

**VALIDACIÓN DEL MODELO DQ0 DE LA MÁQUINA SÍNCRONA PARA  
ESTUDIOS DE TRANSITORIOS ELECTROMAGNÉTICOS**

**ANDRÉS MAURICIO SANTOS HINCAPIÉ**

**CARLOS ALBERTO GÓMEZ RODRÍGUEZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**

**FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS**

**ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES**

**BUCARAMANGA**

**2010**

**VALIDACIÓN DEL MODELO DQ0 DE LA MÁQUINA SÍNCRONA PARA  
ESTUDIOS DE TRANSITORIOS ELECTROMAGNÉTICOS**

**ANDRÉS MAURICIO SANTOS HINCAPIÉ**

**CARLOS ALBERTO GÓMEZ RODRÍGUEZ**

**Tesis de grado para optar al título de INGENIERO ELECTRICISTA**

**Director**

**LILIANA PATRICIA JAIMES ROJAS**

**INGENIERA ELECTRICISTA, M.Sc.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**

**FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS**

**ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES**

**BUCARAMANGA**

**2010**

## DEDICATORIA

*A Dios por ser mí mejor amigo, por apoyarme en todo momento y por no dejarme caer nunca. Por mantenerme siempre en una actitud positiva a lo largo de mi vida.*

*A mis padres Nohemy Rodríguez y Alberto Gómez quienes siempre guiaron mis pasos y han logrado hacer de mí una persona de éxito, dándome su carisma, amor y apoyo incondicional.*

*A mi hermana Lizeth por el apoyo brindado en este proceso.*

*A Laura Rosas quien fue un gran apoyo en todo este proceso, por sus buenos consejos, por trasmitirme toda esa buena energía y por tener confianza en mí.*

*A mi bisabuela Patrocinia Díaz (Q.E.P.D) quien siempre tuvo fe en mí y que en estos momentos desde lo alto del cielo vela por mí y mi futuro.*

*A todos los profesores por ser parte fundamental en esta preparación.*

*A mis amigos que me brindaron su amistad transparente e incondicional a través de los años, por acompañarme en este arduo proceso y compartir conmigo tantas situaciones vividas.*

**CARLOS GÓMEZ**

*A Dios por no dejarme desfallecer en este largo camino y por iluminarme en cada  
paso que he dado.*

*A mis papás Nelly y Ramón, quienes me han dado todo su incondicional apoyo y  
han hecho de mi una persona íntegra.*

*A mi hermana Carolina, quien con sus grandes sacrificios me ha colaborado para  
poder terminar mi estudios.*

*A mi tío Oscar Hincapié, su esposa Ludy y mi primo Sebastián, quienes me  
brindaron todo el apoyo y me dieron un techo para poder estar hoy aquí ad portas  
de ser un profesional.*

*A todos mis tíos y tías quienes siempre me encomiendan en sus plegarias y  
oraciones.*

*A todos mis amigos y amigas de quienes he aprendido el valor de la amistad, el  
compañerismo y el valor de una compañía sincera.*

**ANDRÉS SANTOS**

## **AGRADECIMIENTOS**

*Es difícil encontrar palabras para expresar nuestro agradecimiento a las personas que aportaron de alguna manera en la realización de este proyecto.*

*A Dios por darnos la oportunidad de superar esta etapa de nuestras vidas.*

*A nuestras familias porque gracias a sus esfuerzos y dedicación hemos podido dar un gran pasó en nuestra vida profesional.*

*A la profesora Liliana Patricia Jaimes Rojas, directora del proyecto, por su orientación, colaboración, por todo el tiempo que nos ha dedicado y por sus valiosos aportes en la realización de este proyecto.*

