requiere una licencia antes que los programas puedan ser recibidos por el interesado. Los requerimientos para usar el ATP son honestidad en su manejo y el compromiso de no participación en la comercialización de EMTP o de otros programas de simulación de transitorios [22].

El procedimiento e información adicional sobre los lineamientos pueden ser consultados en la pagina oficial del ATP: <https://www.emtp.org/>

3.3. Estructura general de un archivo para entrada de datos al ATP-EMTP

ATP se caracteriza por ser un programa de simulación digital el cual permite el análisis de transitorios electromagnéticos, armónicos, fenómenos dinámicos, fallas en sistemas de potencia y su análisis de régimen permanente. Este programa tiene una estructura de entrada de datos mediante líneas de 80 caracteres que tienen su origen en la programación del lenguaje FORTRAN. Esta estructura es complicada para el usuario y es la razón para el desarrollo de la interfaz ATPDraw que facilita la producción de esta entrada de datos [23].

3.3.1. Formas generales para utilizar el programa

Las formas generales de uso del software ATPDraw son las siguientes [23]:

- La primera forma consiste en simular un sistema de potencia para obtener su respuesta transitoria. Dentro del mismo se pueden tener elementos circuitales como un elemento de control que trabaje conjuntamente con la red.
- ATPDraw es utilizado para la determinación de parámetros de elementos que se encuentran dentro del sistema de potencia tales como: transformadores, líneas aéreas, cables, máquinas eléctricas, etc.

3.4. Ventanas operativas ATPDraw

ATPDraw utiliza una interfaz amigable entre el usuario que permite la facilidad de la entrada de datos. Cuenta con herramientas que permiten realizar cálculos de parámetros en líneas y cables de transmisión, máquinas eléctricas, transformadores y otros equipos. También permite realizar análisis de los estudios y producir gráficos de las variables deseadas. El software ATPDraw facilita el acceso a las diversas funciones que contiene, siendo los elementos del menú principal los siguientes [24]:

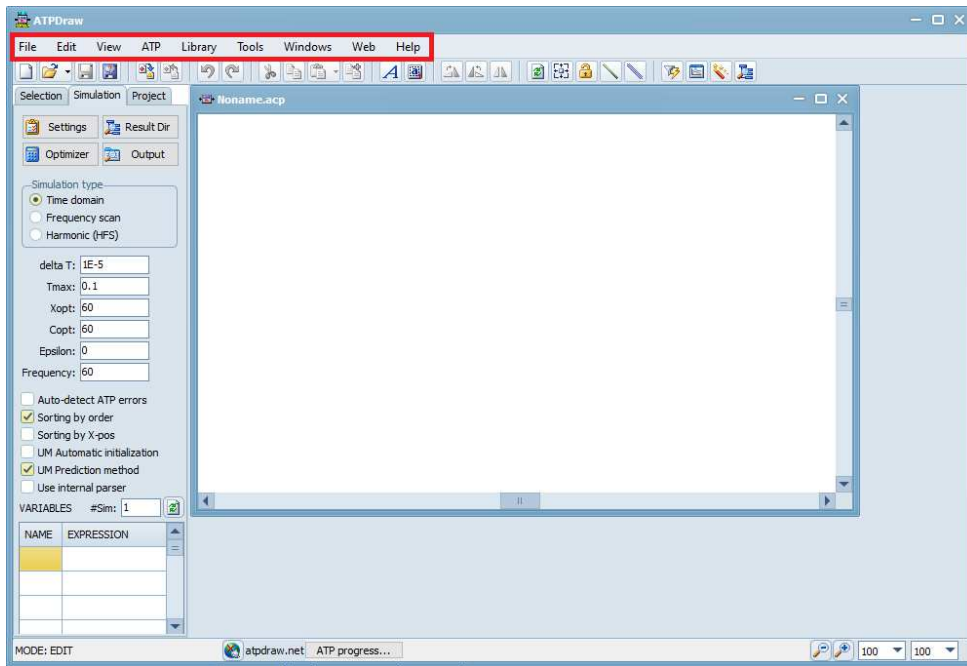
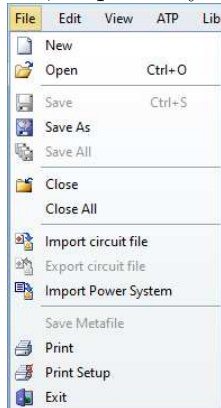
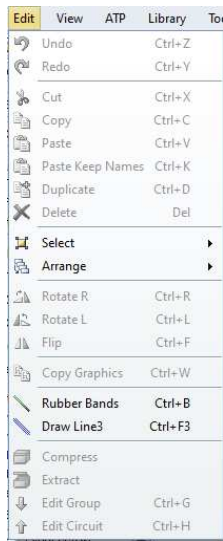


Figura 3.1: Menú principal de ATPDraw.

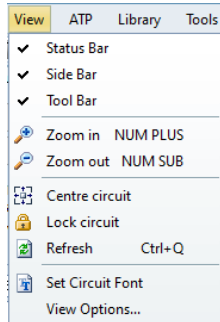
- File: crea, abre y guarda archivos de circuito, donde se puede imprimir, exportar, importar y crear un nuevo circuito.



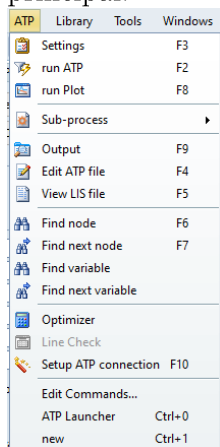
- Edit: se encarga de la edición del circuito como copiar, pegar, rotar, duplicar y eliminar el circuito.



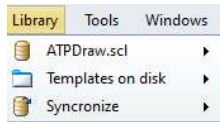
- View: la pestaña permite acceder a la barra de herramientas, la barra de estado donde se encuentra la línea de comentarios, las opciones de zoom, etc.



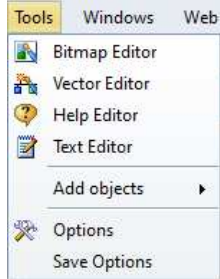
- ATP: en esta herramienta se encuentra:
- Setting: realiza los ajustes del programa donde se puede determinar el tiempo de simulación entre otros.
- Run ATP: ejecutable del programa realizado.
- Run Plot: envía a graficar los parámetros del circuito realizado en la pantalla principal.



- Library: permite editar archivos necesarios para la operación de diversas rutinas de ATP-EMTP y MODELS.



- Tools: sirve para editar los iconos, archivos, texto, permite configurar de diferentes formas el programa.



- Windows: permite organizar las ventanas del circuito.
- Help: sistema de archivos donde se encuentra ayuda especial de ATPDraw.

3.5. MODELS

ATPDraw permite que el usuario edite el modelo que está dentro de ATPDraw. Sus íconos automáticamente se adaptan a los cambios realizados. En el icono de modelo se puede estructurar un símbolo gráfico, determinando este como entrada al lado derecho, o como salida al lado izquierdo. Al finalizar el proceso y cerrar el diálogo, el módulo adquiere el nombre dado en el listado del programa [25].

3.5.1. Definiciones de MODELS

MODELS contiene un lenguaje de programación parecido a Pascal o a Python. Permite hacer cálculos más elaborados que *Tacs*, debido a que se puede usar sentencias como *for*, *if*, *while*, tiene acceso a más variables de la ejecución tales como *timex* o *timesteep*. MODELS permite acceder a más información que *Tacs*, se pueden manejar arrays, matrices, comparadores lógicos, etc. Se pueden colocar comentarios. Un modelo desarrollado en MODELS contiene declaraciones, directivas de simulación y procedimientos de operación [10].

En la Fig. 3.2, se observa la sintaxis utilizada para el manejo de la definición de modelos.

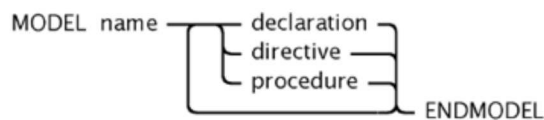


Figura 3.2: Sintaxis utilizada para la definición de un modelo.

3.5.2. Declaraciones [8]

CONST: especifica el rango de la matriz, valor y el nombre, de los elementos de retención asignados en el modelo internamente.

DATA: especifica el rango de la matriz, valor y el nombre, de los parámetros de datos de retención asignados en el modelo externamente.

VAR: especifica el rango de la matriz de las variables del modelo, elementos de valor variable que se asignan internamente y el nombre.

INPUT: especifica el nombre, el valor predeterminado en las entradas del modelo y el rango de la matriz.

OUTPUT: especifica que modelos del programa se pueden usar como salida en el modelo.

FUNCTION: especifica las funciones usadas en el modelo.

MODEL: especifica los submodelos que son utilizados dentro del modelo.

3.5.3. Directivas de simulación [9]

TIMESTEP: especifica un valor de los límites máximos y mínimos del paso del tiempo para el modelo.

INTERPOLATION: especifica el nivel de interpolación a usarse en las entradas del modelo.

DELAY: definen el tamaño del almacenamiento de los valores asociados a la función *delay()*.

HISTORY: definen el nombre de las variables para las cuales se debe especificar la función de historial al usar el modelo.

3.5.4. Procedimientos de operación [9]

EXEC: detalla la ejecución del algoritmo para el modelo.

INIT: detalla la inicialización del algoritmo para el modelo.

3.5.5. Lenguaje de MODELS [10]

El lenguaje que usa MODELS se basa en la descripción de parámetros, el cual está apoyado por herramientas usadas en la simulación que sirve para definir sistemas variantes en el tiempo. El lenguaje facilita el formato de la estructura del modelo y la función de cada uno de sus elementos. La representación de un modelo se autodocumenta y es utilizada como un documento para representar el sistema en forma de datos usados en simulación real.

3.5.6. Aspectos básicos del lenguaje de MODELS [11]

MODELS se caracteriza por ser un lenguaje de programación que está dirigido a una simulación en dominio del tiempo respaldada por una descripción técnica, generalmente se usa como herramienta para estudiar el comportamiento dinámico de sistemas complejos.

MODELS en ATPDraw es usado para detallar el funcionamiento de cada componente del circuito, se usa también para crear señales y mediciones de un circuito.

3.5.7. Características de simulación de MODELS [8]

- La simulación en MODELS permite realizar múltiples réplicas de un sistema en cada instante de tiempo, sus condiciones iniciales y sus dimensiones.
- Utilizan una combinación de métodos tales como: dependiente, predeterminado e integrado. Cada uno de ellos cumple una pre-simulación de sus entradas y variables.
- Controla la modificación de los valores en entradas y variables del modelo en el tiempo de la simulación.
- Modifica y controla la estructura del modelo tanto en topología y en el flujo algorítmico.

3.5.8. Ejemplo del uso de MODELS para hacer algo simple

Se realiza un ejemplo básico empleando MODELS, mediante este circuito se realiza un gráfico del voltaje y la corriente de la fuente.

En la Fig. 3.3, se observan el circuito utilizado para ejemplo.

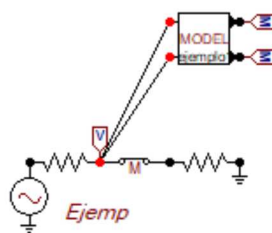


Figura 3.3: Circuito utilizando MODELS en ATPDraw.

En la Fig. 3.4, se observan los parámetros utilizados en la fuente del circuito a utilizar en el modelo.

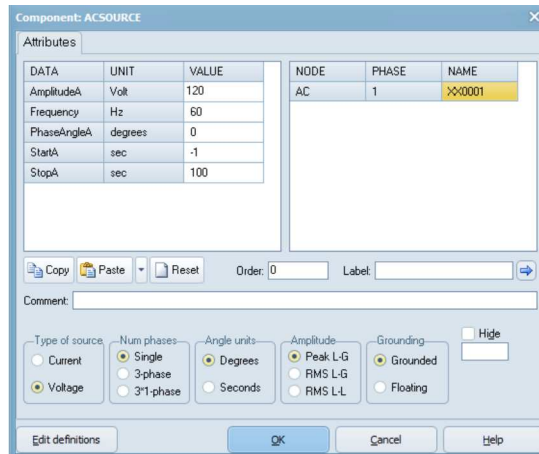


Figura 3.4: Parámetros de la fuente del circuito.

En la Fig. 3.5, se observa la programación dentro del modelo donde se inicializan las variables a ingresar, las entradas y salidas.

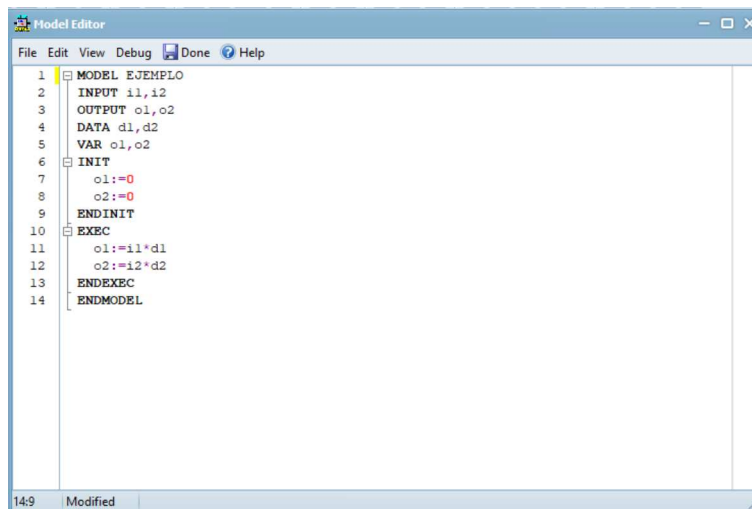


Figura 3.5: Programación dentro de Models.

En la Fig. 3.6, se observa el voltaje de la fuente del circuito de la red implementado para el ejemplo. Se ha utilizado el programa PLOTXY para realizar este gráfico a partir de los resultados de ATP-EMTP.

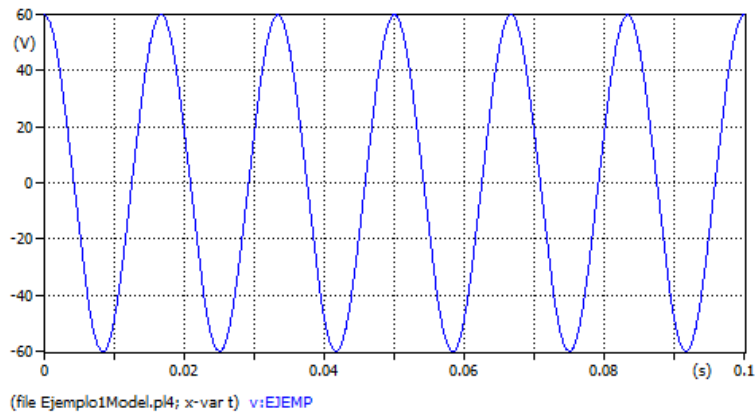


Figura 3.6: Voltaje de la fuente del circuito.

En la Fig. 3.7 se observa el voltaje y la corriente de salida del circuito, donde mediante las ecuaciones ingresadas dentro del modelo, se calcula el valor de la tensión y corriente de salida.

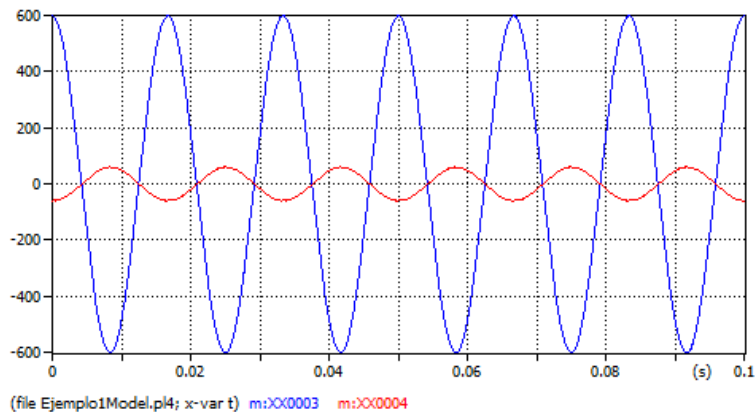


Figura 3.7: Voltaje y corriente de salida del modelo.

3.6. TACS

Transient analysis of control system (TACS) [26], son funciones de control que permiten efectuar acciones en el programa. Las funciones de TACS son muy variadas, incluyendo funciones trigonométricas, matemáticas, lógicas. Puede construir variables y procesar comandos FORTRAN. Esta herramienta permite modelar sistemas de control, excitación de máquinas, disparo de transistores en puentes, etc.

3.6.1. Componentes de TACS

Dentro de TACS se dispone de diferentes componentes, tales como: variables de circuito, variables de MODELS, constantes, diversos tipos de fuentes, funciones de transferencia, condiciones iniciales y sentencias en FORTRAN. En la Fig. 3.8, se observan las diferentes componentes disponibles en esta herramienta.

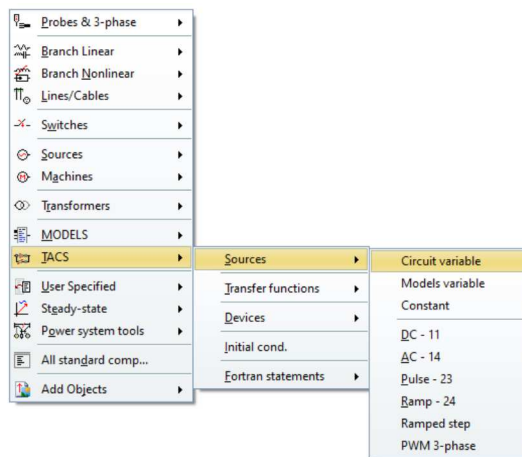


Figura 3.8: Tipo de fuentes en TACS.

En la Fig. 3.9, se observa el bloque de las funciones de transferencia. Estos componentes se definen mediante registros en un archivo de extensión, .DAT, que es un archivo de texto plano.

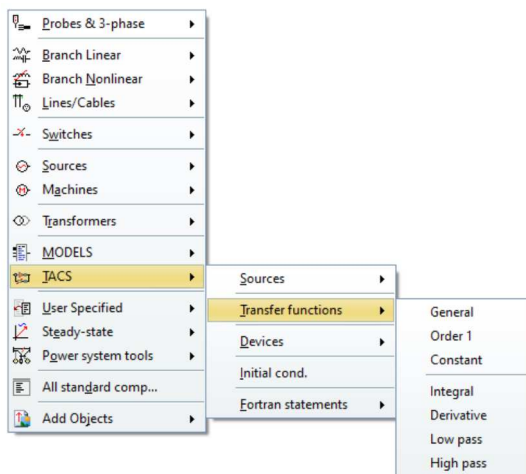


Figura 3.9: Bloque de función de transferencia en TACS.

En la Fig. 3.10, se observan los dispositivos TACS predefinidos en ATP-EMTP y accesible mediante ATPDraw tales como: relés, sensores, dispositivos de protección y para programación de PLC.

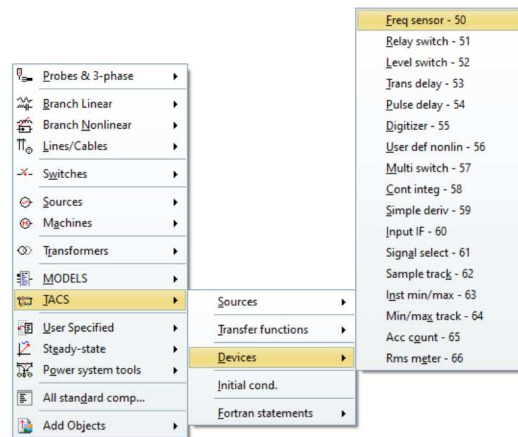


Figura 3.10: Bloque Device en TACS.

En la Fig. 3.11, se observan las especificaciones de las variables de salida en TACS. Estos valores son salvados después de la ejecución de ATPDraw en los archivos *.LIS y el *.PL4 para realizar los gráficos de estas variables.

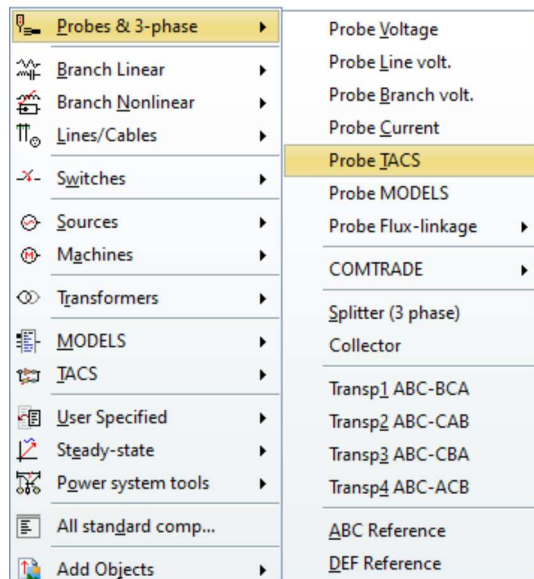


Figura 3.11: Probadores de TACS.

3.6.2. Ejemplo del uso de TACS

En la Fig. 3.12, se observa un ejemplo de un circuito básico, implementado en ATPDraw. Este modelo permite ilustrar las interrelaciones entre las variables del circuito y las funciones TACS.

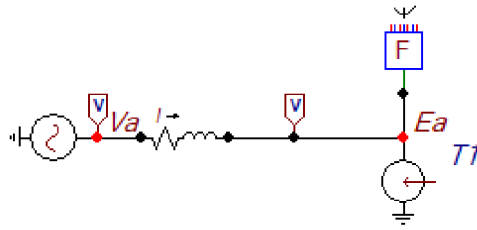


Figura 3.12: Circuito utilizado en TACS en ATPDraw.

En la Fig. 3.13, se observan los parámetros de la fuente utilizados para el control del circuito.