## CONTENIDO

	pag.
INTRODUCCIÓN.....	19
1. ESTADO DEL ARTE .....	22
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	24
3. OBJETIVOS .....	25
3.1 OBJETIVO GENERAL.....	25
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	25
4. MODELO dq0 DE LA MÁQUINA SÍNCRONA.....	26
4.1 DESCRIPCION FISICA.....	26
4.2 MODELO DE FASES DE LA MÁQUINA SÍNCRONA .....	27
4.3 TRANSFORMACION DE VARIABLES DE PARK.....	30
4.4 MODELO dq0.....	32
4.5 INCLUSIÓN DE LA SATURACIÓN EN EL MODELO dq0.....	38
4.5.1 Características de la Saturación en las máquinas sincrónicas.....	38
4.5.2 Representación de la saturación de las máquinas sincrónicas .....	41
5. IMPLEMENTACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO.....	47
5.1 SUPOSICIONES PREVIAS .....	47
5.2 ENTRADA DE DATOS .....	47
5.2.1 Parámetros de la máquina .....	48

5.2.2	Datos de saturación.....	49
5.3	CÁLCULO DE CONDICIONES DE OPERACIÓN .....	50
5.4	CÁLCULO DE LAS MATRICES $[LT]$ , $[LE]$ y $[R]$ .....	51
5.5	CÁLCULO DEL ÁNGULO DE TORQUE $\delta$ .....	53
5.6	CÁLCULO DE LAS CORRIENTES DE ESTADO ESTABLE O PREFALLA.....	54
5.7	CÁLCULO DEL VALOR DE TENSIONES DE ESTADO ESTABLE O PREFALLA .....	54
5.8	CÁLCULO DE LA CORRIENTE DE CAMPO .....	55
5.9	CÁLCULO DE LAS CORRIENTES EN ESTADO TRANSITORIO.....	55
5.10	CÁLCULO DE LAS CORRIENTES DE FASE .....	55
5.11	RESUMEN .....	56
6.	SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	59
6.1	ESTUDIO A COMPARAR.....	60
6.2	DATOS DE ENTRADA .....	61
6.2.1	Parámetros y datos de saturación .....	61
6.2.2	Condiciones de operación de prefalla y valores de placa: .....	63
6.3	RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN .....	64
7.	CONCLUSIONES .....	80
8.	BIBLIOGRAFIA.....	82

## LISTA DE ANEXOS

	pag.
ANEXO A : DESCRIPCIÓN MATEMÁTICA DE LA MÁQUINA SÍNCRONA EN EL SISTEMA DE FASES.....	85
ANEXO B. TRANSFORMACIONES DE VARIABLES DE TENSIÓN Y CORRIENTE AL SISTEMA DQ0 .....	87
ANEXO C. SISTEMA POR UNIDAD .....	89
ANEXO D. REGLA TRAPEZOIDAL DE INTEGRACIÓN .....	91
ANEXO E. MANUAL DEL USUARIO.....	94
E.1    INSTALACIÓN.....	94
E.2    EJECUCIÓN .....	94
E.3    MENÚ PRINCIPAL .....	95
E.4    TIPO DE FALLA .....	97
E.5    PARÁMETROS.....	98
E.6    DATOS DE PLACA .....	99
E.7    SATURACIÓN .....	100
E.7.1    Zona A.....	100
E.7.2    Zona B.....	100
E.8    GRÁFICAS .....	101