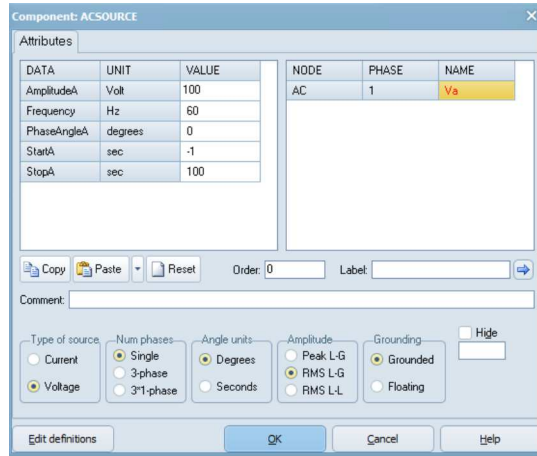


Figura 3.13: Parámetros de la fuente.

En la Fig. 3.14, se observa la fuente en TACS en donde se establecen los parámetros de tiempo de entrada y salida del circuito.

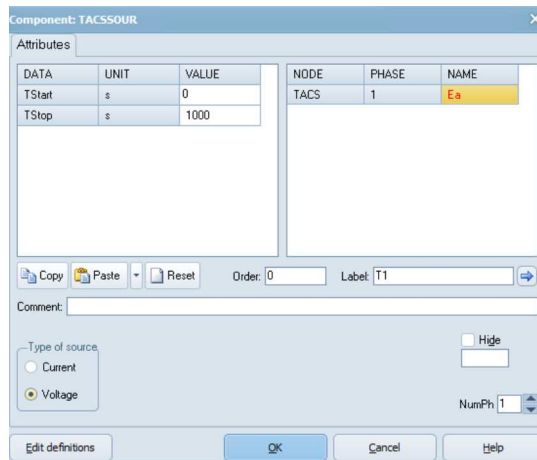


Figura 3.14: Parámetros de la fuente en TACS.

En la Fig. 3.15, se observa la función FORTRAN que permite establecer la función matemática del circuito.

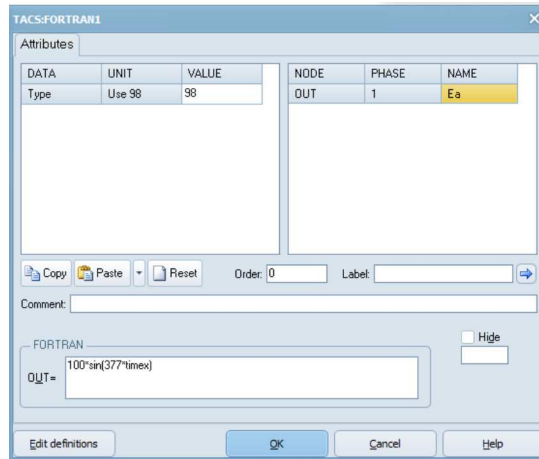


Figura 3.15: Parámetros establecido en Fortran de TACS.

En la Fig. 3.16, se observa la simulación del voltaje de la fuente en ATPDraw utilizando TACS.

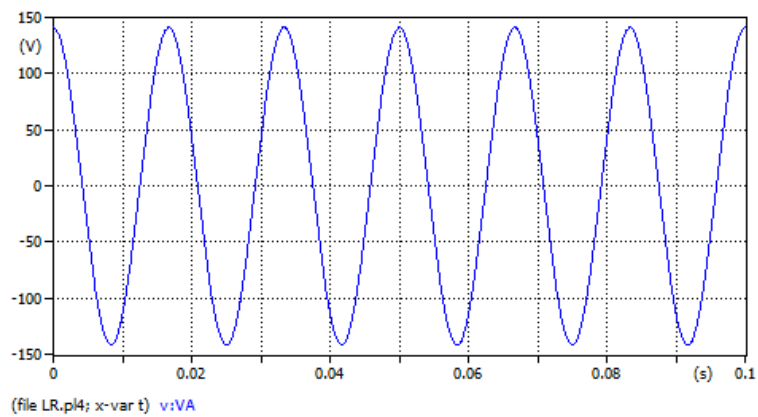


Figura 3.16: Voltaje de la fuente en TACS.

En la Fig. 3.17, se observa el voltaje de salida del circuito pasando por TACS.

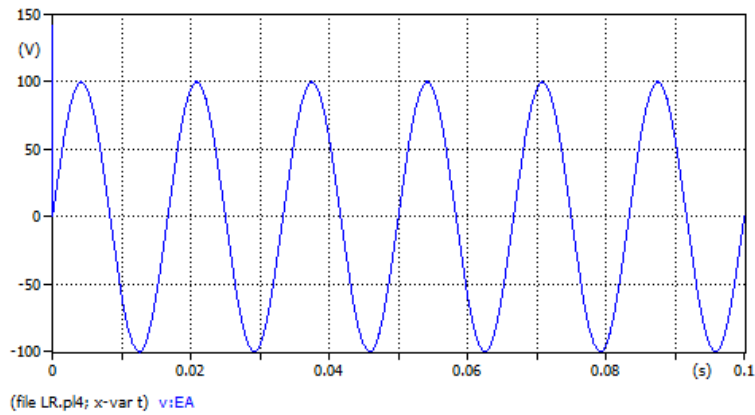


Figura 3.17: Voltaje de salida del circuito en ATPDraw.

3.7. Interrelaciones entre TACS, MODELS y el circuito

En la Fig. 3.18, se observa un circuito que muestra la interrelación entre TACS y MODELS. El interruptor de medición traspasa la corriente del circuito al módulo MODELS, donde se realizan ciertos cálculos y la salida de este módulo acciona las instrucciones en FORTRAN que activan a la fuente de tensión dependiente TACS.

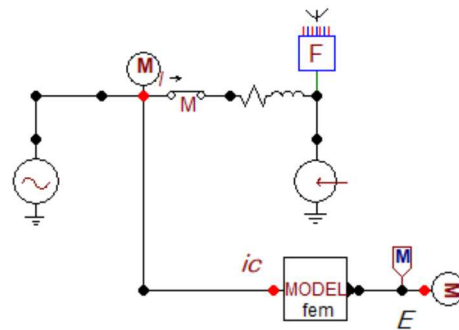


Figura 3.18: Circuito básico entre TACS y MODELS.

En la Fig. 3.19, se observan los valores de entrada de la fuente utilizados para el diseño del circuito implementado, donde el valor de inicio es de 0s y de fin es de 100s.

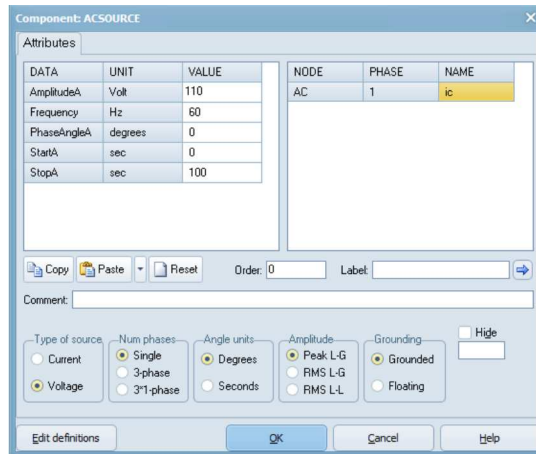


Figura 3.19: Parámetros del circuito en ATPDraw.

En la Fig. 3.20, se observa la programación realizada en el modelo, donde se interrelaciona TACS con MODELS, se ingresa el numero de entradas, salida y las variables que se van a utilizar en el circuito implementado.



Figura 3.20: Programación en MODELS.

En la Fig. 3.21, se observa el resultado de la simulación del voltaje de la fuente del circuito implementado en ATPDraw.

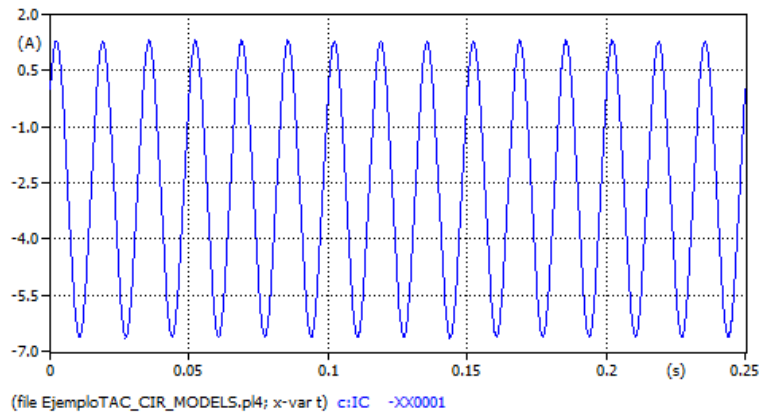


Figura 3.21: Voltaje de la fuente del circuito implementado en ATPDraw.

En la Fig. 3.22, se observa el voltaje de salida del circuito realizado en ATPDraw para la interconexión con MODELS - TACS.

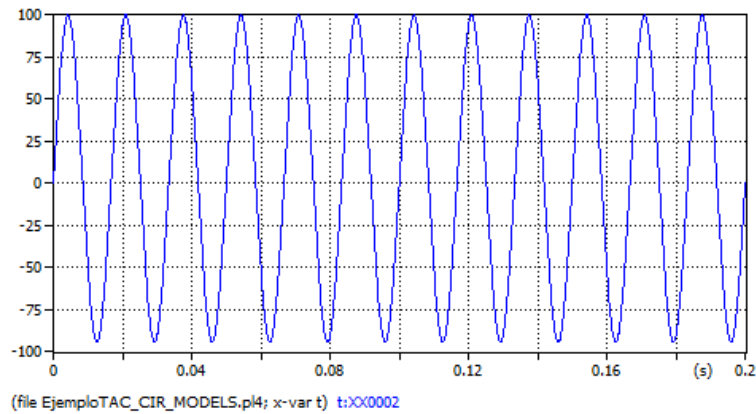


Figura 3.22: Voltaje de salida del circuito pasando por TACS.

En la Fig. 3.23, se observa el voltaje de salida del circuito realizado en ATPDraw para la interconexión con MODELS - TACS.

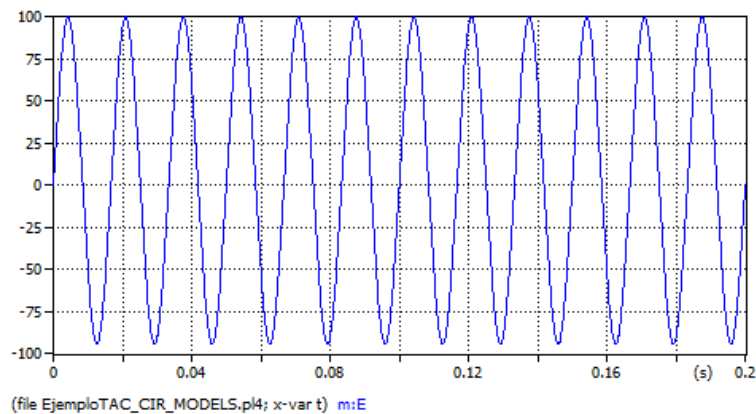


Figura 3.23: Voltaje de salida del circuito pasando por MODELS.

4 Simulaciones de la MI con VBR

En este capítulo se realizan las simulaciones respectivas de los resultados obtenidos para el diseño de un modelo dinámico utilizando el método de tensión tras una reactancia VBR, de la máquina de inducción en ATPDraw. Para desarrollar este objetivo, se inicia con el modelo de una máquina de inducción en VBR desarrollado previamente en MATLAB/Simulink, para posteriormente adaptarlo al ambiente ATPDraw.

4.1. Modelo VBR de una MI en ATPDraw

En la Fig. 4.1, se observa el modelo dinámico de una máquina de inducción realizada en el software ATPDraw. El modelo incluye fuentes dependientes aisladas de tierra, que no se encuentran disponibles en ATP-EMTP. Para obtener estas fuentes se utilizan fuentes TACS programables. El aislamiento de tierra, se obtiene aplicando un equivalente Norton de corriente, con dos fuentes de corriente dependientes, una entrando a una resistencia y la otra saliendo. De esta forma la conexión de la máquina puede ser en delta, estrella o con desbalances. En la Fig. 4.1, se muestran estas fuentes equivalentes.

En el modelo de la máquina de inducción hay que utilizar las mismas fuentes en ATPDraw que en MATLAB/Simulink, pero las fuentes de tensión alterna en ATPDraw tienen configuración definida por la función $\cos \omega t$, mientras que en Simulink, se definen mediante la función $\sin \omega t$. Por este motivo para reproducir los mismos resultados, es necesario incluir un desfase de -90° en las fuentes de alimentación de ATPDraw.

Para realizar el modelo VBR en ATPDraw es necesario desarrollar una programación en MODELS, el cual utiliza un lenguaje de programación semejante a Pascal o Python, el cual permite representar de una forma simple y accesible, diferentes ecuaciones o modelos matemáticos en el código que comprende ATP-EMTP.

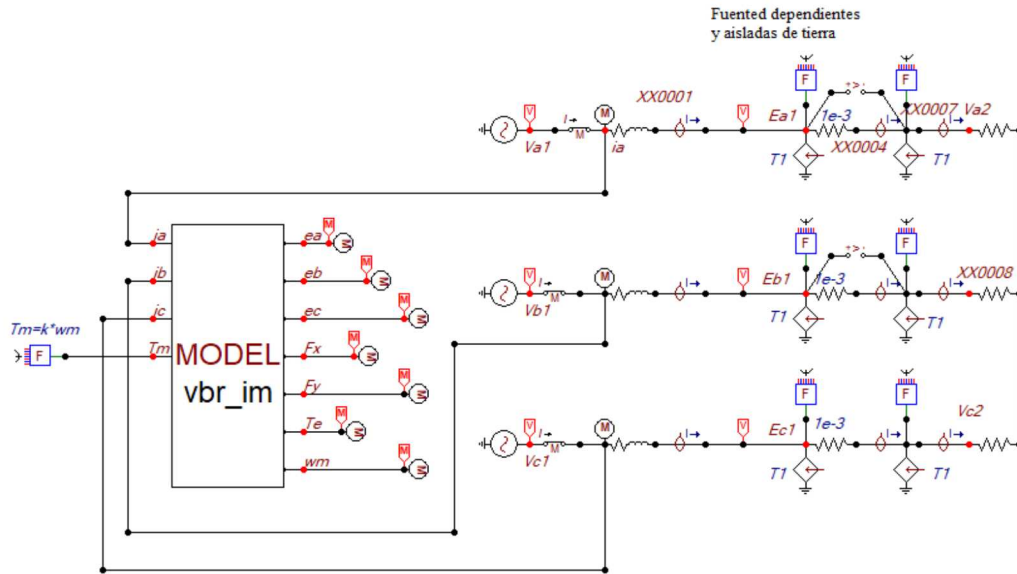


Figura 4.1: Diseño de un modelo dinámico VBR de la máquina de inducción en ATPDraw.

Para realizar la programación en MODELS es necesario definir los parámetros de la máquina que será simulada. En el Algoritmo 4.1, se presenta el código donde se definen los parámetros de la máquina de inducción, tales como: resistencias, inductancias, inercia, coeficiente de fricción y número de pares de polos, R_e , R_r , L_{le} , L_{lr} , M_{er} , J , K_r y p . También, se definen las variables de entrada tales como las corrientes i_a , i_b , i_c y el par mecánico T_m . Posteriormente se indican las variables de salida tales como: fuerzas electromotrices detrás de las reactancias e_a, e_b, e_c , las componentes real e imaginaria del flujo rotórico, F_{rx} y F_{ry} , el par eléctrico T_e y la velocidad angular ω_m . También se definen aquellas constantes y variables que se utilizan en los cálculos, mediante los comandos *CONST* y *VAR*.

Algoritmo 4.1 Inicialización de variables de entrada, salida y utilizadas en el programa.

```
MODEL VBR_IM

DATA Re {dflt: 0.3}, Rr {dflt: 0.3}
DATA Lds {dflt: 2.e-3}, Ldr {dflt: 2.e-3}, Mer {dflt: 60.e-3};
DATA J {dflt: 0.163}, Kr {dflt:0}, p {dflt:2}

INPUT ia, ib, ic, Tm

OUTPUT ea, eb, ec, Frx, Fry, Te, wm

CONST SQRT23 {val: 0.816496581}, SQRT1_2 {val: 0.707106781}
CONST SQRT1_6 {val: 0.408248290}, SQRT1_3 {val: 0.577350269}

VAR ea, eb, ec, Frx, Fry, Te, wm, ix, iy, io, pFrx, pFry
VAR ex, ey, eo, pwm, Lr, M
```

En el apartado HISTORY se realiza el almacenamiento de variables que deben ser persistentes entre un paso de integración y el siguiente. En el Algoritmo 4.2 se presentan las variables que deben preservarse para poder realizar la integración de los flujos real e imaginario del rotor pF_{rx} , pF_{ry} , la velocidad angular pwm y la derivada de la corriente de secuencia cero i_o .

Algoritmo 4.2 Comandos HISTORY en MODELS para mantener variables entre iteraciones.

```
HISTORY
    pFrx {dflt:0}
    integral(pFrx){dflt:0}
    pFry {dflt:0}
    integral(pFry){dflt:0}
    pwm {dflt:0}
    — Angular speed derivative integral
    (pwm){dflt:0}
    io {dflt:0}
```

En el Algoritmo 4.3, se inicializan las variables para posteriormente comenzar la sección ejecutable del programa, donde se incluyen las ecuaciones del modelo VBR de la máquina de inducción tal como se muestra en el segmento de código. 4.4

Algoritmo 4.3 Inicialización de variables.

INIT

```
ea:=0
eb:=0
ec:=0
wm:=0
pwm:=0
pFrx:=0
pFry:=0
Frx:=0
Fry:=0
```

ENDINIT

En el Algoritmo 4.4 se realizan las definiciones de variables que se necesitan dentro de los cálculos tales como L_r y M_{er} . Se realizan las transformaciones de las corrientes del estator al marco de referencia de los vectores espaciales $(a, b, c) \rightarrow (x, y, o)$. Inmediatamente se determinan las derivadas de los flujos del rotor pF_{xr} , pF_{ry} y se realiza su integración para obtener los flujos F_{rx} y F_{ry} . Se calculan las FEM en vectores espaciales e_x, e_y y e_o y se transforman al dominio de las variables naturales e_a, e_b y e_c , que serán las salidas para programar las fuentes dependientes del circuito. Finalmente, se determina el par eléctrico T_e y se integra la ecuación dinámica para obtener la velocidad angular ω_m .

Algoritmo 4.4 Cuerpo ejecutable del modelo VBR de la máquina de inducción en MODELS.

EXEC

```

Lr:=(Ldr+Mer) — Rotor inductance
M:=Mer — Mutual inductance
— Transformación a vectores espaciales
ix:=SQRT23*(ia-0.5*ib-0.5*ic)
iy:=SQRT1_2*(ib-ic)
io:=SQRT1_2*(ia+ib+ic)
— Derivada del flujo del rotor
pFrX:=-Rr*FrX/Lr-p*wm*Fry+Rr*M*ix/Lr
pFrY:=-Rr*FrY/Lr+p*wm*FrX+Rr*M*iy/Lr
— Cálculo del flujo
— del rotor por integración
FrX:=INTEGRAL(pFrX)
FrY:=INTEGRAL(pFrY)
— Cálculo de las FEM en coordenadas
— de vectores espaciales
ex:=-M*Rr*FrX/(Lr**2)-M*p*wm*Fry/Lr
ey:=-M*Rr*FrY/(Lr**2)+M*p*wm*FrX/Lr
eo:=Rs*io+Lls*deriv(io)
— Transformación de las FEM a
— coordenadas naturales
ea:=SQRT23*ex+SQRT1_3*eo
eb:=-SQRT1_6*ex+SQRT1_2*ey+SQRT1_3*eo
ec:=-SQRT1_6*ex-SQRT1_2*ey+SQRT1_3*eo
— Cálculo del par eléctrico
Te:=p*M*(FrX*iy-FrY*ix)/Lr
— Ecuación dinámica
pwm:=(Te-Tm-Kr*wm)/J
— Integración de la ecuación dinámica
wm:=INTEGRAL(pwm)

```

ENDEXEC

ENDMODEL

4.2. Modelo de la MI sin VBR

En la figura 4.2, se presenta el circuito en ATPDraw de una máquina de inducción incluida dentro de la herramienta ATP-EMTP. Se ajustan los parámetros para realizar comparaciones con modelos existentes en el Simulink y en el modelo VBR desarrollado en ATPDraw y el VBR disponible en Simulink, realizado por investigadores del Grupo de Investigación en Energía de la UPS. El modelo tiene una resistencia de $1\text{ M}\Omega$, un capacitor de $100\text{ }\mu\text{F}$ para representar la inercia y fricción en el eje de la máquina. La máquina se alimenta con una fuente de 460 V .

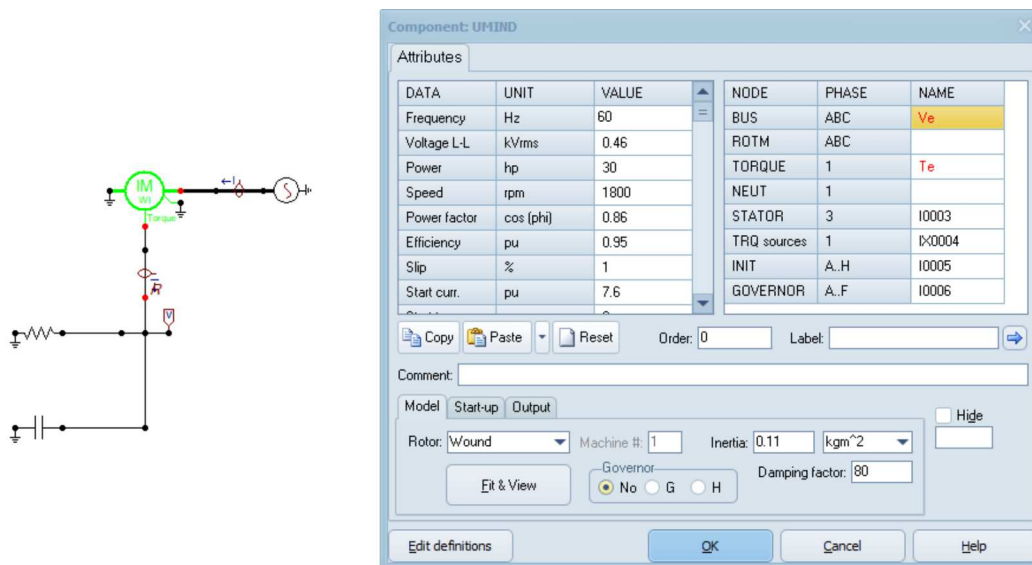


Figura 4.2: Diseño de un modelo dinámico de la máquina de inducción equivalente en ATPDraw.