## LISTA DE FIGURAS

	Pag
FIGURA 1. MODELO GENERAL DE LA MÁQUINA SÍNCRONA .....	26
FIGURA 2. UBICACIÓN DE LOS EJES D Y Q. ....	28
FIGURA 3. UBICACIÓN DE LOS DEVANADOS DEL MODELO DQ0.....	33
FIGURA 4. CURVA CARACTERÍSTICA DE VACÍO DE LA MÁQUINA SINCRÓNICA .....	39
FIGURA 5. CAÍDA DE TENSIÓN DEBIDO A LA SATURACIÓN DE LA MÁQUINA..	40
FIGURA 6. CURVAS DE SATURACIÓN A DIFERENTE VELOCIDAD, IGUAL CORRIENTE DE CAMPO .....	41
FIGURA 7. CURVA CARACTERÍSTICA DE SATURACIÓN.....	43
FIGURA 8. REGIONES DE LA CURVA DE SATURACIÓN.....	44
FIGURA 9. CIRCUITOS EQUIVALENTE NO LINEALES.....	46
FIGURA 10. OBTENCIÓN DE LOS DATOS DE SATURACIÓN DE LA MÁQUINA.....	50
FIGURA 11. CURVA DE SATURACIÓN PARA LA MÁQUINA.....	62
FIGURA 12. TENSIÓN DE LA FASE A.....	63
FIGURA 13. CORRIENTE DE CAMPO .....	65

<b>FIGURA 14. CORRIENTE DE CAMPO CON SATURACIÓN OBTENIDA CON LA HERRAMIENTA DQ0.....</b>	<b>65</b>
<b>FIGURA 15. COMPARATIVO FIGURAS 13 Y 14.....</b>	<b>66</b>
<b>FIGURA 16. CORRIENTE DE FASE A CON SATURACIÓN .....</b>	<b>67</b>
<b>FIGURA 17. CORRIENTE DE FASE A CON SATURACIÓN OBTENIDA CON LA HERRAMIENTA DQ0.....</b>	<b>68</b>
<b>FIGURA 18. COMPARATIVO ENTRE FIGURAS 16 Y 17.....</b>	<b>68</b>
<b>FIGURA 19. CORRIENTE DE FASE SIN SATURACIÓN.....</b>	<b>70</b>
<b>FIGURA 20. CORRIENTE DE FASE SIN SATURACIÓN.....</b>	<b>71</b>
<b>FIGURA 21. COMPARATIVO FIGURAS 19 Y 20.....</b>	<b>71</b>
<b>FIGURA 22. CORRIENTE DE CAMPO SIN SATURACIÓN .....</b>	<b>73</b>
<b>FIGURA 23. CORRIENTE EN EL EJE DIRECTO CON SATURACIÓN .....</b>	<b>74</b>
<b>FIGURA 24. TENSIÓN EN EL EJE DIRECTO.....</b>	<b>75</b>
<b>FIGURA 25. CORRIENTE EJE DE CUADRATURA CON SATURACIÓN. ....</b>	<b>76</b>
<b>FIGURA 26. TENSIÓN EJE DE CUADRATURA CON SATURACIÓN.....</b>	<b>77</b>
<b>FIGURA 27. CORRIENTE EN EL EJE 0. ....</b>	<b>78</b>
<b>FIGURA 28. TENSIÓN EN EL EJE 0. ....</b>	<b>78</b>
<b>FIGURA 29. TENSIÓN EJE 0 FALLA ASIMÉTRICA. ....</b>	<b>79</b>

<b>FIGURA E.1</b>	<b>VENTANA DE INICIO.....</b>	<b>95</b>
<b>FIGURA E.2</b>	<b>MENÚ PRINCIPAL.....</b>	<b>96</b>
<b>FIGURA E.3</b>	<b>VENTANA TIPO DE FALLA.....</b>	<b>98</b>
<b>FIGURA E.4</b>	<b>VENTANA DE PARÁMETROS .....</b>	<b>99</b>
<b>FIGURA E.5</b>	<b>VENTANA DATOS DE PLACA.....</b>	<b>100</b>
<b>FIGURA E.6</b>	<b>VENTANA SATURACIÓN.....</b>	<b>101</b>
<b>FIGURA E.7</b>	<b>VENTANA GRAFICAS.....</b>	<b>102</b>

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pag.</b>
TABLA 1. DESCRIPCIÓN DATOS DE PLACA Y OPERACIÓN .....	48
TABLA 2. DESCRIPCIÓN DE PARÁMETROS DE LA MÁQUINA .....	48
TABLA 3. PARÁMETROS DE LA MÁQUINA A SIMULAR.....	61
TABLA 4. DATOS DE SATURACIÓN.....	63
TABLA 5. DATOS A INGRESAR EN TIPO DE FALLA.....	64
TABLA 6. DATOS DE PLACA Y OPERACIÓN.....	64

## RESUMEN

**TITULO:** VALIDACIÓN DEL MODELO DQ0 DE LA MÁQUINA SÍNCRONA PARA ESTUDIOS DE TRANSITORIOS ELECTROMÁGNÉTICOS\*

**AUTORES:** ANDRÉS MAURICIO SANTOS HINCAPIÉ

CARLOS ALBERTO GÓMEZ RODRÍGUEZ\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Máquina sincrónica, modelo dq0, saturación, MATLAB®.

### CONTENIDO:

El presente documento tiene como objetivo realizar un estudio de la máquina sincrónica en el modelo dq0 incluyendo los efectos de la saturación, para ello se ha implementado una herramienta software en MATLAB®, siendo un programa de gran versatilidad y fácil acceso gracias a los derechos adquiridos por la Universidad Industrial de Santander. Dentro del trabajo se muestra una descripción matemática del funcionamiento de la máquina bajo el sistema de referencia de los ejes dq0 incluyendo el efecto de la saturación, siendo esta de gran ayuda para guiar al lector dentro del contexto del libro, y le brinde un entendimiento sobre la máquina sincrónica y su funcionamiento.

En el documento se presenta un manual dirigido al usuario para guiarlo paso a paso dentro de la aplicación del programa y se tenga un fácil manejo del mismo. Se presentan los estudios realizados para validar el modelo implementado mediante la herramienta software, esta validación se llevo a cabo mediante la comparación con estudios previamente realizados por diversos autores sobre este tema.

Finalmente dentro de los apéndices se presenta una descripción básica de la máquina sincrónica en el dominio de fases, así como también es mencionada la representación teórica del sistema por unidad y el método de extrapolación lineal utilizado para el estudio del modelo de la máquina.

---

\* Proyecto de Grado: Trabajo de Investigación.

\*\* Facultad de Ingenierías Físico - Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: Lilibiana Patricia Jaimes Rojas.

## ABSTRACT

**TITLE:** DQ0 MODEL VALIDATION OF THE SYNCHRONOUS MACHINE FOR ELECTROMAGNETIC TRANSIENT STUDIES\*

**AUTHORS:** ANDRÉS MAURICIO SANTOS HINCAPIÉ  
CARLOS ALBERTO GÓMEZ RODRÍGUEZ\*\*

**KEYWORDS:** Synchronous machine, dq0 model, saturation, MATLAB™

### CONTENT:

This paper aims to conduct a study of the synchronous machine on the dq0 model including the saturation effects. For this, an algorithm has been implemented using the software MATLAB, taking into account the great versatility and easy access thanks to the rights acquired by the Industrial University of Santander.

This document shows a mathematical description of the machine operation under the reference system of the dq0 axes including the saturation effect, being this one a great help to guide the reader through the book context, and at the same time it gives him an understanding about the synchronous machine and its operation.

In the paper the authors present a manual to guide the user step by step within the program implementation and he can handle it easily. The studies are presented to validate the implemented model by the software tool; this validation was carried out by comparing it against previous studies by different authors in this subject.

Finally, in the appendix is provided a basic description of the synchronous machine in the phase's domain and is also referred to the theoretical representation of the system per unit and the linear extrapolation method used to study the model of the machine.

---

\* Degree Project

\*\* Physics and Mechanical Engineering's Faculty. Electrical, Electronic and Telecommunications Department Director: Liliána Patricia Jaimes Rojas.