4.3. Modelo VBR de la MI en Simulink

Para realizar el modelo dinámico de la máquina de inducción se utilizan las ecuaciones de los vectores especiales de los flujos del estator y rotor respectivamente. El desarrollo completo del modelo está realizado en la Sección 2.5.

En la Fig. 4.3, se observa el modelo VBR de la máquina de inducción realizado en MATLAB/Simulink, utilizando tres impedancias y tres fuentes de tensión detrás de la reactancia.

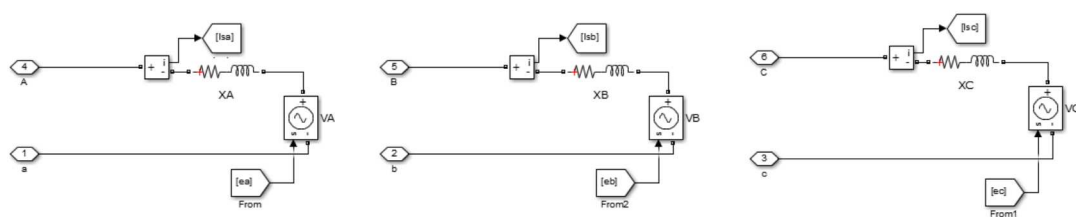


Figura 4.3: Modelo dinámico VBR de la máquina de inducción.

En la Fig. 4.4, se observa la conexión de las fuentes al modelo VBR de la máquina de inducción realizada en Simulink, así como las salidas de variables tales como par eléctrico T_e , velocidad angular mecánica ω_m , las corrientes del estator i_a, i_b, i_c , y las componentes real e imaginaria de los enlaces de flujo λ_{rx} y λ_{ry} .

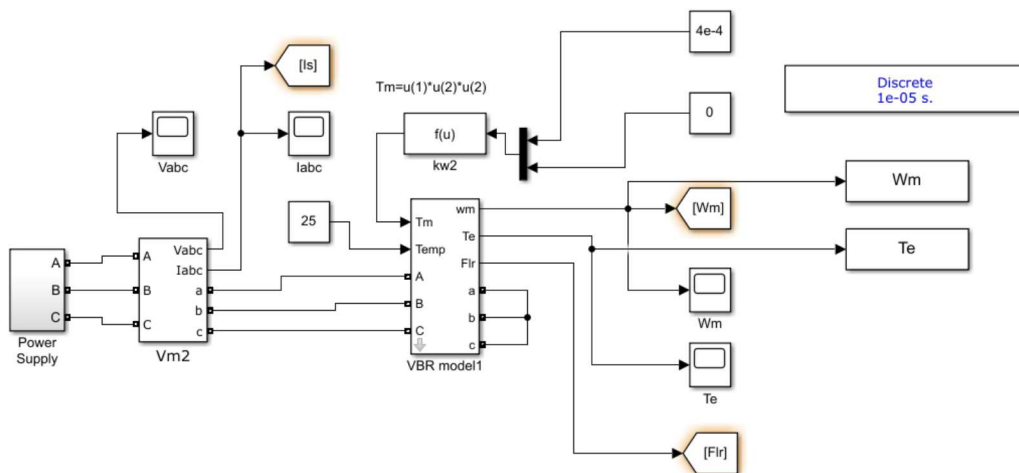


Figura 4.4: Modelo dinámico VBR de la máquina de inducción en Simulink.

4.3.1. Diagrama VBR de las corrientes del estator de MI

En la Fig. 4.5, se observa el diagrama que calcula las tres corrientes (i_{so}, i_{sx}, i_{sy}) de la máquina de inducción a partir de las corrientes del estator i_{sa}, i_{sb} e i_{sc} .

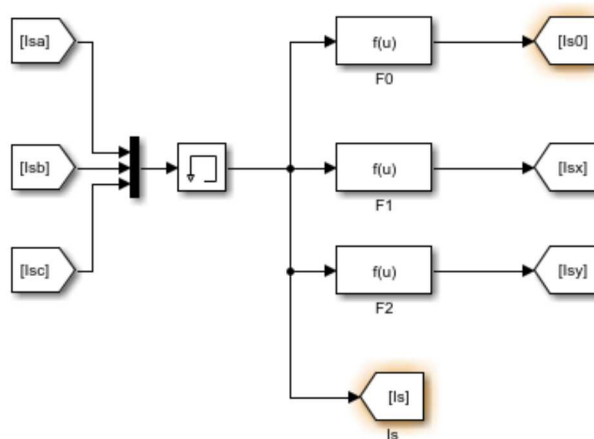


Figura 4.5: Diagrama VBR de las corrientes i_a, i_b, i_c .

4.3.2. Diagrama VBR de la velocidad de la MI

En la Fig. 4.6, se observa el diagrama que calcula el par eléctrico T_e , de la máquina de inducción. De esta manera se puede obtener la velocidad de la máquina, aplicando la ecuación de Newton 4.1,

$$T_e - T_m = J\ddot{\theta} + p\dot{\theta} \quad (4.1)$$

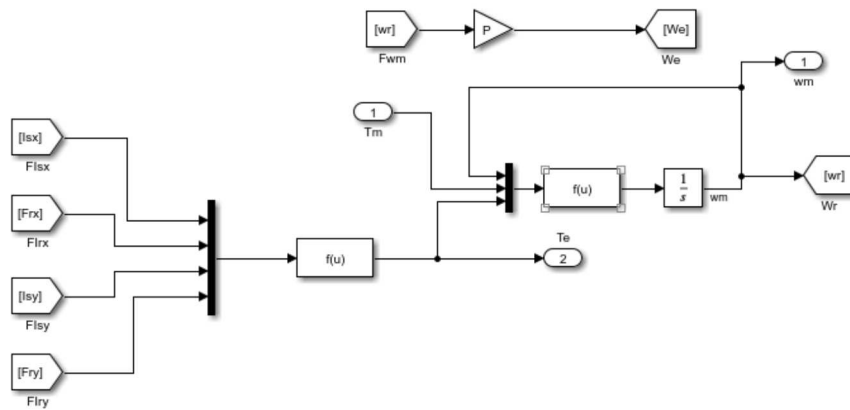


Figura 4.6: Diagrama VBR de la velocidad de la MI.

4.3.3. Diagrama VBR de la MI para obtener el enlace de flujo y la FEM

En la Fig. 4.7, se observa el diagrama principal del modelo VBR. Se utiliza una función *fcn* en MATLAB, la cual permite calcular las fuerzas electromotrices: *ea*, *eb*, *ec*. Este modelo también determina los valores de los flujos F_{rx} , F_{ry} , por integración a partir de las respectivas derivadas.

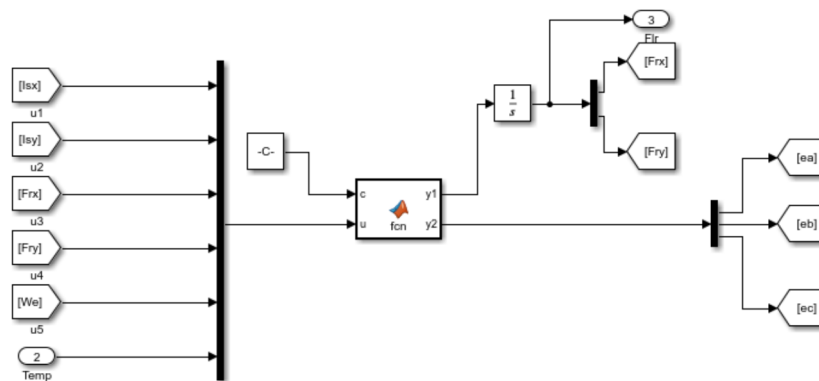


Figura 4.7: Diagrama VBR de MI para obtener el enlace de flujo y la fem.

4.4. Modelo dinámico de la MI en Simulink

En la Fig. 4.8, se observa el diseño del modelo de la MI que permite realizar comparaciones con modelos preexistentes en Simulink con los resultados que se obtienen en ATPDraw.

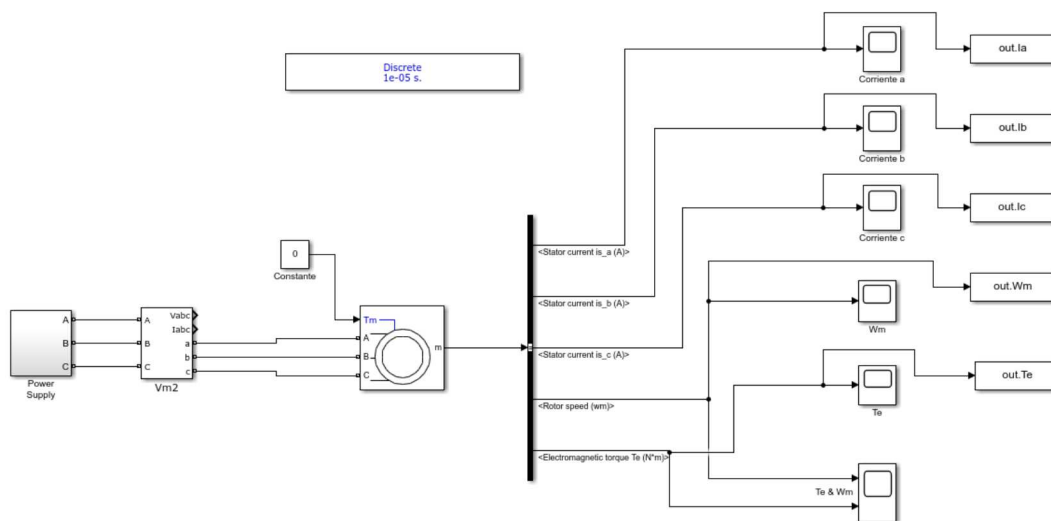


Figura 4.8: Modelo dinámico de la máquina de inducción equivalente en Simulink.

4.5. Simulación de la MI con VBR en Simulink

En el Tabla 4.1, se observan los parámetros de la máquina de inducción, desarrollado en Simulink, es necesario observar el comportamiento del par eléctrico T_e , velocidad angular mecánica ω_m y corrientes i_a, i_b, i_c . Estos parámetros son transferidos al programa realizado en ATPDraw para posteriormente realizar una comparación de resultados entre los dos modelos.

Tabla 4.1: Parámetros de la máquina de inducción en VBR.

Resistencia del estator	0.353Ω
Resistencia del rotor	0.424Ω
Inductancia magnetizante	$64.7 \mu H$
Inductancia de fuga del estator	$2.59 \mu H$
Inductancia de fuga del rotor	$3.88 \mu H$
Inercia	0.11
Pares de polos	2
Fricción	0

4.5.1. Par Eléctrico T_e de la MI con VBR

En la Fig. 4.9, se observa el comportamiento del par eléctrico T_e de la máquina de inducción en VBR, con un par mecánico en cero y un paso de integración dt de $10 \mu s$.

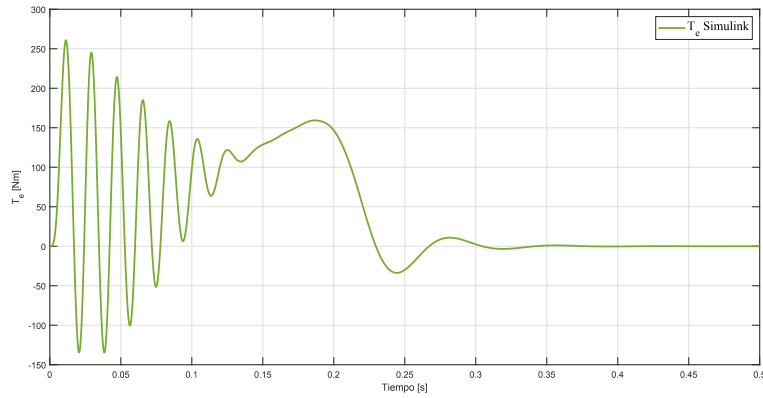


Figura 4.9: Par eléctrico T_e de la máquina de inducción con VBR en Simulink.

4.5.2. Velocidad angular mecánica ω_m de la MI con VBR

En la Fig. 4.10, se observa la velocidad angular mecánica ω_m de la máquina de inducción del modelo VBR en Simulink.

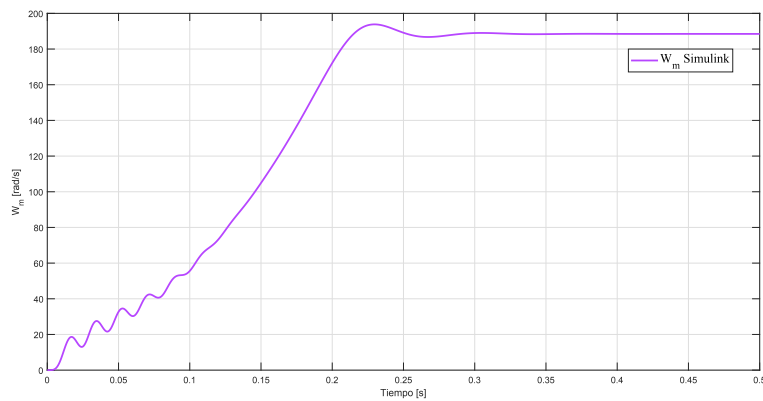
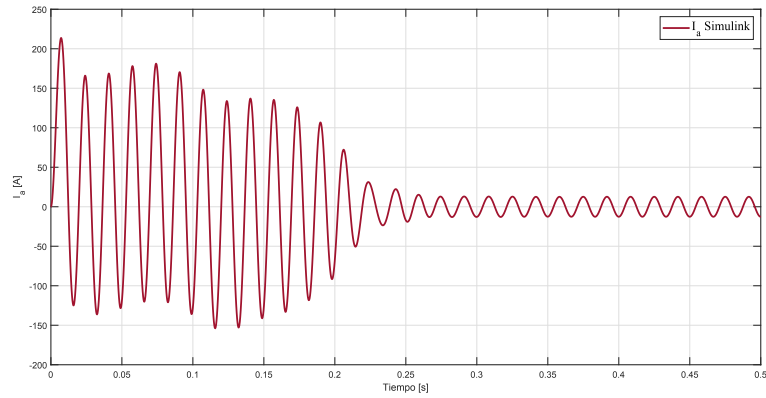


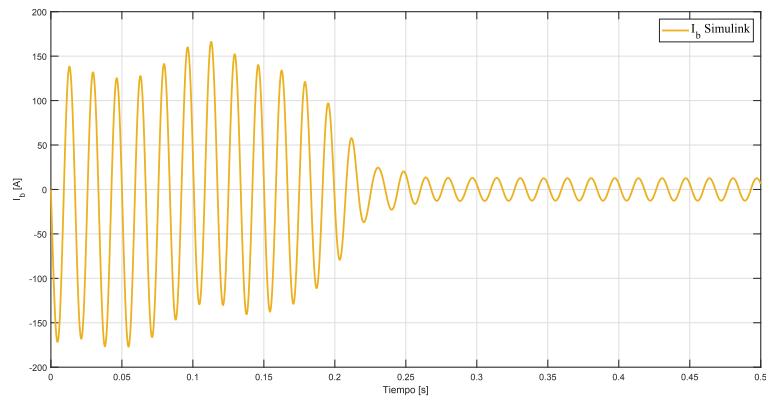
Figura 4.10: Velocidad angular mecánica ω_m de la MI en VBR en Simulink.

4.5.3. Corrientes del estator i_a , i_b , i_c de la MI con VBR

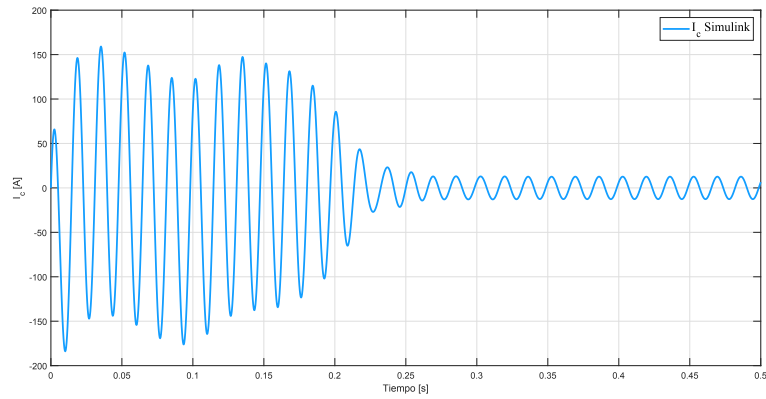
En la Fig. 4.11, se observan las corrientes del estator i_a , i_b , i_c , del modelo VBR. Cada fuente tiene una tensión de 375.6V al neutro, con una frecuencia de 60Hz en los tres casos.



(a) Corriente i_a .



(b) Corriente i_b .



(c) Corriente i_c .

Figura 4.11: Corrientes del estator i_a , i_b , i_c en Simulink de la máquina de inducción con VBR.

4.6. Simulación de la MI con VBR en ATPDraw

4.6.1. Par Eléctrico T_e de MI con VBR

En la Fig. 4.12, se observa el par eléctrico T_e de la máquina de inducción. Para realizar la simulación del par eléctrico se debe empezar cambiando los valores efectivos

que están en ATPDraw y colocarlos en valores pico. De igual manera se utiliza un par eléctrico en cero y un $dt = 10\mu s$.

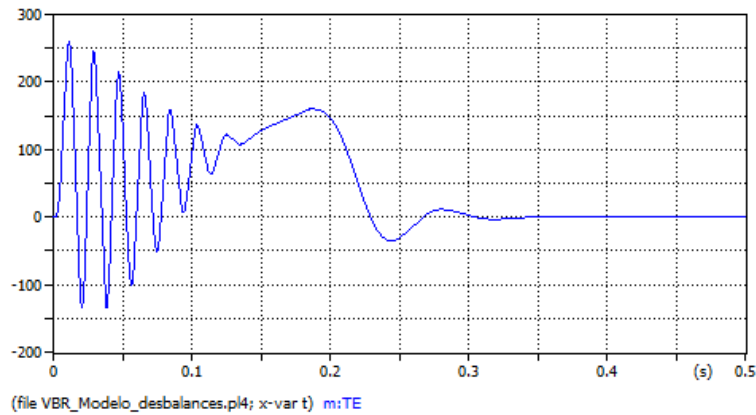


Figura 4.12: Par eléctrico T_e en ATPDraw de la máquina de inducción con VBR.

4.6.2. Velocidad angular mecánica ω_m de la MI con VBR

En la Fig. 4.13, se observa la velocidad angular mecánica ω_m , de la máquina de inducción con VBR, la cual se estabiliza en 0.25s.

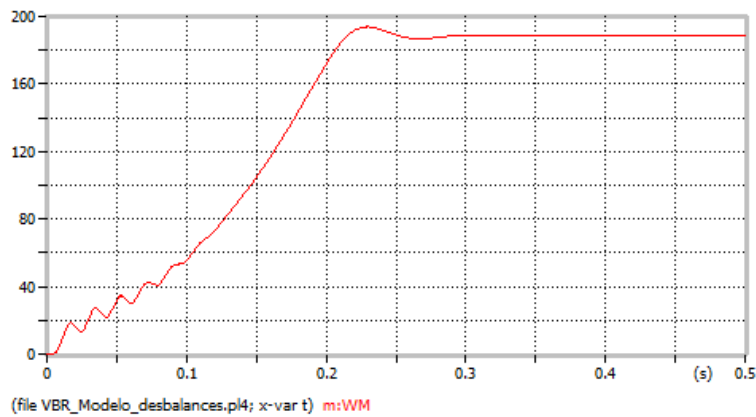
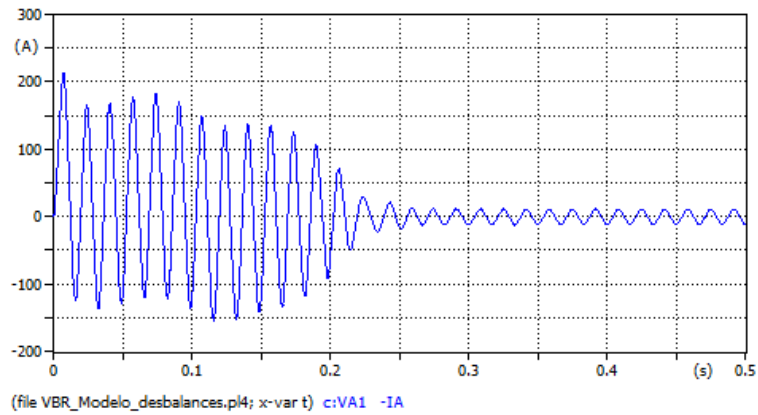


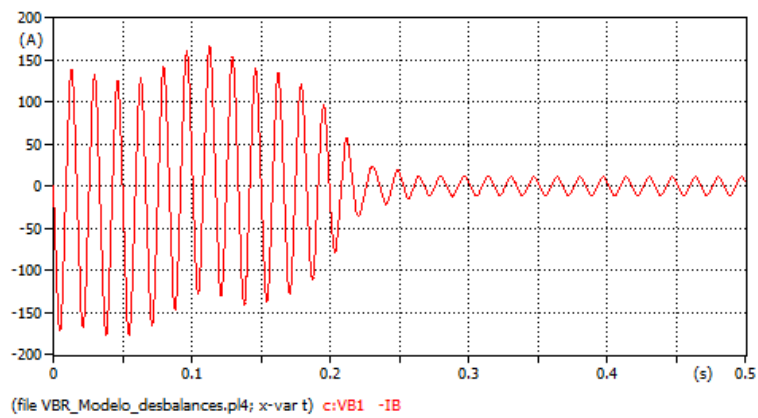
Figura 4.13: Velocidad angular mecánica ω_m en ATPDraw de la MI con VBR.

4.6.3. Corrientes del estator i_a, i_b, i_c de la MI con VBR

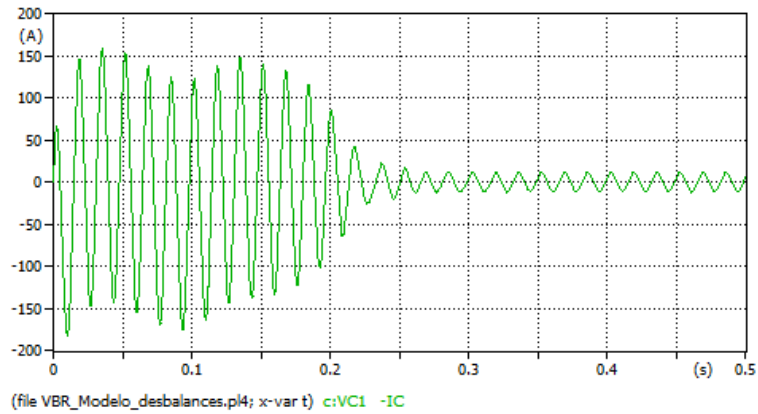
En la Fig. 4.14, se observa el comportamiento de las tres corrientes del estator (i_a, i_b, i_c) de la máquina de inducción en ATPDraw.



(a) Corriente i_a .



(b) Corriente i_b .



(c) Corriente i_c .

Figura 4.14: Corrientes del estator i_a , i_b , i_c en ATPDraw de la MI con VBR.

4.7. Simulación de la MI en Simulink

En este proceso se realiza la comparación de la velocidad angular mecánica ω_m , par eléctrico T_e y las corrientes del estator i_a , i_b , i_c de una MI y posteriormente incluyendo el modelo VBR. Esta comparación se realiza entre los modelos realizados

entre los programas ATPDraw y Simulink.

En la Tabla 4.2, se presentan los datos y parámetros de la máquina de inducción equivalente:

Tabla 4.2: Parámetros de la máquina de inducción equivalente.

Potencia nominal	22380 W
Voltaje línea-línea	460 V
Resistencia del estator	0.3169 Ω
Resistencia del rotor	0.1637 Ω
Inductancia magnetizante	61.91 μH
Inductancia de fuga del estator	1.1384 μH
Inductancia de fuga del rotor	1.5867 μH
Pares de polos	2
Inercia	0.11
Fricción	0.0223

4.7.1. Par eléctrico T_e de MI equivalente

En la Fig. 4.15, se observa el comportamiento del par eléctrico T_e , de la máquina de inducción equivalente realizado en Simulink con un $dt = 10\mu s$.

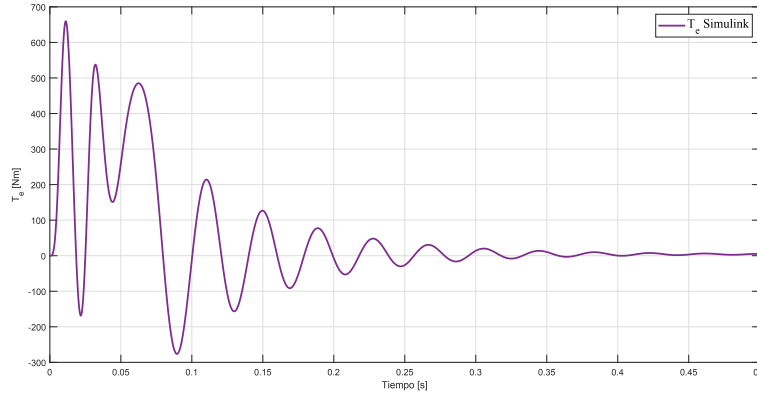


Figura 4.15: Par eléctrico T_e en Simulink de la MI equivalente.

4.7.2. Velocidad angular mecánica ω_m de la MI equivalente

En la Fig. 4.16, se observa la velocidad angular mecánica ω_m de la máquina de inducción equivalente, la velocidad angular tiende a estabilizarse en el tiempo de 0.35s.

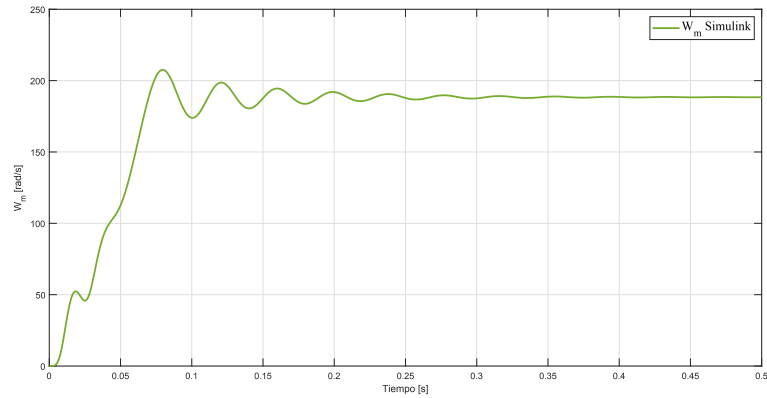
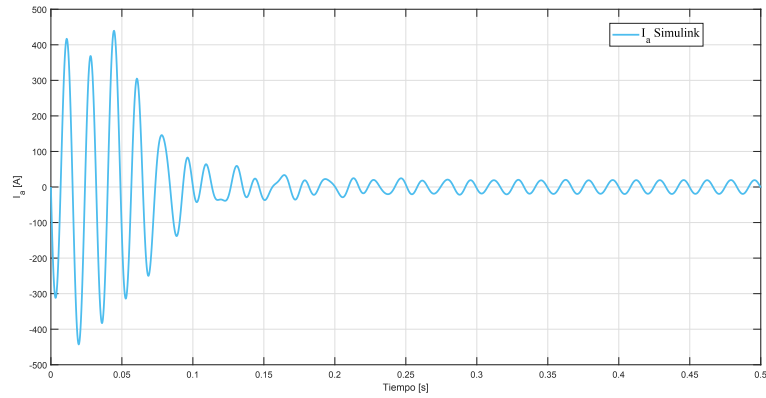


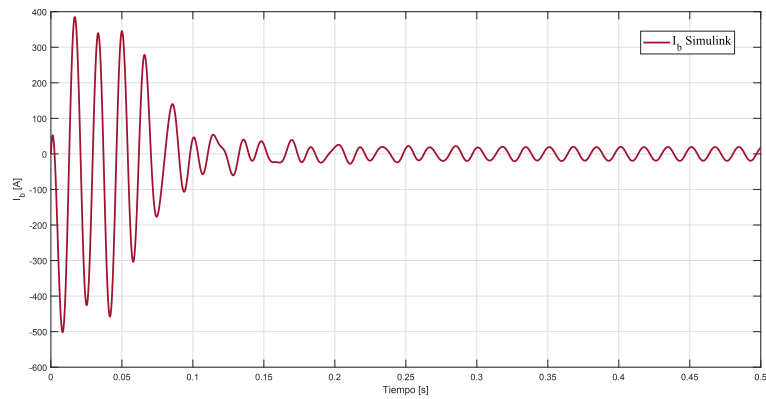
Figura 4.16: Velocidad angular mecánica ω_m en Simulink de la MI equivalente.

4.7.3. Corrientes del estator i_a , i_b , i_c de la MI equivalente en Simulink

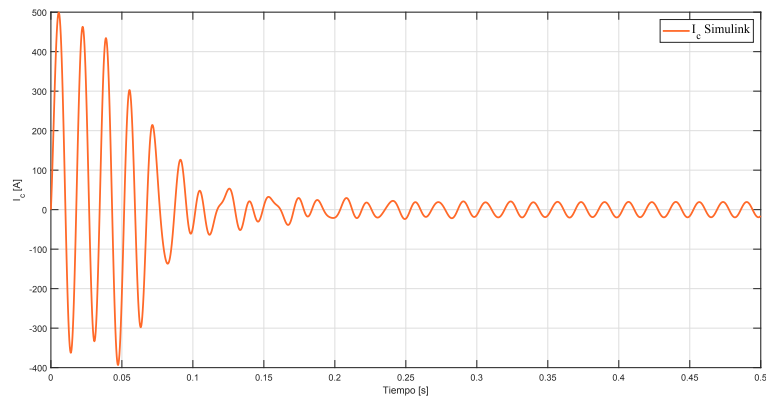
En la Fig. 4.17, se observan las corrientes del estator i_a , i_b , i_c , de la máquina de inducción equivalente. Cada fuente tiene una tensión de $460V$ al neutro, con una frecuencia de $60Hz$. En este caso las fases utilizadas son, para la fuente A es -90° , para la fuente B es -150° , y para la fuente C es 30° .



(a) Corriente i_a .



(b) Corriente i_b .



(c) Corriente i_c .

Figura 4.17: Corrientes del estator i_a , i_b , i_c en Simulink de la máquina de inducción equivalente.

4.8. Simulación de la MI equivalente en ATPDraw

El modelo desarrollado de la máquina equivalente en Simulink fue implantado en ATPDraw. En la Fig. 4.18, se observan los parámetros de la fuente en ATPDraw. Estos valores deben ser iguales a los que se utilizan en las fuentes de Simulink.

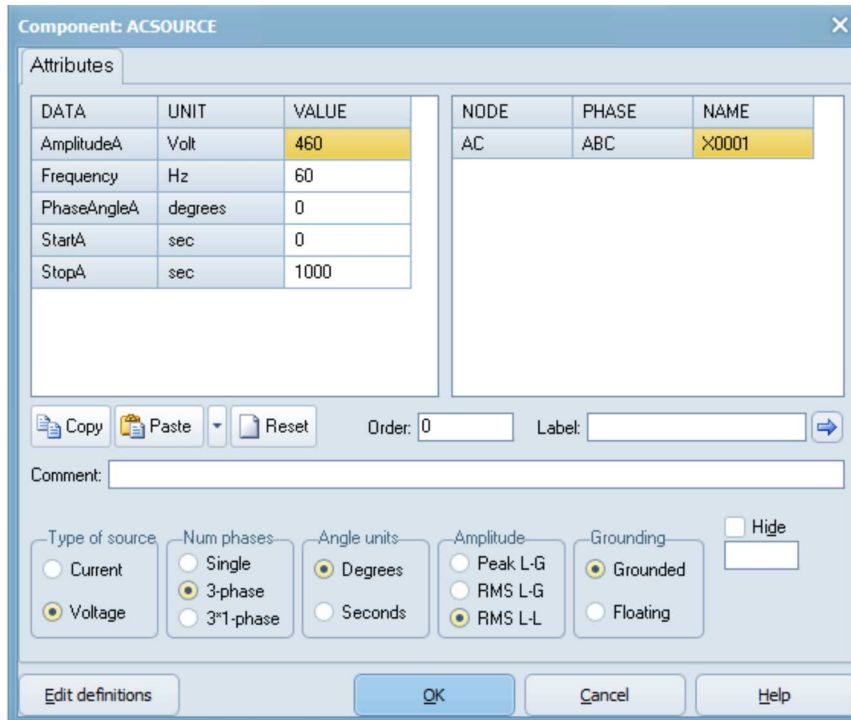


Figura 4.18: Parámetros de la fuente en ATPDraw de la MI equivalente.

4.8.1. Par eléctrico T_e de la MI

En la Fig. 4.19, se presenta el par eléctrico T_e de la máquina de inducción equivalente realizado en ATPDraw, utilizando los mismos parámetros de Simulink.

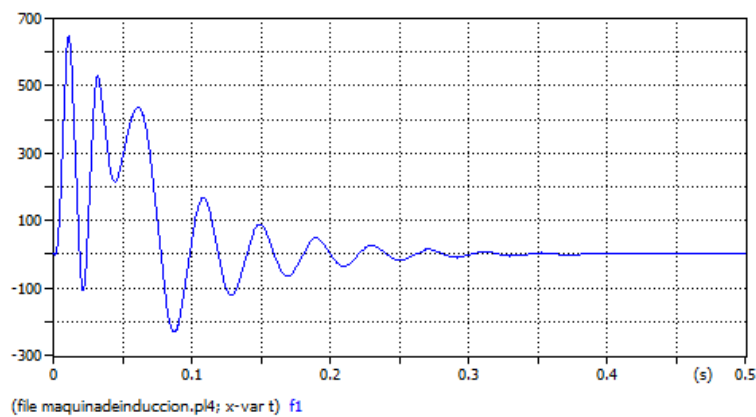


Figura 4.19: Par eléctrico T_e en ATPDraw de la MI equivalente.

4.8.2. Velocidad angular mecánica ω_m de la MI

En la Fig. 4.20, se presenta la velocidad angular mecánica ω_m de la máquina de inducción equivalente realizada en ATPDraw utilizando los mismos parámetros de Simulink.

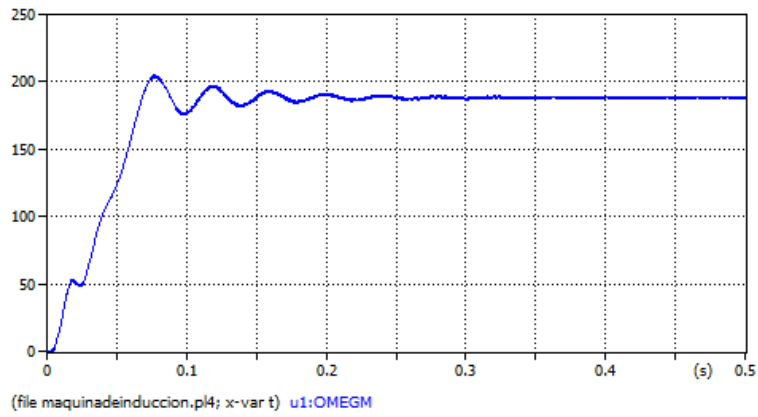
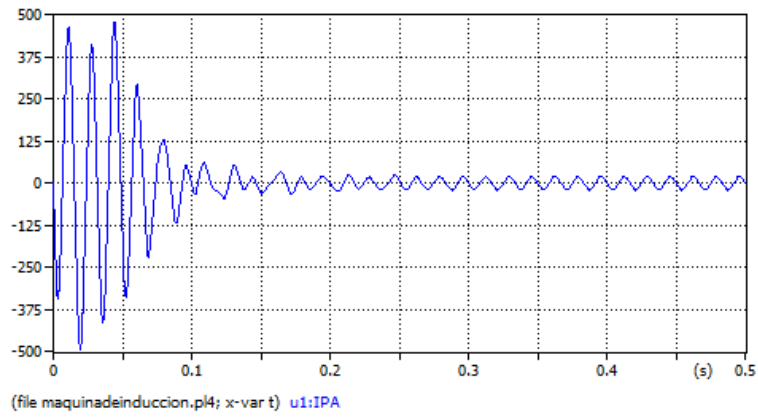


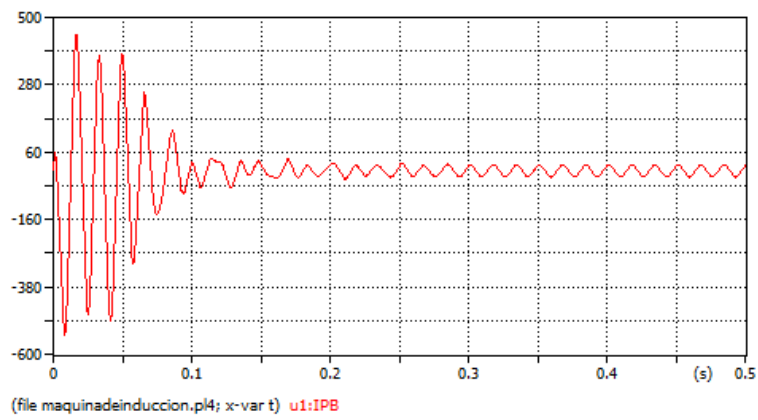
Figura 4.20: Velocidad angular mecánica ω_m en ATPDraw de la MI equivalente.

4.8.3. Corrientes del estator i_a , i_b , i_c de la MI equivalente

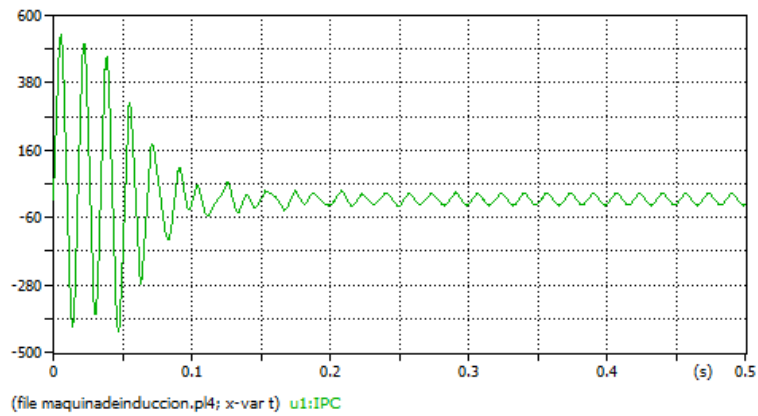
En la Fig. 4.21, se observan las corrientes del estator i_a , i_b , i_c , de la máquina de inducción equivalente simuladas en ATPDraw.



(a) Corriente i_a .



(b) Corriente i_b .



(c) Corriente i_c .

Figura 4.21: Corrientes del estator i_a , i_b , i_c en ATPDraw de la MI equivalente.

4.9. Simulaciones de la MI equivalente con VBR en Simulink

4.9.1. Par eléctrico T_e de la MI equivalente con VBR

La máquina equivalente realizada sin VBR, obtuvo un error de mayor magnitud en sus principales características, tales como el par eléctrico T_e y las corrientes del estator i_a , i_b , i_c . La modelación VBR puede mejorar estos resultados.

En la Fig. 4.22, se observa el comportamiento del par eléctrico T_e de la máquina de inducción equivalente VBR, en Simulink.

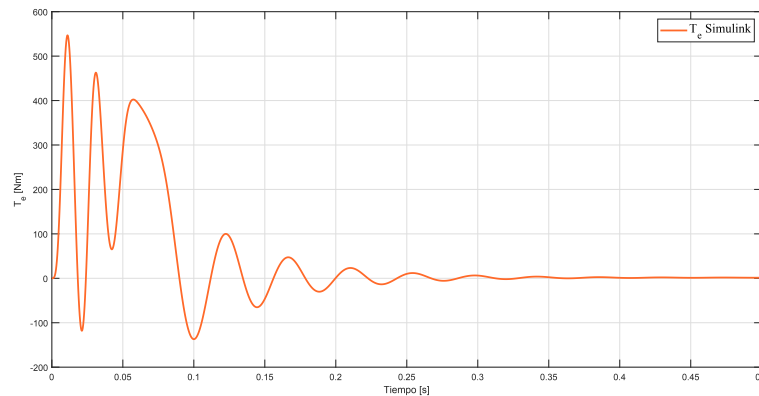


Figura 4.22: Par eléctrico T_e en Simulink de la MI equivalente con VBR.

4.9.2. Velocidad angular mecánica ω_m de la MI equivalente con VBR

En la Fig. 4.23, se observa la velocidad angular mecánica ω_m de la máquina de inducción equivalente con VBR en Simulink.

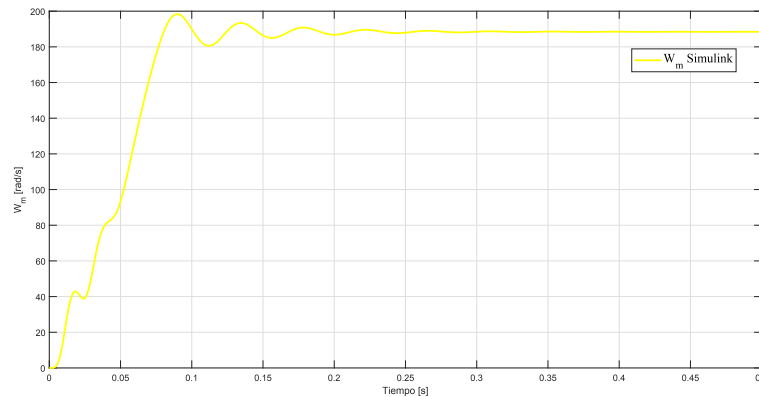
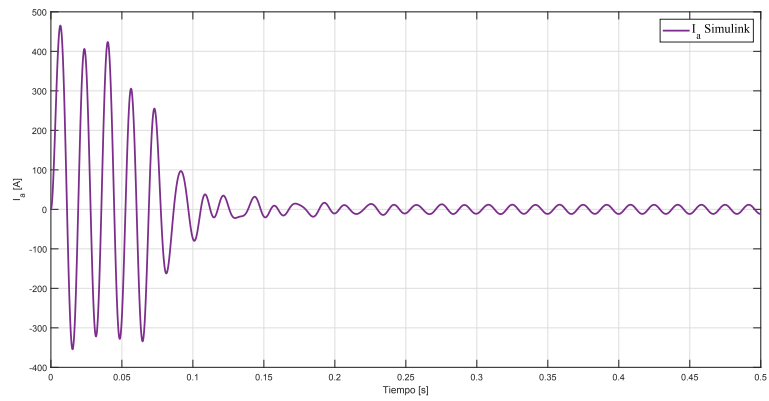


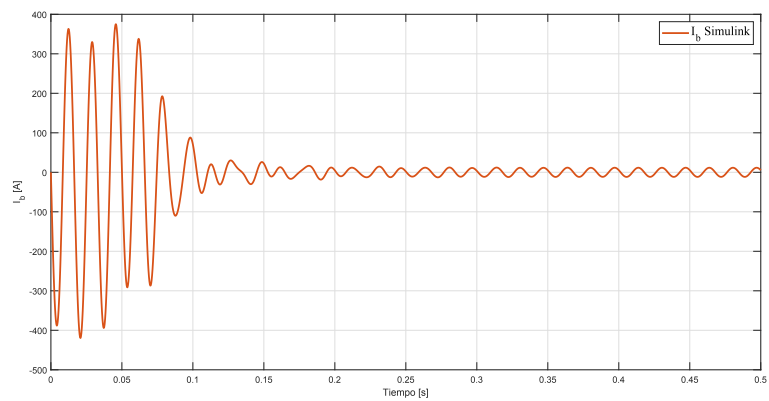
Figura 4.23: Velocidad angular mecánica ω_m en Simulink de la MI equivalente con VBR.