## INTRODUCCIÓN

Las máquinas sincrónicas son uno de los elementos más importantes dentro de un sistema de potencia. Adquieren esta importancia en la generación, gracias a que son las encargadas de convertir en energía eléctrica las diversas fuentes energéticas tales como la energía potencial del agua en una represa, la energía térmica del vapor, gas en una caldera, la energía cinética del viento, etc. Debido a su gran influencia en un sistema de potencia, merecen especial atención, y por lo tanto se debe prevenir la ocurrencia de algunos eventos que hagan que funcionen por fuera de su zona de trabajo.

El modelar este tipo de máquinas de una manera óptima, permite conocer la respuesta que presentará la máquina al someterla a diferentes tipos de fallas, a diferentes cambios de operación, o simplemente nos daría las condiciones de funcionamiento en su estado estable. El conocimiento de tales respuestas, permitiría la adopción temprana de medidas correctivas, así como determinaría los parámetros de diseño a ser considerados para la protección del equipo, de las personas, se mantendría la vida útil de la máquina, apuntando finalmente a garantizar la confiabilidad del servicio.

En la realización de este trabajo, se tuvo en cuenta la importancia del modelado de la máquina síncrona, por lo que los estudios fueron centrados en el modelo de la máquina bajo el sistema de referencia  $dq0$ . La adopción de este tipo de representación se realizó con base en la disponibilidad de datos bajo el mismo sistema de referencia, la facilidad en la obtención de algunos parámetros, y a la inclusión del efecto de la saturación bajo el modelo de las bobinas pseudo-estacionarias  $d$  y  $q$ .

El proceso de implementación del modelo es realizado en la herramienta software MATLAB, que al incluir modelo discretizado de la máquina, junto con los efectos de saturación presenta resultados confiables sobre el comportamiento real de la

máquina. La validación es realizada tomando como base estudios previos de algunos investigadores reconocidos en el tema de modelado de la máquina.

A continuación se muestra una presentación de los capítulos del libro.

### **Capítulo 1: Estado del arte**

Se presenta el estado del arte.

### **Capítulo 2: Planteamiento del problema**

Se presenta el planteamiento del problema.

### **Capítulo 3: Objetivos**

En este capítulo se muestran los objetivos planteados para el proyecto.

### **Capítulo 4: Modelo dq0 de la máquina síncrona**

Este capítulo está dedicado a la descripción matemática del modelo de la máquina síncrona en las componentes dq0, presentando las ecuaciones eléctricas que describen el funcionamiento de la máquina.

También, se presenta el estado saturado de la máquina síncrona, describiendo las características fundamentales de este estado y exponiendo las ecuaciones que representan el comportamiento de la máquina en estado saturado

### **Capítulo 5: Implementación y Validación del modelo.**

En este capítulo se presenta el modelo a implementar para el análisis de transitorios electromagnéticos de la máquina síncrona.

## **Capítulo 6: Simulación y análisis de resultados**

Se exponen los resultados de la máquina sincrónica incluyendo los efectos de saturación, comparándolos con resultados obtenidos en investigaciones previas y el algoritmo implementado para tal fin, presentando graficas correspondientes al estudio mencionado.

## **Capítulo 7: Conclusiones**

Se presentan las conclusiones del proyecto.

## 1. ESTADO DEL ARTE

Históricamente el funcionamiento, diseño y mejoras de la máquina síncrona siempre han sido tema de estudio. En el siglo XIX se gestaron los primeros pasos, las primeras ideas que conducen a tratar de explicar el funcionamiento y también el diseño y construcción de máquinas de corriente alterna. Desde el año 1821, cuando Faraday presentó su máquina de colector, seguido una década más tarde por J. Henry quien desarrolló un motor eléctrico de electro-imán horizontal, se dio inicio al desarrollo de lo que se llamaron las máquinas eléctricas primitivas. En la década de los 40's, se mejoraron considerablemente los conceptos que se venían trabajando, Wheatstone propuso el agrupar una serie de bobinas en el inducido de la máquina así como también el uso de electroimanes en lugar de imanes permanentes para la excitatriz.