4.9.3. Corrientes del estator i_a , i_b , i_c de la MI equivalente con VBR

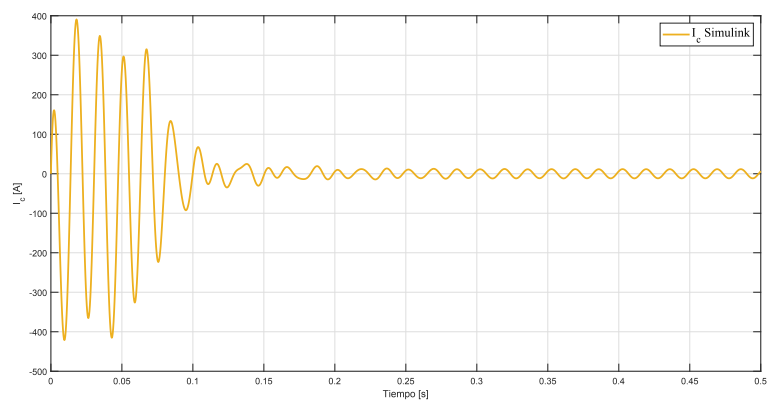
En la Fig. 4.24, se observan las corrientes i_a , i_b , i_c de la máquina de inducción equivalente con VBR en Simulink, realizada con los mismos parámetros sin VBR.



(a) Corriente i_a .



(b) Corriente i_b .



(c) Corriente i_c .

Figura 4.24: Corrientes del estator i_a , i_b , i_c en Simulink de la MI equivalente con VBR.

4.10. Simulación de la MI equivalente con VBR en ATPDraw

4.10.1. Par eléctrico T_e de MI equivalente con VBR

Se utilizó el modelo desarrollado de la máquina de inducción equivalente en ATPDraw, con los parámetros utilizados anteriormente en Simulink. Al igual que en los otros casos, los valores de las fuentes deben ser iguales a los que se usan en las fuentes de Simulink. En la Fig. 4.25, se observa el comportamiento del par eléctrico T_e de la máquina de inducción equivalente en ATPDraw.

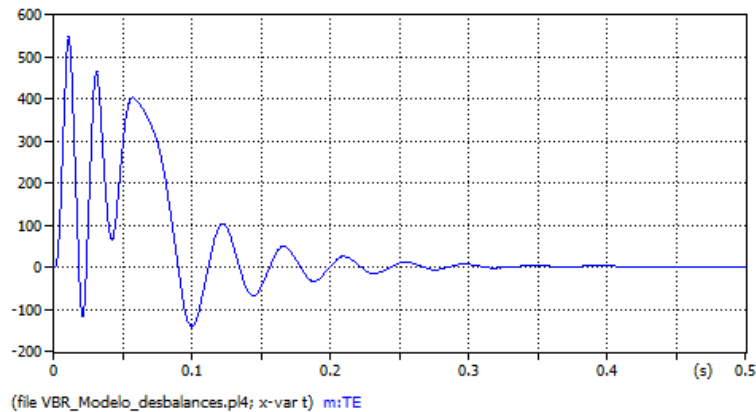


Figura 4.25: Par eléctrico T_e en ATPDraw de la MI equivalente con VBR.

4.10.2. Velocidad angular mecánica ω_m de la MI equivalente con VBR

En la Fig. 4.26, se observa la velocidad angular mecánica ω_m de la máquina de inducción equivalente con VBR en ATPDraw.

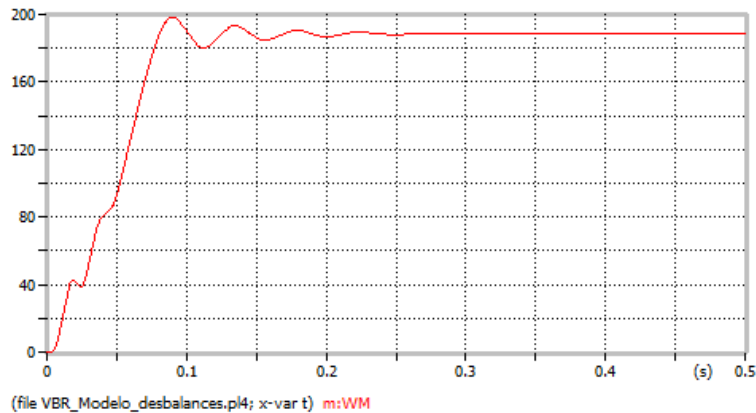
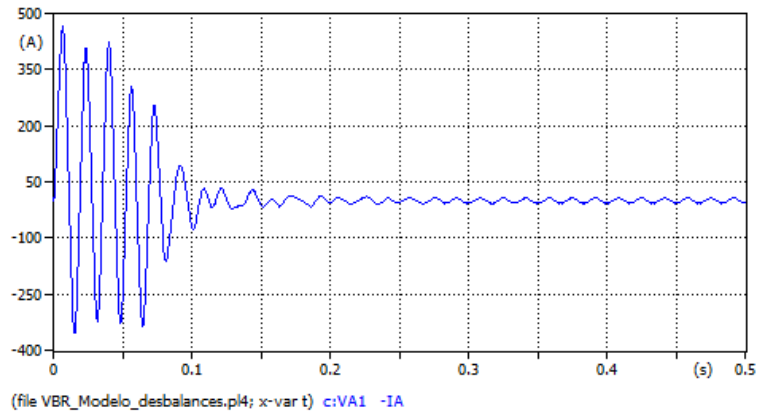


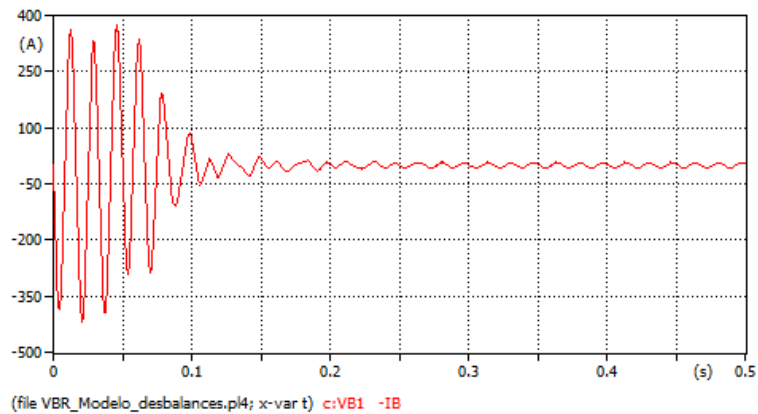
Figura 4.26: Velocidad angular mecánica ω_m en ATPDraw de la MI equivalente con VBR.

4.10.3. Corrientes del estator i_a , i_b , i_c de la MI equivalente con VBR

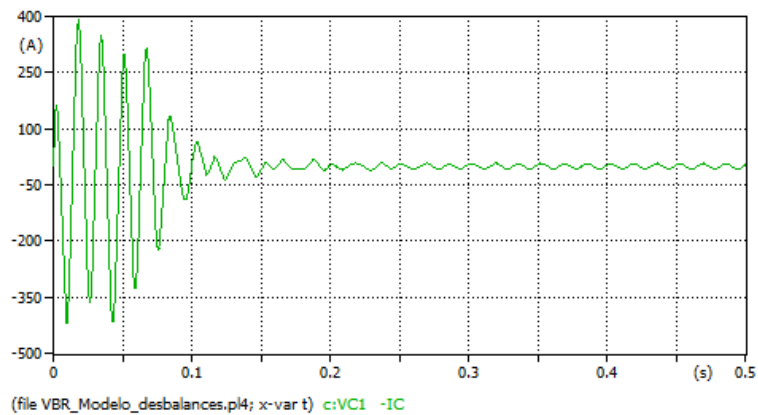
En la Fig. 4.27, se observa el comportamiento de las corrientes del estator i_a , i_b , i_c de la máquina de inducción equivalente con VBR en ATPDraw.



(a) Corriente i_a .



(b) Corriente i_b .



(c) Corriente i_c .

Figura 4.27: Corrientes del estator i_a , i_b , i_c en ATPDraw de la MI equivalente con VBR.

5 Análisis de Resultados.

En este capítulo se efectúan las comparaciones y los análisis de los resultados obtenidos para el modelo dinámico utilizando el método VBR de la máquina de inducción en ATPDraw y el equivalente realizado en Simulink.

5.1. Comparaciones entre Simulink y ATPDraw de la MI con VBR

5.1.1. Par eléctrico T_e de la MI en VBR

Para realizar la comparación es necesario superponer las dos curvas (ATPDraw y Simulink) con la misma cantidad de puntos. El proceso de integración se realiza con el método Euler en MATLAB. Lo mismo se realiza en ATPDraw, definiendo las tensiones de las fuentes para que sean iguales a la de Simulink en valores pico y fase.

Una vez realizados estos modelos, se exportan los datos del Simulink y de ATPDraw para representar las gráficas y obtener las similitudes o diferencias entre ambos.

En la Fig. 5.1, se observa la comparación del par eléctrico T_e de la máquina de inducción en VBR en Simulink y ATPDraw.

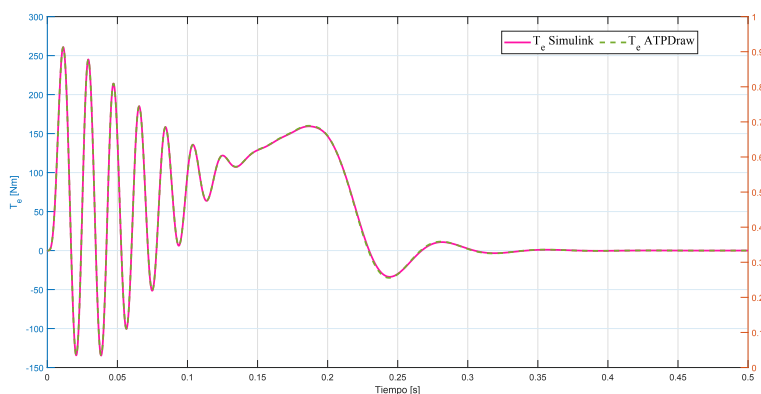


Figura 5.1: Comparación del par eléctrico T_e entre Simulink y ATPDraw de la MI con modelo VBR.

En la Fig. 5.2, se observa la superposición de las dos curvas y el error existente de las mismas. El error es inferior a 2.5 Nm ($< 1\%$).

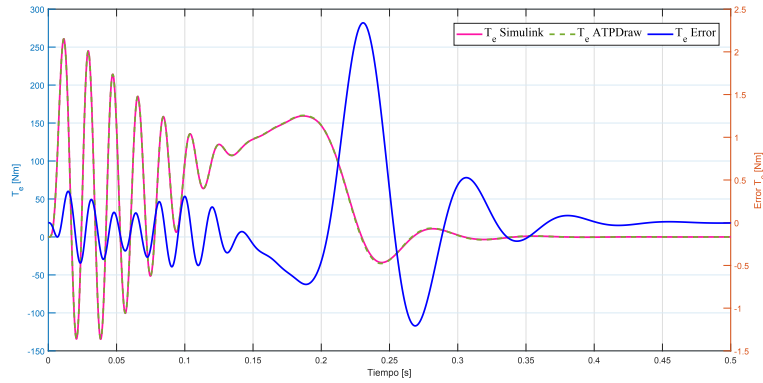


Figura 5.2: Comparación y error del par eléctrico T_e entre Simulink y ATPDraw de la máquina de inducción con modelo VBR.

En la Fig. 5.3, se observa el error de las curvas del comportamiento del par eléctrico T_e , de la máquina de inducción con VBR. El error entre ambas curvas es inferior al 0.9%. El error del par eléctrico T_e se determina realizando la resta entre las dos curvas, es decir: (ATPDraw - Simulink).

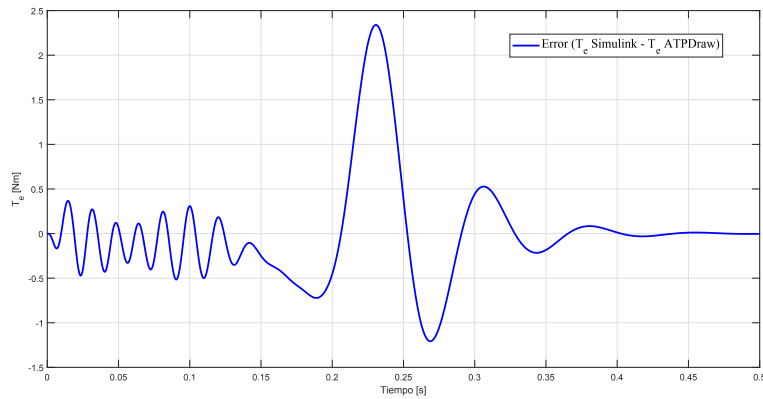


Figura 5.3: Error del par eléctrico T_e (ATPDraw - Simulink) de la MI con modelo VBR.

5.1.2. Velocidad angular mecánica ω_m de la MI en VBR

Para realizar la superposición de las curvas de la velocidad angular mecánica de la máquina de inducción se debe aplicar el mismo procedimiento que se realizó para comparar el par eléctrico T_e . Es decir, exportar los datos entre ambos programas con la misma cantidad de puntos. El resultado de esta superposición de la velocidad angular mecánica de la máquina de inducción con VBR, se observa en la Fig. 5.4.

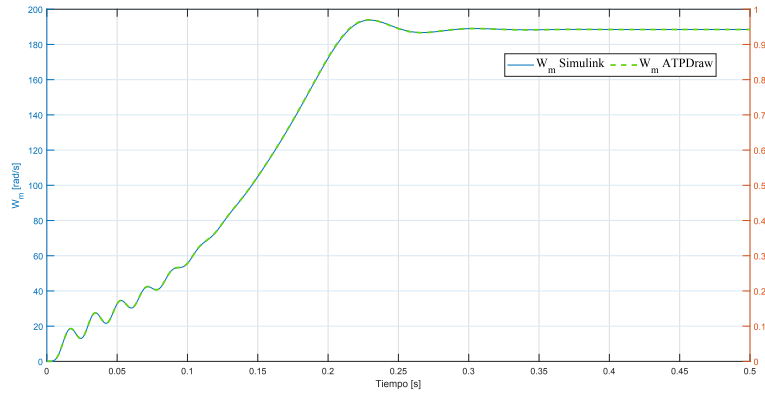


Figura 5.4: Comparación de la velocidad angular mecánica ω_m entre Simulink y ATPDraw de la MI con modelo VBR.

En la Fig. 5.5, se observa la superposición entre las dos curvas y el error de la velocidad angular mecánica ω_m , de la máquina de inducción con VBR.

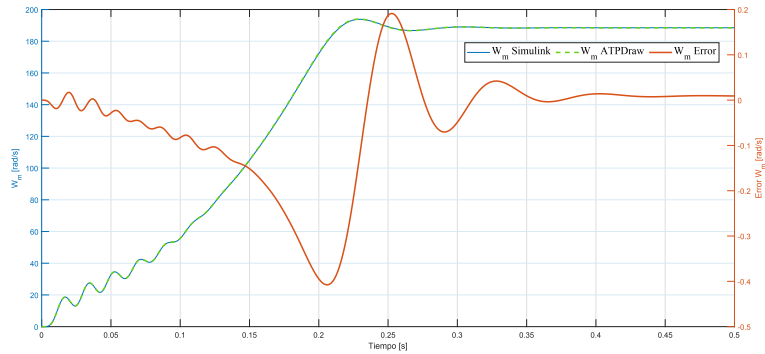


Figura 5.5: Comparaciones y error de la velocidad angular ω_m entre Simulink y ATPDraw de la MI con modelo VBR.

En la Fig. 5.6, se observa el error entre las curvas del comportamiento de la velocidad angular mecánica ω_m , de la máquina de inducción con VBR. El error entre ambas curvas es reducido, dando como resultado un valor inferior a 0.49%. El error de la velocidad angular mecánica ω_m , se determina realizando la resta entre los valores obtenidos en Simulink y ATPDraw.

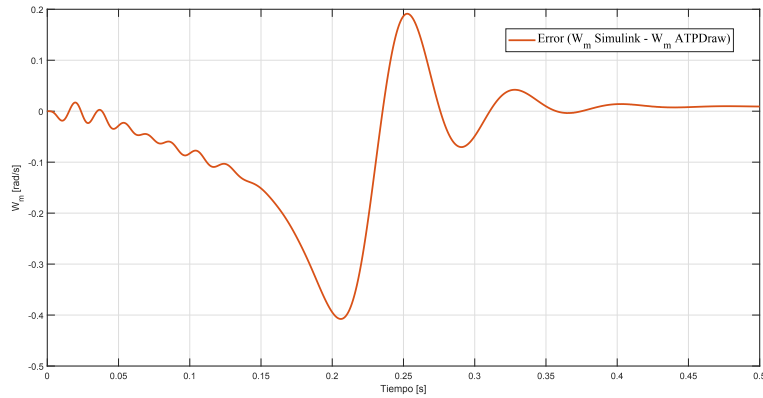
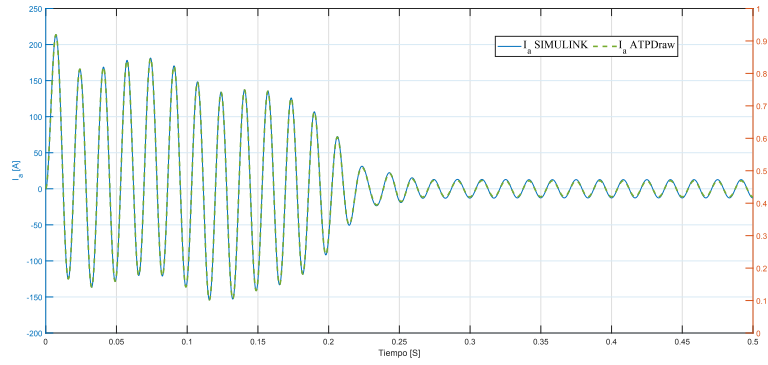


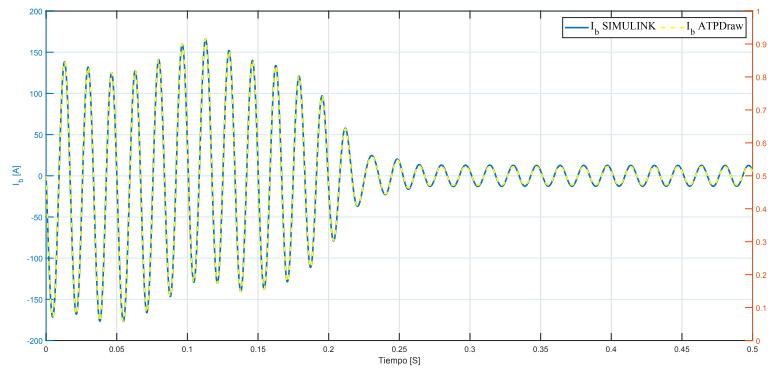
Figura 5.6: Error de la velocidad angular mecánica ω_m entre Simulink y ATPDraw de la MI con modelo VBR.

5.1.3. Comparaciones entre las corrientes del estator i_a , i_b , i_c de la MI con VBR

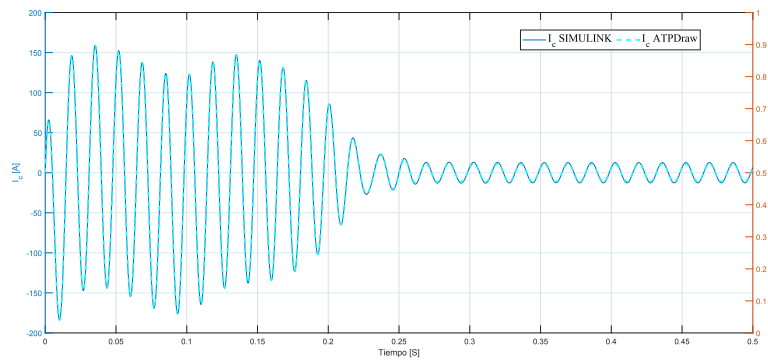
En la Fig. 5.7, se observa la superposición de las corrientes del estator i_a , i_b , i_c de la máquina de inducción con VBR entre Simulink y ATPDraw, donde se observa la similitud entre ambas curvas.



(a) Corriente i_a .



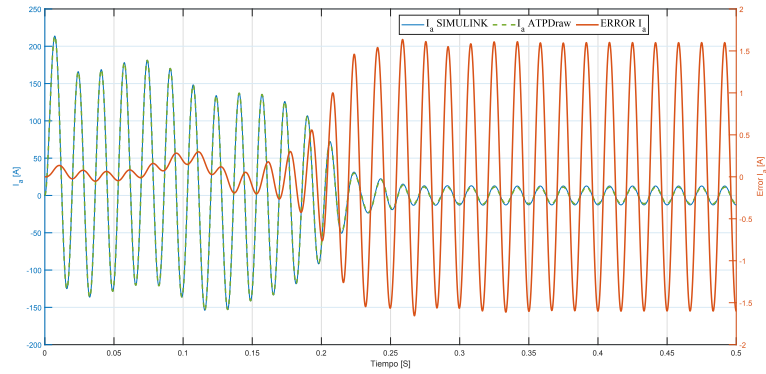
(b) Corriente i_b .



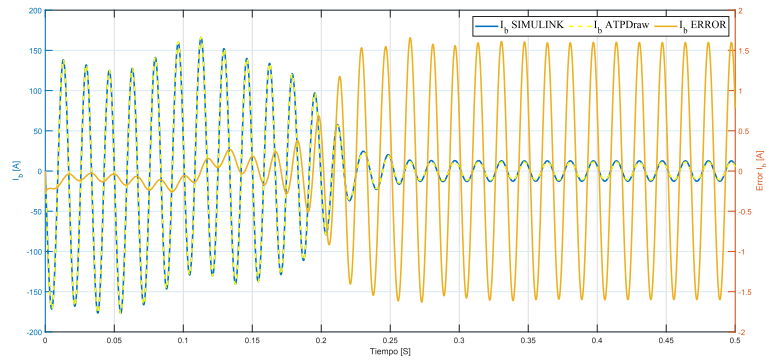
(c) Corriente i_c .

Figura 5.7: Comparación entre Simulink y ATPDraw de las corrientes del estator de la máquina de inducción con modelo VBR.

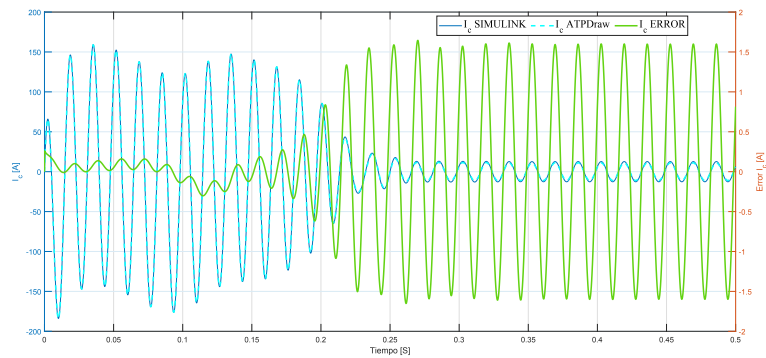
En la Fig. 5.8, se observa la superposición y el error de las corrientes del estator i_a , i_b , i_c de la máquina de inducción con VBR.



(a) Corriente i_a .



(b) Corriente i_b .

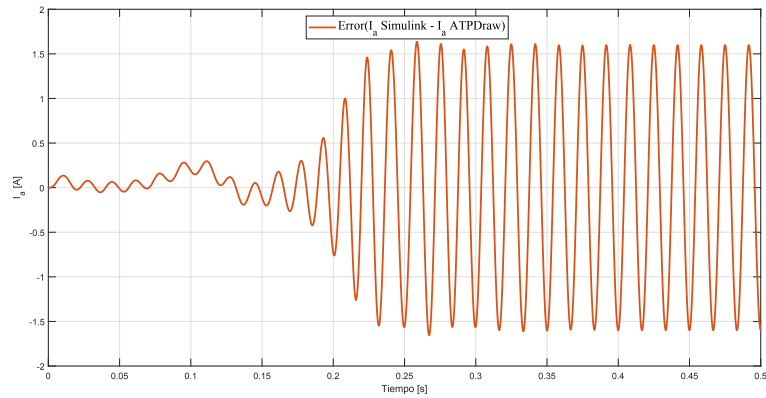


(c) Corriente i_c .

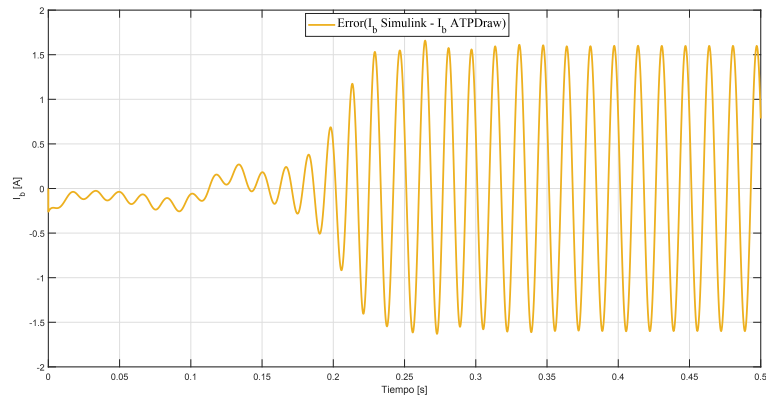
Figura 5.8: Comparaciones y error entre Simulink y ATPDraw de las corrientes del estator de la máquina de inducción con modelo VBR.

En la Fig. 5.9, se observa el error obtenido entre las curvas de las tres corrientes del estator (i_a , i_b , i_c), de la máquina de inducción entre Simulink y ATPDraw.

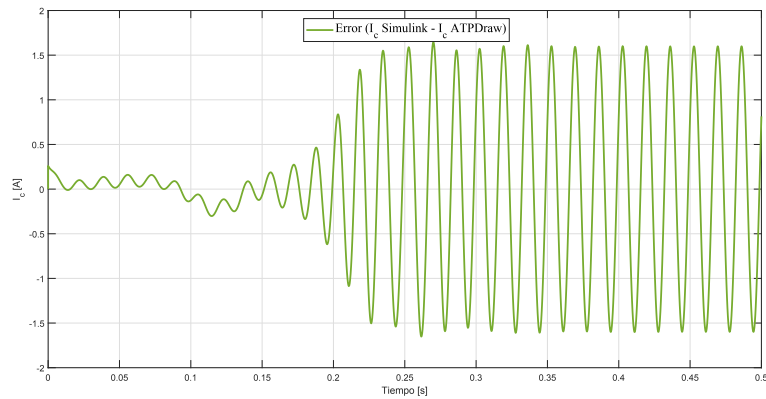
- El error obtenido entre las curvas de la corriente del estator (i_a) entre Simulink y ATPDraw es 0.75 %, (i_b) es 1 %, (i_c) el 1 %.



(a) Error de la corriente i_a .



(b) Error de la corriente i_b .



(c) Error de la corriente i_c .

Figura 5.9: Errores de las corrientes del estator i_a , i_b , i_c entre Simulink y ATPDraw de la máquina de inducción con modelo VBR.

5.2. Comparaciones entre Simulink y ATPDraw de la MI equivalente

Para la comparación, se realizó una superposición entre las curvas de la velocidad angular mecánica ω_m , el par eléctrico T_e , y las corrientes i_a , i_b , i_c de la máquina de inducción equivalente.

5.2.1. Par eléctrico T_e de MI equivalente

En la Fig. 5.10, se observa la superposición del par eléctrico T_e , entre Simulink y ATPDraw. Como se observa en las Figuras 5.10 y 5.11, las curvas no son exactas. Esto se debe al factor de amortiguamiento que se considera diferente en el modelo ATP-EMTP. En ATPDraw se considera en 30 % las pérdidas mecánicas de la máquina y esto difiere del modelo VBR, tanto en Simulink como en ATPDraw que considera un coeficiente de fricción.

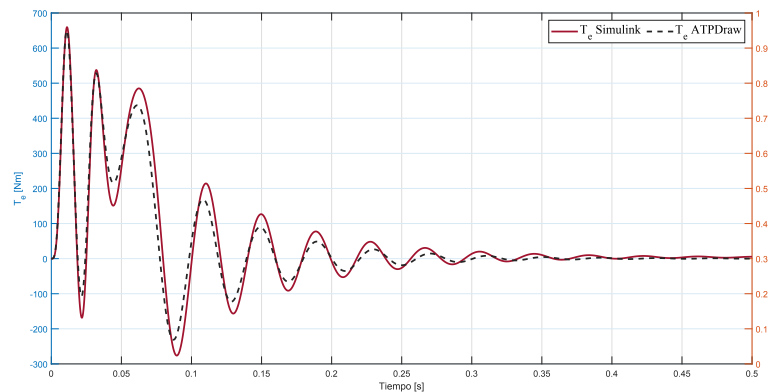


Figura 5.10: Comparación del par eléctrico T_e entre Simulink y ATPDraw de la MI equivalente.

En la Fig. 5.11, se observa el error entre la superposición de las curvas del par eléctrico T_e de Simulink y ATPDraw dando como resultado un error mayor entre las dos curvas.

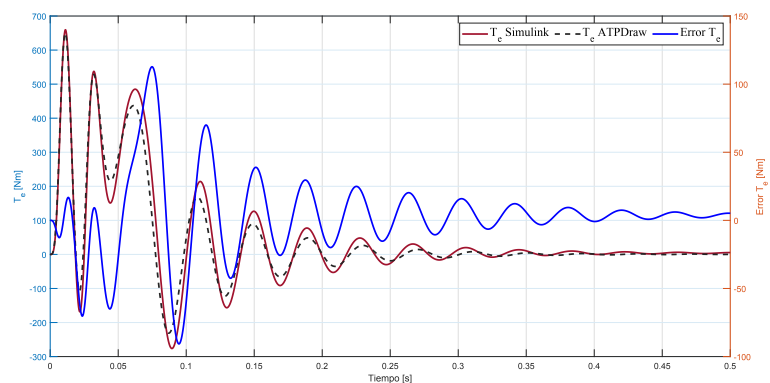


Figura 5.11: Comparación y error del par eléctrico T_e entre Simulink y ATPDraw de la MI equivalente.

Para calcular el error que existe entre las gráficas del par eléctrico T_e entre los dos programas, se deben exportar los datos a MATLAB, luego realizar la resta entre los datos obtenidos en ATPDraw y Simulink.

En la Fig. 5.12, se observa el error del par eléctrico T_e dando como resultado un valor significativo del 20.36 %, debido a las diferencias existentes en el modelado del factor de amortiguamiento.

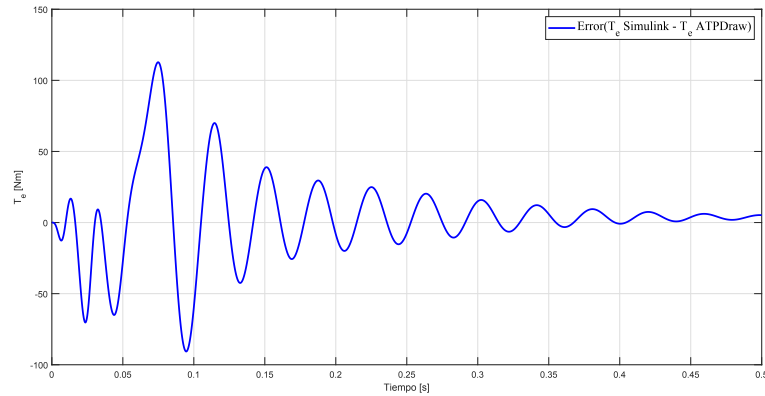


Figura 5.12: Error del par eléctrico T_e (Simulink - ATPDraw) de la MI equivalente.

5.2.2. Velocidad angular mecánica ω_m de la MI equivalente

En la Fig. 5.13, se observa la superposición de la velocidad angular mecánica ω_m de la máquina de inducción equivalente, siendo un resultado con un margen de error menor al 2%.

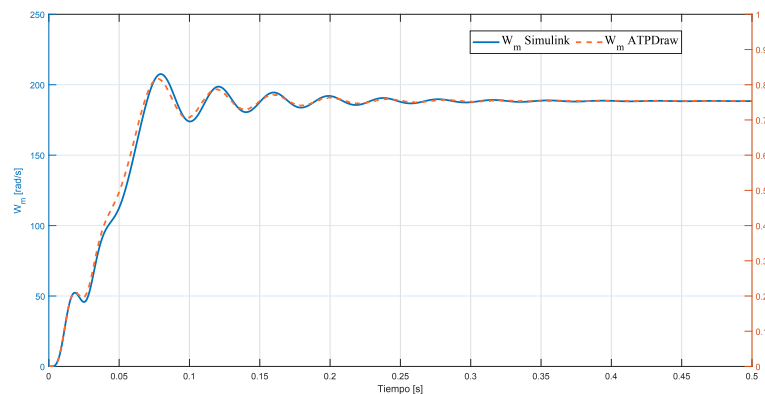


Figura 5.13: Comparación de la velocidad angular mecánica ω_m entre Simulink y ATPDraw de la MI equivalente.

En la Fig. 5.14, se observa el error existente entre la superposición de las curvas de la velocidad angular mecánica ω_m . Este error se calculó exportando los datos del ATPDraw, para posteriormente transferirlos a MATLAB y realizar la comparación.

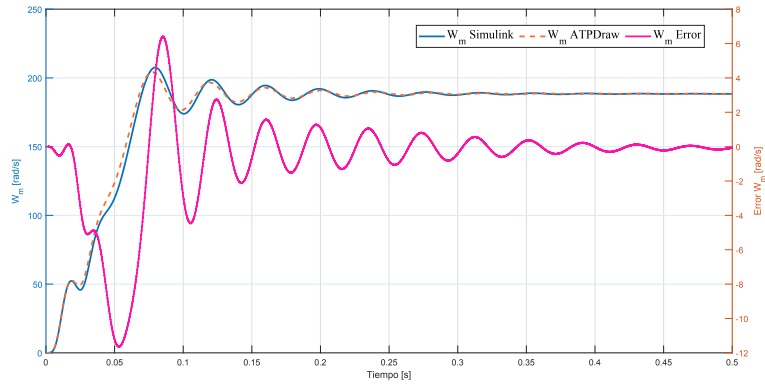


Figura 5.14: Comparación y error de la velocidad angular mecánica ω_m entre Simulink y ATPDraw de la MI equivalente.

En la Fig. 5.15, se observa el error que existe entre las dos curvas de la velocidad angular mecánica ω_m , de la MI equivalente entre (Simulink y ATPDraw), dando como resultado un valor inferior a 1.86 %.

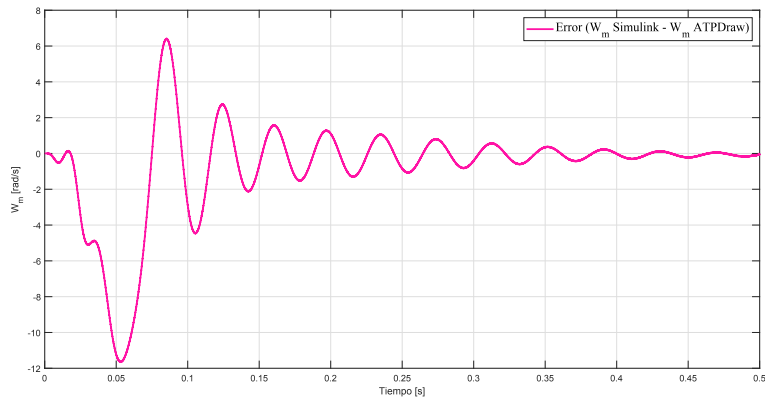
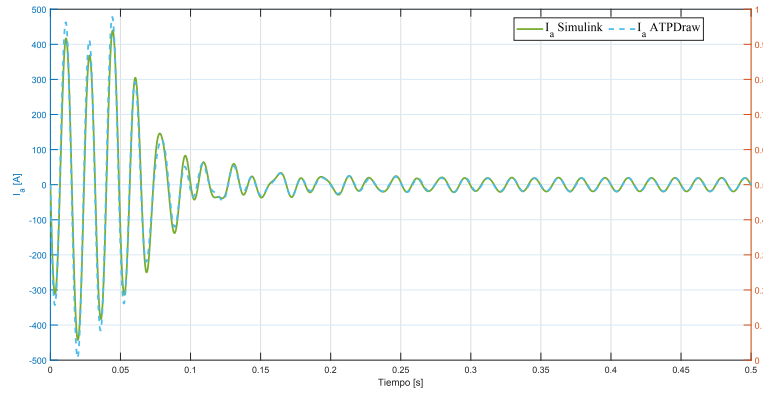


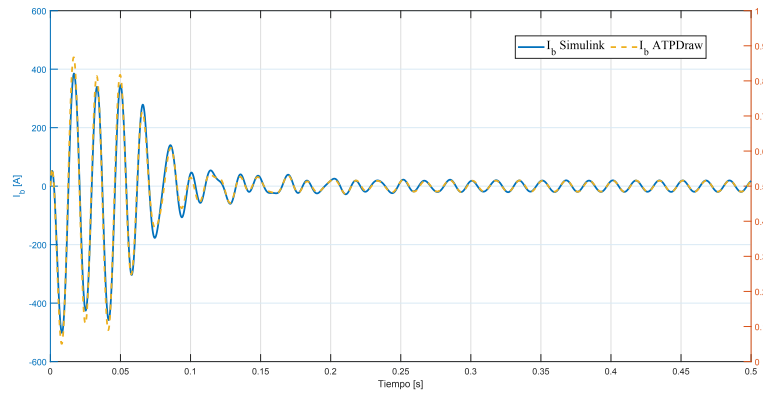
Figura 5.15: Error de la velocidad angular mecánica ω_m (Simulink - ATPDraw) de la MI equivalente.

5.2.3. Corrientes del estator i_a , i_b , i_c de la MI equivalente

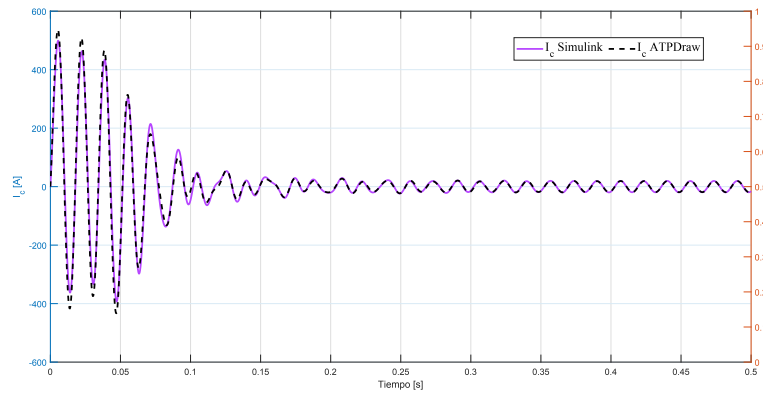
En la Fig. 5.16, se observa la superposición de las tres corrientes i_a , i_b , i_c , de la máquina de inducción equivalente entre ATPDraw y Simulink.



(a) Corriente i_a .



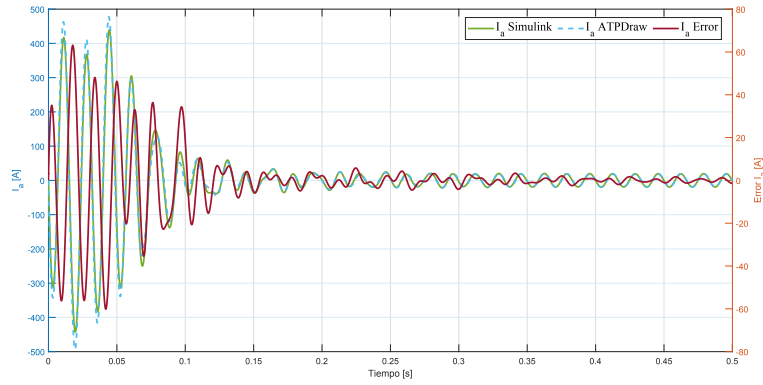
(b) Corriente i_b .



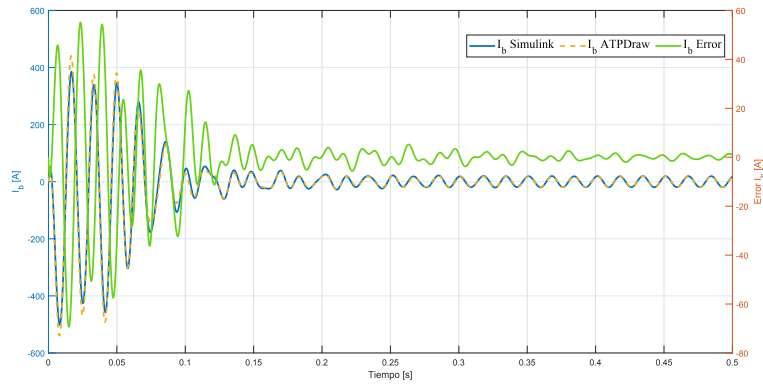
(c) Corriente i_c .

Figura 5.16: Comparación de las corrientes del estator i_a , i_b , i_c entre Simulink y ATPDraw de la MI equivalente.

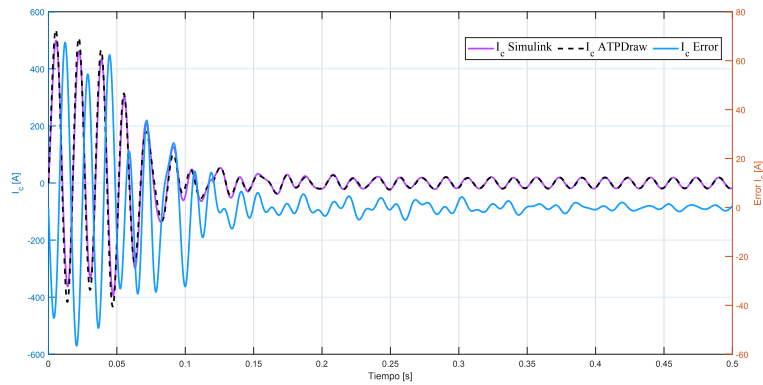
En la Fig. 5.17, se observa el error existente en la superposición de las curvas de las corrientes del estator i_a , i_b , i_c . Para simular se debe exportar los datos del ATPDraw de cada corriente al MATLAB, posteriormente restar cada corriente entre ATPDraw y MATLAB, para observar el error existente en cada una de las corrientes.



(a) Corriente i_a .



(b) Corriente i_b .

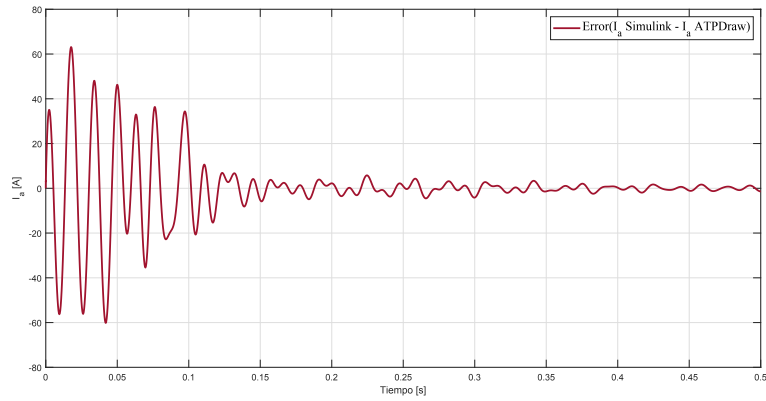


(c) Corriente i_c .