Después de 1850, investigadores como Neuman, Hopkinson y Weber llegaron a representar gráficamente la relación existente entre la fuerza electromotriz, la corriente eléctrica y el magnetismo (que hasta ese momento era conocida como la variable  $M$ , pero años más tarde  $M$ . Deprez le daría el nombre de magnetismo). Paralelo a esto se venían realizando estudios acerca de las pérdidas de energía y rendimiento.

Finalizando el siglo XIX Maxwell publicó su Tratado de Electricidad y Magnetismo el cual contenía toda la fundamentación matemática del electromagnetismo, y con esto el análisis del comportamiento de la máquina síncrona se realizaba aproximándola y resolviéndola como un circuito magnético. En este punto se comenzó a hablar del concepto de saturación de la máquina, de la reacción del inducido, pero los métodos propuestos no ofrecían resultados confiables cuando cambiaba el punto de operación de la máquina. Blondel, en 1899 propuso tratar éste problema dividiendo a la máquina en dos circuitos, o en dos ejes de simetría magnética, que son conocidos actualmente como los ejes directo y de cuadratura.

En la segunda década del siglo XX, R.E Doherty y C.A Nickle profundizaron y extendieron la teoría de Blondel, tomando en cuenta el efecto de los armónicos en los dos ejes [9].

Hasta el año 1929 el análisis de estado transitorio se realizaba mediante técnicas analíticas con las cuales se buscaba hacer hipótesis que simplificaran los cálculos y los procedimientos, y eran validados con los resultados obtenidos de los ensayos realizados con las máquinas en laboratorios. En éste año R.H Park propuso un método válido para cualquier modo de operación de la máquina: estable o transitorio. Con éste método se elimina la dependencia de la posición del rotor que tenían ciertas variables del estator, pero no tenía en cuenta la saturación, el ciclo de histéresis y las corrientes de Foucault [21].

Con los resultados y la propuesta de Park, se da paso a una nueva forma concreta de modelar el funcionamiento de la máquina, un modelo en el cual la dependencia de la posición del rotor es “eliminada”. Se definieron y se cuantificaron sus variables. A partir de ahí, innumerables estudios e investigaciones se han realizado para analizar diferentes situaciones e hipótesis.

En la escuela de ingeniería Eléctrica de la Universidad Industrial de Santander se han realizado estudios sobre el modelado y análisis de la máquina sincrónica, iniciando en el año 1974 donde se realizó un estudio del estado transitorio de la máquina representándola por el modelo Alfa-Beta.

En los años 2007 y 2008, gracias a las investigaciones realizadas por el grupo de investigación de sistemas de energía eléctrica (GISEL) se crea una herramienta de software para la estimación de parámetros de la máquina sincrónica antes y durante la operación de la misma. La reseña más reciente de este tipo de estudio se lleva a cabo en el 2009 mediante un estudio teórico de las fallas de cortocircuito en un generador síncrono [18] [19] [23].

## 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El correcto modelado de la máquina síncrona es de vital importancia a la hora de analizar su funcionamiento. Una simulación confiable permitiría por ejemplo, la optimización del tiempo de pruebas de la máquina, la obtención de soluciones económicas y la toma de medidas preventivas ante la simulación de posibles situaciones de falla.

Trabajos de investigación previamente relacionados con la máquina sincrónica, realizados en la Universidad Industrial de Santander, han dejado como resultados software y hardware diseñados para la adquisición de parámetros y análisis de fallas internas en la máquina. Cada uno de éstos trabajos, había modelado la máquina síncrona bajo el modelo de referencia que más se ajustaba a su objeto de estudio; pero hasta el momento ninguno había ofrecido la opción de analizar el funcionamiento de la máquina en estado estable o transitorio y tampoco la opción de incluir el efecto de la saturación magnética.