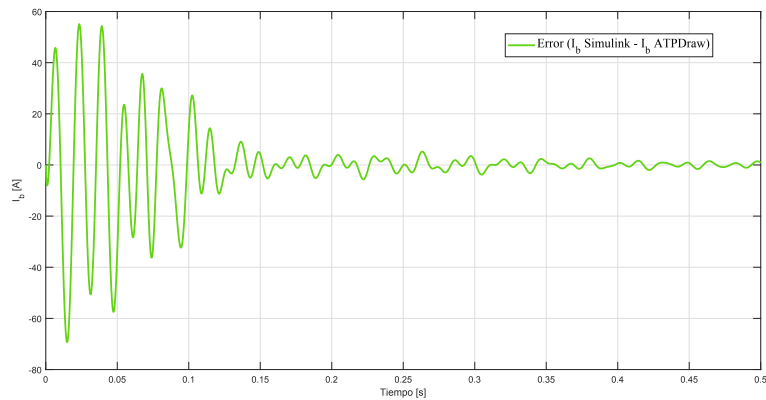
Figura 5.17: Comparación y error de las corrientes i_a , i_b , i_c entre Simulink y ATPDraw de la MI equivalente.

En la Fig. 5.18, se observa el error que existe al realizar la superposición de cada corriente dando como resultado lo siguiente:

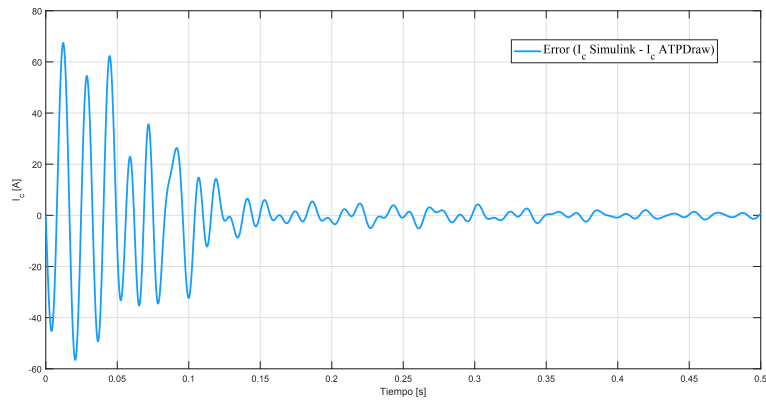
- El error que existe entre la corriente (i_a) de Simulink y ATPDraw cuando se realiza el cálculo es de 0.22 %, para (i_b) es de 0.20 %, e (i_c) de 0.21 %.



(a) Error de la corriente i_a .



(b) Error de la corriente i_b .



(c) Error de la corriente i_c .

Figura 5.18: Error de las corrientes del estator i_a , i_b , i_c (Simulink - ATPDraw) de la MI equivalente.

5.3. Comparaciones de la MI equivalente con VBR entre Simulink y ATPDraw

Para la comparación se realizó una superposición entre las curvas de la velocidad angular mecánica ω_m , el par eléctrico T_e , y las corrientes del estator i_a , i_b , i_c de la máquina de inducción equivalente con VBR.

5.3.1. Par eléctrico T_e de la MI equivalente con VBR

En la Fig. 5.19 se observa la superposición del par eléctrico T_e entre Simulink y ATPDraw, como se observa las curvas son muy cercanas la una con la otra.

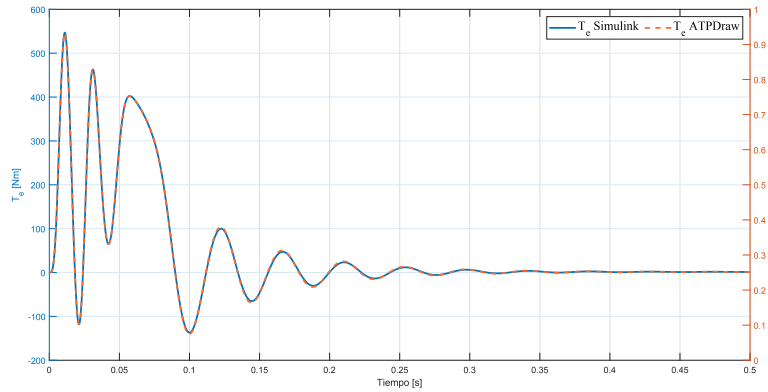


Figura 5.19: Comparación del par eléctrico T_e entre Simulink y ATPDraw de la MI equivalente con modelo VBR.

En la Fig. 5.20, se observa el error entre la superposición del par eléctrico T_e de las dos curvas.

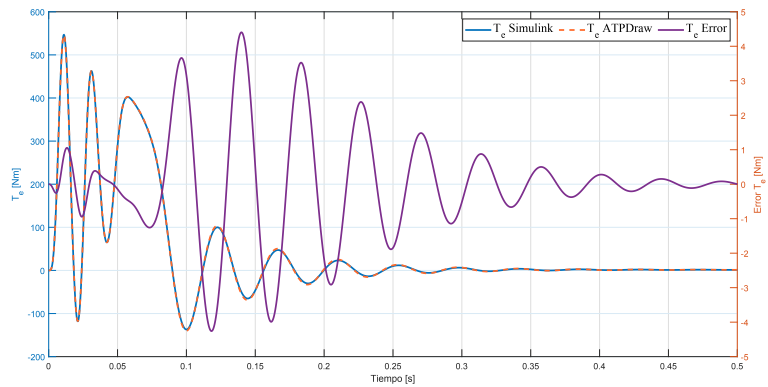


Figura 5.20: Comparación y error del par eléctrico T_e entre Simulink y ATPDraw de la MI equivalente con modelo VBR.

En la Fig. 5.21, se observa el error del par eléctrico T_e dando como resultado un valor inferior al 0.1 %.

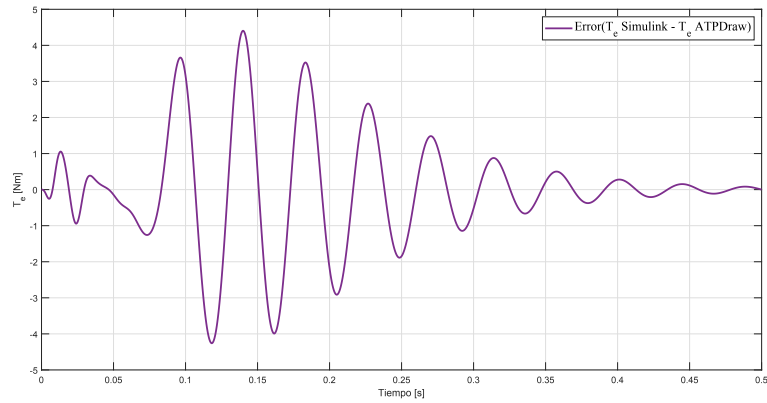


Figura 5.21: Error del par eléctrico T_e (Simulink - ATPDraw) de la MI equivalente con modelo VBR.

5.3.2. Velocidad angular mecánica ω_m de la MI equivalente con VBR

En la Fig. 5.22, se observa la superposición de la velocidad angular mecánica ω_m , de la máquina de inducción equivalente con VBR entre Simulink y ATPDraw.

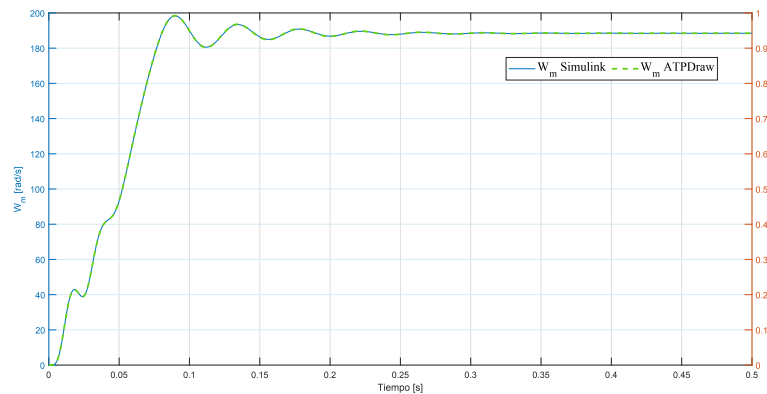


Figura 5.22: Comparación de la velocidad angular mecánica ω_m entre Simulink y ATPDraw de la MI equivalente con modelo VBR.

Para determinar el error, se realiza la superposición de las dos curvas, se extraen los datos del ATPDraw y se exportan a MATLAB. En la Fig. 5.23, se observa la superposición de las dos curvas y el error entre ATPDraw y Simulink.

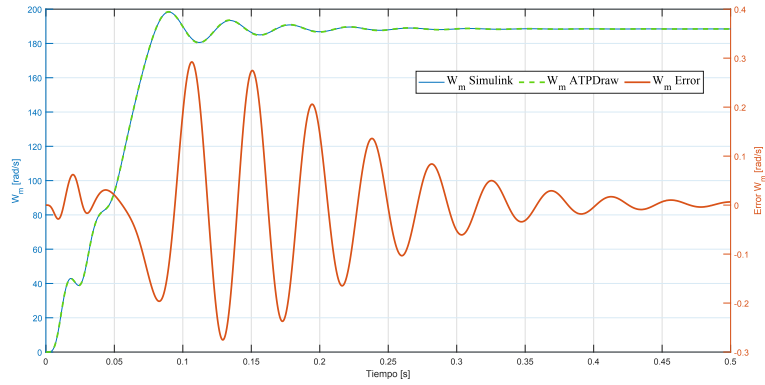


Figura 5.23: Comparación y error de la velocidad angular mecánica ω_m entre Simulink y ATPDraw de la MI equivalente con modelo VBR.

En la Fig. 5.24, se observa el error de la velocidad angular mecánica ω_m , de la MI equivalente con VBR de Simulink y ATPDraw dando un valor de 0.1 %.

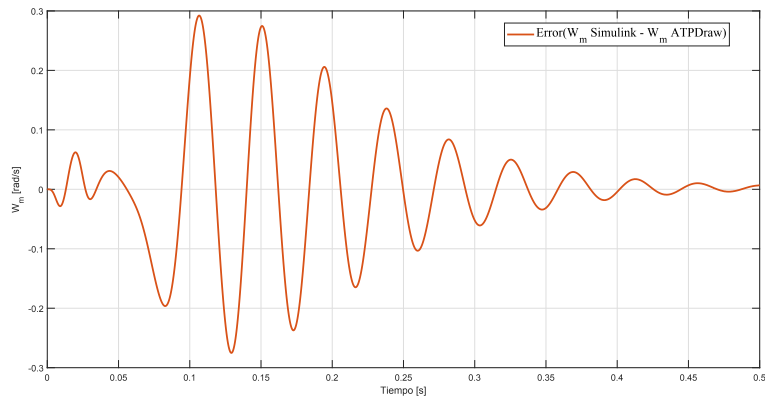
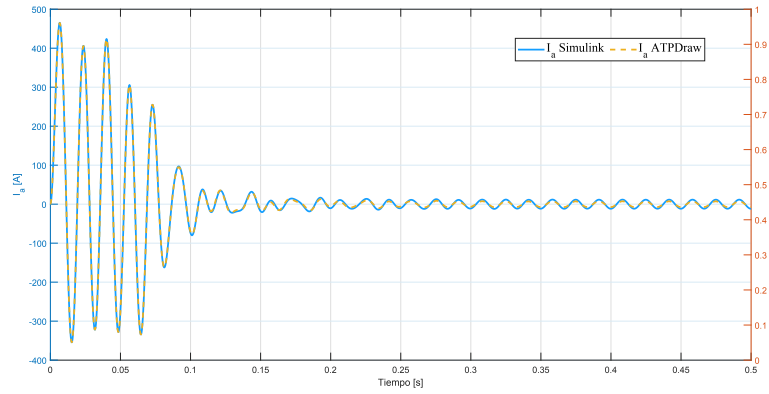


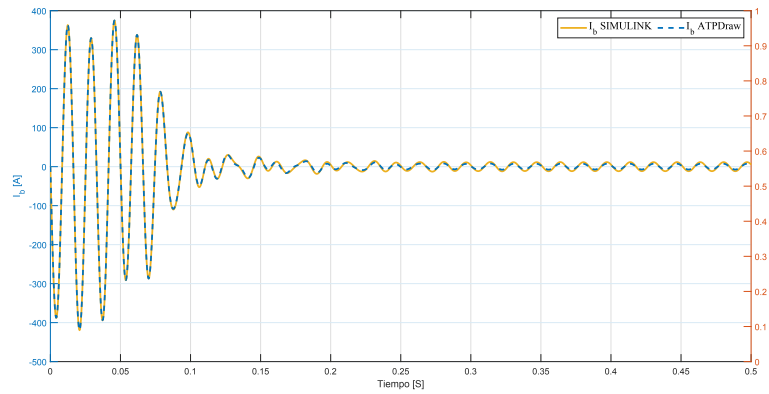
Figura 5.24: Error de la velocidad angular mecánica ω_m (Simulink - ATPDraw) de la MI equivalente con modelo VBR.

5.3.3. Corrientes del estator i_a , i_b , i_c de la MI equivalente con VBR

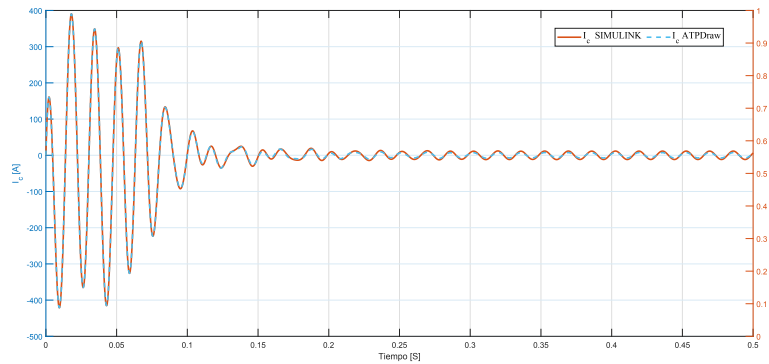
En la Fig. 5.25, se observa la superposición de las tres corrientes i_a , i_b , i_c , de la máquina de inducción equivalente con VBR.



(a) Corriente i_a .



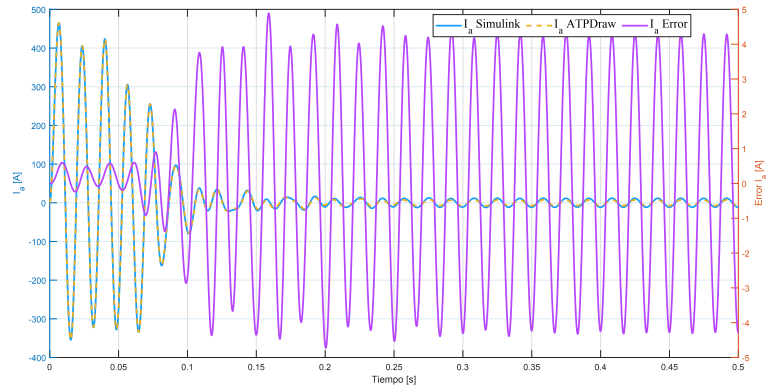
(b) Corriente i_b .



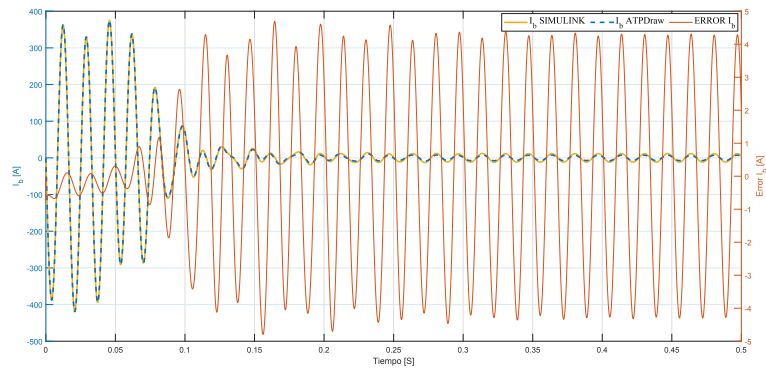
(c) Corriente i_c .

Figura 5.25: Comparación de las corrientes i_a , i_b , i_c entre Simulink y ATPDraw de la MI equivalente con modelo VBR.

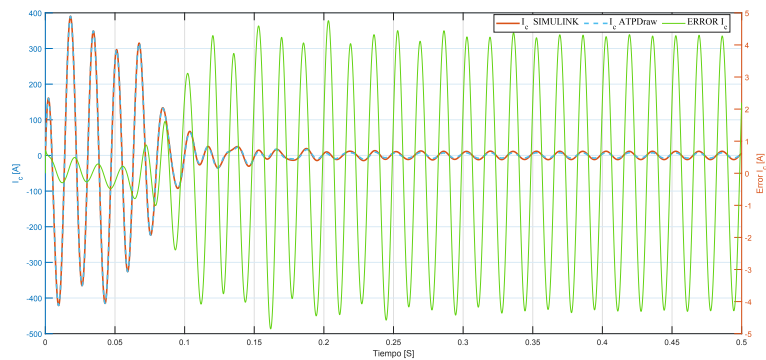
En la Fig. 5.26, las corrientes del estator i_a , i_b , i_c , y el error de la máquina de inducción equivalente con VBR entre Simulink y ATPDraw.



(a) Corriente i_a .



(b) Corriente i_b .

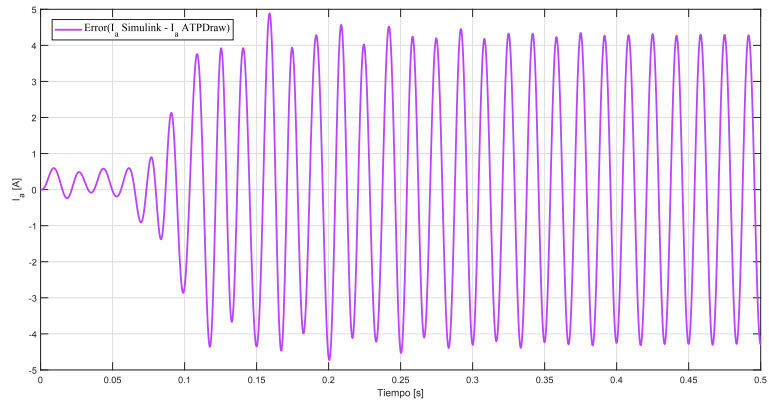


(c) Corriente i_c .

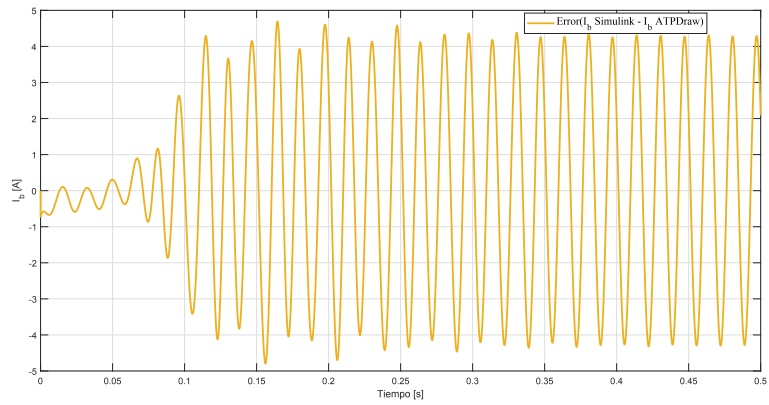
Figura 5.26: Comparación y el error de las corrientes i_a , i_b , i_c entre Simulink y ATPDraw de la MI equivalente con modelo VBR.

En la Fig. 5.27, se observa el error de cada corriente, donde se obtienen los siguientes resultados:

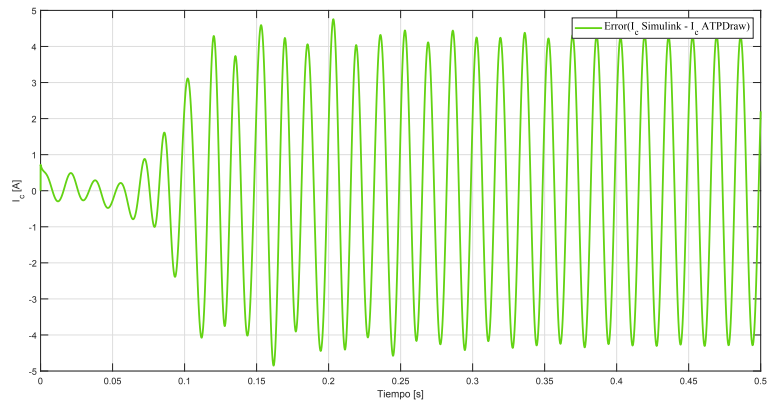
- El error que existe entre la corriente (i_a) de Simulink y ATPDraw cuando se realiza el calculo es de 0.1 %, para (i_b) 0.1 %, e (i_c) de 0.1 %.



(a) Error de la corriente i_a .



(b) Error de la corriente i_b .



(c) Error de la corriente i_c .

Figura 5.27: Error de las corrientes del estator i_a , i_b , i_c (Simulink - ATPDraw) de la MI equivalente con modelo VBR.

6 Conclusiones y Recomendaciones

6.1. Conclusiones

Los modelos desarrollados de la máquina de inducción VBR en ATPDraw y Simulink han permitido cumplir el objetivo propuesto en esta investigación. El modelo realizado demostró ser tan preciso, y mucho más rápido en su ejecución, que su equivalente en MATLAB/Simulink. Las curvas del par eléctrico son prácticamente idénticas en ambos modelos, al igual que las curvas de la velocidad angular y las de corriente. El error obtenido entre ATPDraw y Simulink, en ningún caso superó el 1 %.

La programación en MODELS resultó ser una herramienta muy versátil y simple de utilizar. Además, permitió una rápida interrelación con el modelo circuital desarrollado en el ambiente de ATPDraw. La principal dificultad fue la implantación de fuentes dependientes de tensión, aisladas de tierra, pero se pudieron sintetizar utilizando equivalentes Norton y fuentes dependiente TACS de corriente, controladas mediante el programa desarrollado en MODELS.

Para realizar la superposición de las curvas a ser comparadas fue muy importante exportar los resultados obtenidos en ATPDraw, tales como el par, la velocidad, y las corrientes, utilizando los mismos tiempos de simulación del programa MATLAB, donde se realizaron la mayoría de las comparaciones. Esto resulta relativamente simple mediante la herramienta PLOTXY disponible en ATPDraw, porque tiene un módulo de exportación de datos en los formatos que utiliza MATLAB.

La comparación entre los resultados de los modelos de máquinas existentes en ATP-EMTP y el desarrollo de VBR en esta plataforma, tuvieron errores que superaron el 1 %, debido a que existen diferencias en los modelos incluidos en el entorno ATP, referentes a los factores de amortiguamiento. Este parámetro considera que el 30 % de las pérdidas de la máquina son debidas al sistema mecánico y resulta compleja su asociación al coeficiente de fricción, en el desarrollo de este trabajo. En cuanto al par eléctrico y a las corrientes de la máquina, se logró mejorar el margen de error, que resultó ser inferior al 1 %.

Al momento de realizar la comparación de la máquina equivalente entre ATPDraw y Simulink con VBR, los resultados son prácticamente iguales en ambos simuladores, existiendo un límite de error inferior al 0.05 %, resultando que el modelo VBR en ATP-EMTP es más rápido y produce los mismos resultados para corrientes, par y velocidad.

El programa ATPDraw es muy poderoso para realizar simulaciones de máquinas eléctricas y otros equipos, determinando fenómenos existentes en los sistemas eléctricos. Este programa puede ser utilizado comercialmente y no tiene costo para el usuario, aun cuando requiere gestionar una licencia para su uso, donde el interesado se compromete a no realizar desarrollos comerciales de esta herramienta.

6.2. Recomendaciones

La versatilidad de la herramienta desarrollada permite extender su aplicación a otros tipos de máquinas tales como la máquina de inducción de rotor bobinado, doble jaula, jaula profunda, máquinas sincrónicas o máquinas de reluctancia.

Estos desarrollos pueden ser utilizados en simulaciones de sistema de generación o motorización, que incluyan controladores electrónicos de potencia. Un ejemplo interesante es el desarrollo de sistema de generación eólicos, dinámica de sistemas de potencia o redes inteligentes.

La experiencia obtenida en la integración de los circuitos, TACS y MODELS, permite expandir el usos de ATP-EMTP y su interfase ATPDraw a muchas aplicaciones complejas de los sistemas eléctricos de potencia que incluyan protecciones, TACS, redes inteligentes, sistemas de control, etc.

El modelo desarrollado en este trabajo también puede ser implementado utilizando el sistema en por unidad.

A Anexos

A.1. Anexo 1: Modelo dinámico de la máquina de inducción con VBR en ATPDraw

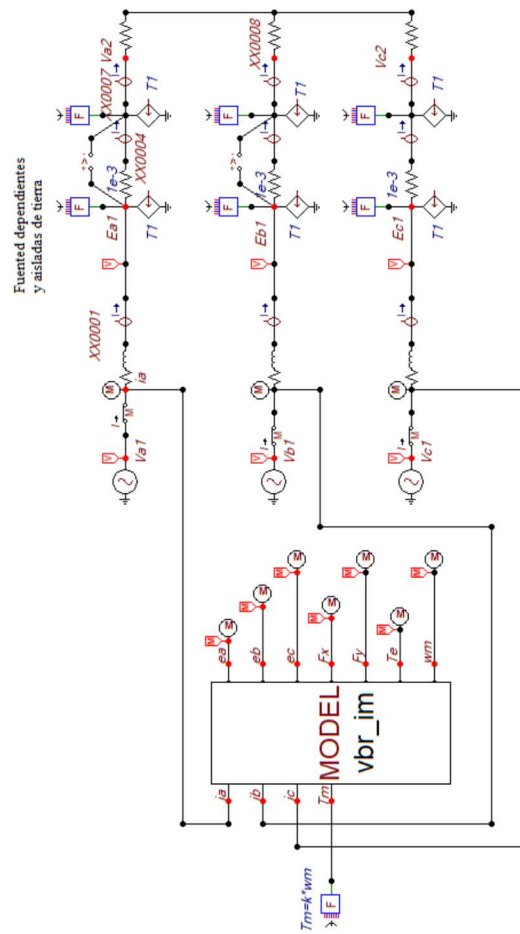


Figura A.1: Modelo dinámico de la MI con VBR en ATPDraw.

A.2. Anexo 2: Código implementado en MODEL

Se realiza el código para el desarrollo de las ecuaciones para determinar los parámetros de la máquina de inducción con VBR en ATPDraw.

```

MODEL VBR_IM
DATA Re {dflt: 0.3},Rr {dflt: 0.3}
DATA Lde {dflt: 2.e-3},Ldr {dflt: 2.e-3},Msr {dflt: 60.e-3};
DATA J {dflt: 0.163},Kr {dflt:0},p {dflt:2}
INPUT ia , ib , ic , Tm
CONST SQRT23 {val: 0.816496581}, SQRT1_2 {val: 0.707106781}
CONST SQRT1_6 {val: 0.408248290}, SQRT1_3 {val: 0.577350269}
OUIPUT ea ,eb ,ec , Frx ,Fry ,Te,wm
VAR ea ,eb ,ec , Frx ,Fry ,Te,wm ,ix , iy , io , pFrx ,pFry , ex , ey , eo ,pwm,Lr ,M
HISTORY
    pFrx {dflt:0}
    integral(pFrx){dflt:0}
    pFry {dflt:0}
    integral(pFry){dflt:0}
    pwm {dflt:0}
    — Angular speed derivative integral
    (pwm){dflt:0}
    io {dflt:0}
INIT
    ea:=0
    eb:=0
    ec:=0
    wm:=0
    pwm:=0
    pFrx:=0
    pFry:=0
    Frx:=0
    Fry:=0
ENDINIT
EXEC
    Lr:=(Ldr+Mer) — Rotor inductance
    M:=Mer — Mutual inductance
    — Transformación a vectores espaciales
    ix:=SQRT23*(ia -0.5*ib -0.5*ic)
    iy:=SQRT1_2*(ib-ic)
    io:=SQRT1_2*(ia+ib+ic)
    — Derivada del flujo del rotor
    pFrx:=-Rr*Frx/Lr-p*wm*Fry+Rr*M*ix/Lr
    pFry:=-Rr*Fry/Lr+p*wm*Frx+Rr*M*iy/Lr
    — Cálculo del flujo del rotor por integración
    Frx:=INTEGRAL(pFrx)
    Fry:=INTEGRAL(pFry)
    — Cálculo de las FEM en coordenadas de vectores espaciales
    ex:=-M*Rr*Frx/(Lr**2)-M*p*wm*Fry/Lr

```

```

ey:=-M*Rr*Fry/(Lr**2)+M*p*wm*FrX/Lr
eo:=Rs*io+Lls*deriv(io)
— Transformación de las FEM a coordenadas naturales
ea:= SQRT23*ex+SQRT1_3*eo
eb:=-SQRT1_6*ex+SQRT1_2*ey+SQRT1_3*eo
ec:=-SQRT1_6*ex-SQRT1_2*ey+SQRT1_3*eo
— Cálculo del par eléctrico
Te:=p*M*(FrX*iy-Fry*ix)/Lr
— Ecuación dinámica
pwm:=(Te-Tm-Kr*wm)/J
— Integración de la ecuación dinámica
wm:=INTEGRAL(pwm)

```

```

ENDEXEC
ENDMODEL

```

A.3. Anexo 3: Modelado dinámico de la máquina de inducción equivalente

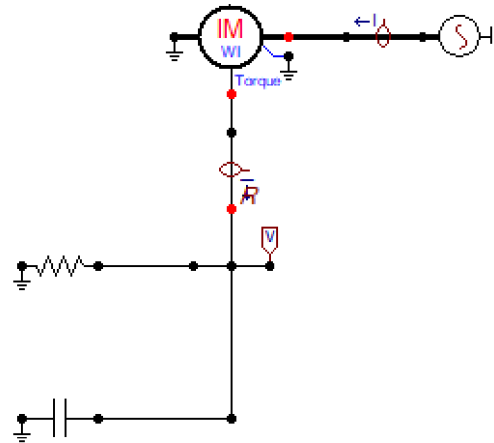


Figura A.2: Modelado dinámico de la máquina de inducción equivalente en ATP-Draw.

A.4. Anexo 4: Parámetros de la máquina de inducción equivalente

Tabla A.1: Parámetros de la máquina de inducción equivalente.

Datos.	Valor.	Unidades.
Frecuencia.	60	Hz
Voltaje L-L	0.46	kVrms
Potencia	30	hp
Velocidad	1800	rpm
Factor de potencia.	0.86	cos (ϕ)
Eficiencia.	0.95	pu
Slip	1	%
Start Curr.	2	pu
Par de arranque.	2	pu
Par de carga.	1	pu
Par máximo.	3	pu
Factor de carga.	0	

A.5. Anexo 5: Modelo dinámico de la máquina de inducción con VBR en Simulink

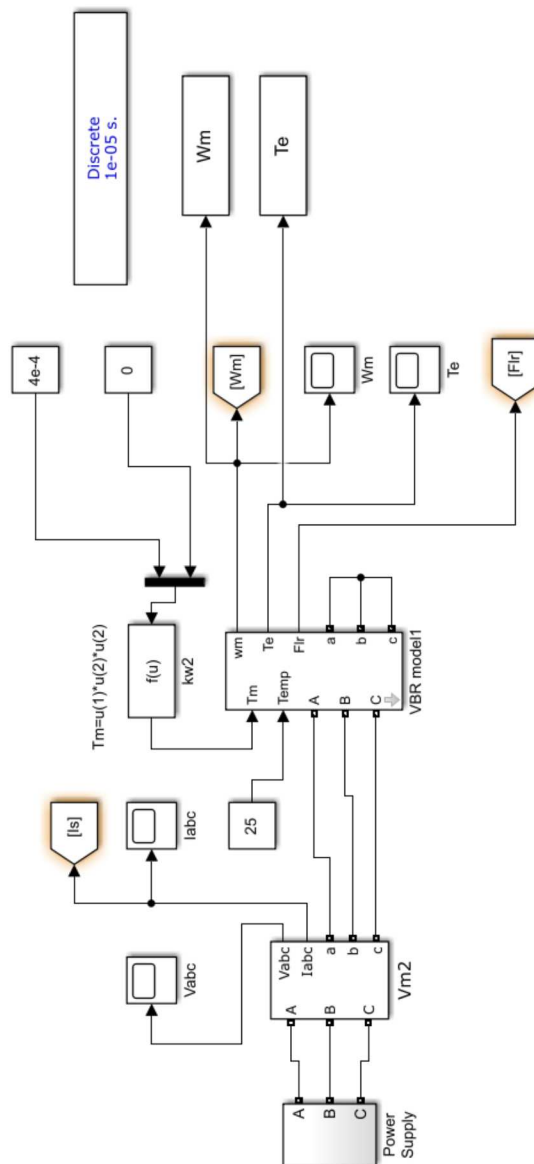


Figura A.3: Modelado dinámico de MI con VBR en Simulink.

A.6. Anexo 6: Modelo VBR de la máquina de inducción

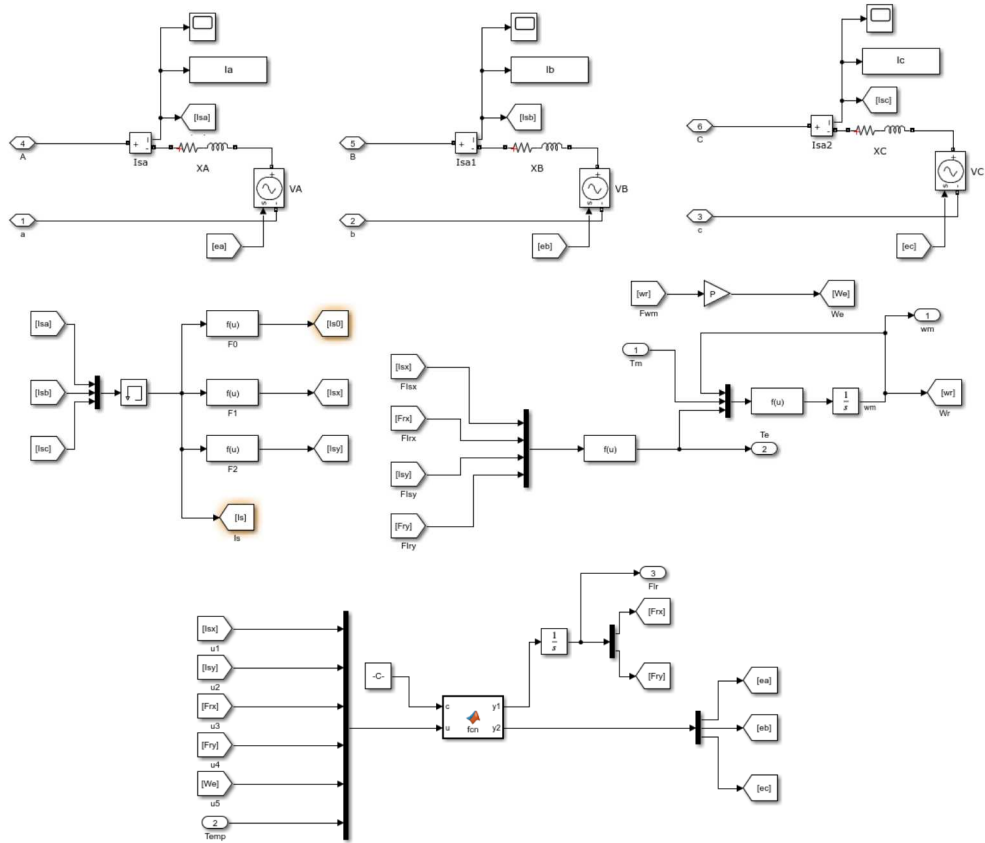


Figura A.4: Modelo VBR de la máquina de inducción en Simulink.

A.7. Anexo 7: Modelos de la máquina de inducción equivalente en Simulink

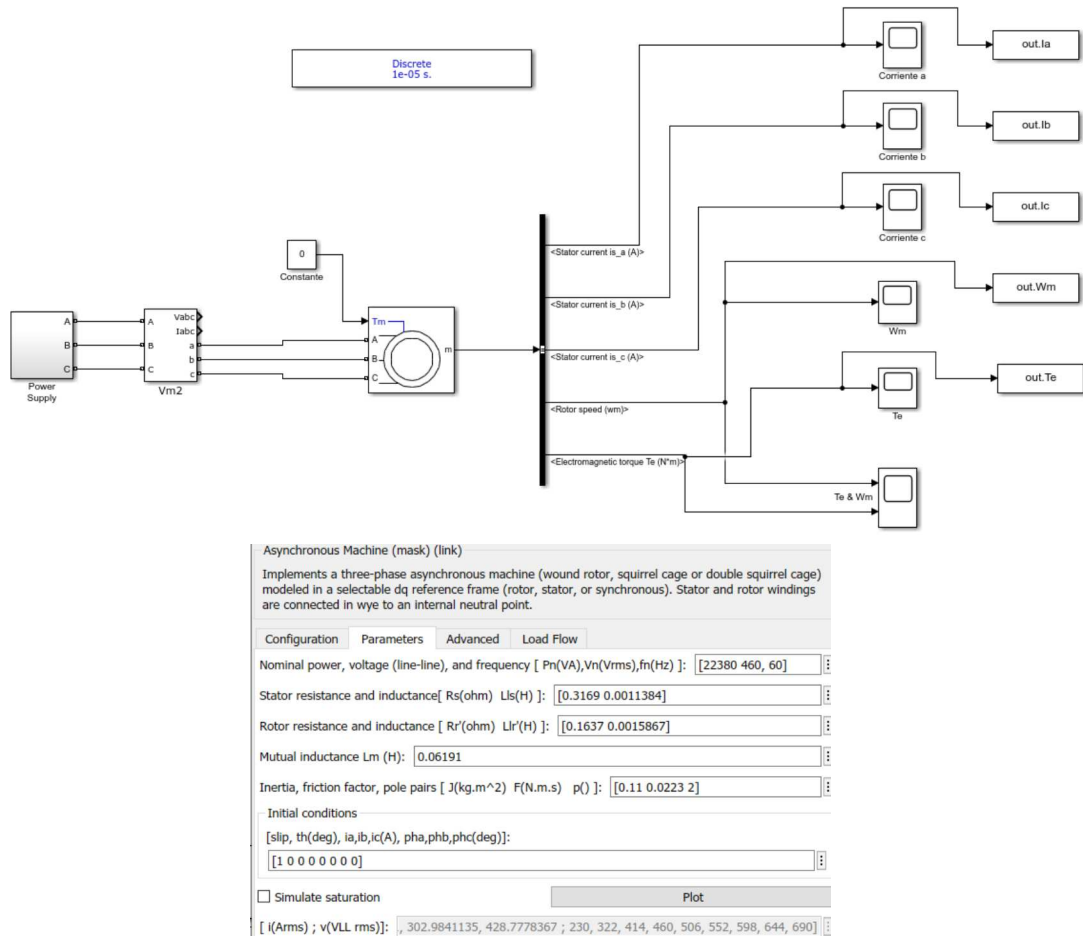


Figura A.5: Modelo de la MI equivalente en Simulink.

Bibliografía

- [1] A. A. Gomes, A. E. Mejía, and C. A. Torres, “Control vectorial de la máquina de inducción,” *Scientia et Technica*, vol. 15, no. 43, pp. 55–60, 2009.
- [2] L. Wang, J. Jatskevich, and S. D. Pekarek, “Modeling of induction machines using a voltage-behind-reactance formulation,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 23, no. 2, pp. 382–392, 2008.
- [3] J. M. Aller, J. C. Viola, J. A. Restrepo, M. Fajardo, A. Ginart, J. W. Rengifo, J. D. Loja, and J. D. Ochoa, “Space vector control of asymmetrical single-phase induction motors,” in *2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, pp. 1684–1690, Sep. 2018.
- [4] J. Benzaquen, J. Rengifo, E. Albáñez, and J. M. Aller, “Parameter estimation for deep-bar induction machines using instantaneous stator measurements from a direct startup,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 32, pp. 516–524, June 2017.
- [5] J. M. Aller, J. A. Restrepo, J. C. Viola, P. R. Barbecho, J. Rengifo, and F. A. Quizhpi, “Comparison of the parameter estimation for the induction machine dynamic model using instantaneous measurements at standstill and during start-up,” in *2015 IEEE Workshop on Power Electronics and Power Quality Applications (PEPQA)*, pp. 1–6, June 2015.
- [6] J. M. Aller, J. A. Restrepo, J. C. Viola, and J. R. Mayor, “Simplified voltage behind reactance model for the six-phase open-end salient pole pmsm,” in *2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, vol. 1, pp. 2216–2221, Aug 2020.
- [7] M. A. Tamashiro, G. C. Guimaraes, A. R. Rodrigues, R. V. A. Monteiro, T. L. Oliveira, and L. R. C. Silva, “Comparative study of tacs/dbm and models of atp-empt applied to power systems computer simulation,” *IEEE Latin America Transactions*, vol. 14, pp. 704–712, Feb 2016.
- [8] L. Dube, “Models in atp,” *Language manual*, 1996.
- [9] A. Martin, “Los motores aaa + reconstruidos revelan los principios de funcionamiento de las máquinas alimentadas con atp,” *Nature*, pp. 1115–1120, 2005.
- [10] M. Tamashiro, G. Guimaraes, A. Rodrigues, R. Monteiro, T. Oliveira, and L. Silva, “Comparative study of tacs/dbm and models of atp-empt applied to power systems computer simulation,” *IEEE Latin America Transactions*, vol. 14, no. 2, pp. 704–712, 2016.
- [11] T. Funabashi, T. Sugimoto, T. Ito, T. Ueda, and A. AMETANI, “User’s guide to models in atp user’s guide to models in atp, 1996,”
- [12] J.M.Aller, “Métodos para el análisis y control dinámico de la máquina de inducción,” *Universidad Simón Bolívar. División de Ciencias Físicas y Matemáticas*.

Departamento de Conversión y Transporte de Energía. Valle de Sartenejas, Venezuela Enero, 1997.

- [13] H. C. Stanley, “An analysis of the induction machine,” *Electrical Engineering*, vol. 57, pp. 751–757, Dec 1938.
- [14] I. L. Kosow, *Máquinas eléctricas y transformadores*. Pearson Educación, 1993.
- [15] A. A. Jaramillo-Matta, E. Franco-Mejía, and L. Guasch-Pesquer, “Estimación de parámetros invariantes para un motor de inducción,” *Dyna*, vol. 78, no. 169, pp. 88–94, 2011.
- [16] M. A. Ortiz Padilla *et al.*, “Simulación y control de motores de reluctancia conmutada,” B.S. thesis, Bogotá-Uniandes, 2014.
- [17] M. A. Rodríguez Pozueta, “Máquinas síncronas,” *Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética. Universidad de Cantabria*, 2015.
- [18] J. M. Aller, “Máquinas eléctricas rotativas: Introducción a la teoría general,” *Editorial Equinoccio*, 2008.
- [19] J. F. Mora, *Máquinas eléctricas*, vol. 5. McGraw-Hill, 2008.
- [20] M. Galileo Ferraris, Hoepli, “Electrodynamic rotations by means of alternating currents,” *Accademia delle Scienze*, vol. I, pp. 333–348, 1902.
- [21] K. C. Lee, “Non-linear corona models in an electromagnetic transients program (empt),” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-102, no. 9, pp. 2936–2942, 1983.
- [22] E. Haginomori, T. Koshiduka, J. Arai, and H. Ikeda, *Power system transient analysis: theory and practice using simulation programs (ATP-EMTP)*. John Wiley & Sons, 2016.
- [23] C. C. Leonardo de Jesús, “Teoría y práctica con el atp,” *Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia*, 1995.
- [24] H. Höidalen, “User manual supplements new feature in atpdraw v5,” 2007.
- [25] H. K. Höidalen, “Calculation of lightning-induced overvoltages using models,” in *Proc. Int. Conf. Power Syst. Transients*, pp. 359–364, Citeseer, 1999.
- [26] K. M. Shebl, E. A. Badran, and E. Abdalla, “A combined models-tacs atpdraw general model of the high impedance faults in distribution networks,” *MEPCON*, vol. 10, pp. 19–21, 2010.