De esta forma surgió la iniciativa de estudiar e implementar un algoritmo con el cual se pudiera analizar el estado transitorio de la máquina y que además brindara la opción de tener en cuenta el estado de saturación de la misma.

Debido a la cantidad de ecuaciones, y a la complejidad del modelo, la implementación del algoritmo requería la utilización de alguna herramienta computacional de fácil manipulación y fácil acceso. Es así como el aplicativo seleccionado permite el manejo versátil de los datos, una amplia confiabilidad en los resultados, y hace posible el futuro acople del programa con las investigaciones previas o futuras sobre el mismo tema.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1 OBJETIVO GENERAL**

Realizar un estudio del modelo dq0 de la máquina síncrona que incluya los efectos de la saturación.

#### **3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

El objetivo general implica el cumplimiento de los siguientes objetivos específicos:

- Modelar la máquina síncrona para estudios de los transitorios electromagnéticos.
- Implementar un algoritmo en MATLAB del modelo de la máquina síncrona en las variables dq0.
- Comparar los resultados obtenidos de la implementación de los modelos en MATLAB con estudios realizados en investigaciones previas.

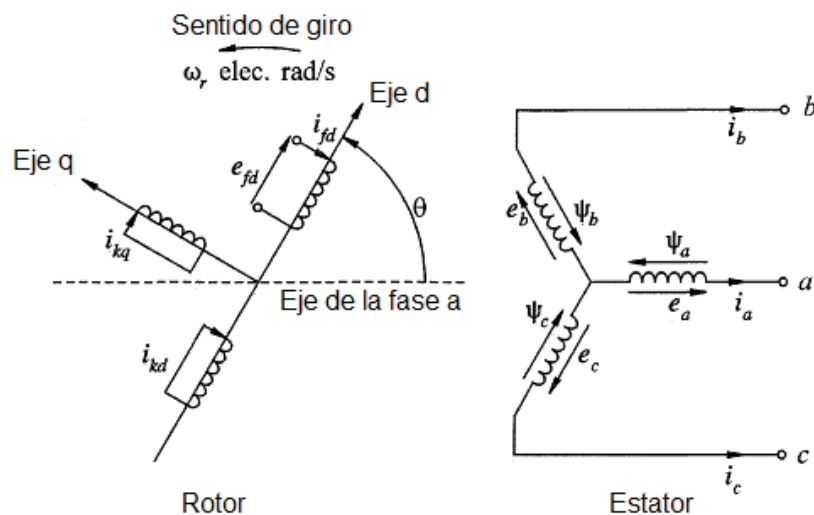
## 4. MODELO dq0 DE LA MÁQUINA SÍNCRONA

### 4.1 DESCRIPCION FISICA

La máquina síncrona se puede considerar compuesta por dos elementos: el campo o rotor y la armadura o estator [15]. Esto se aprecia en la figura 1.

El campo se ubica en la parte motriz de la máquina y está compuesta por los devanados de campo y un número par de devanados amortiguadores. Además, sobre el rotor también se encuentra ubicado el devanado de campo que es alimentado con corriente continua y que forma una cantidad polos electromagnéticos establecidos en su diseño o que depende de su impulsor motriz, por ejemplo los rotores de los turbogeneradores por lo general son de 2 o máximo 4 polos mientras que los hidrogeneradores suelen ser de 4, 8 y hasta 16 polos [5] [15].

figura 1. Modelo general de la máquina síncrona



Fuente : KUNDUR, Prabha. Power system stability and control, traducido por Andrés Santos y Carlos Gómez.

El rotor, el cual tiene un número de pares de polos, debe girar a la velocidad llamada de sincronismo para que en los devanados del estator se induzca una tensión que posea la frecuencia del sistema de potencia al cual se va a conectar la máquina.

En la figura 1 también se puede ver que en el estator se encuentran las bobinas de las fases por las cuales circula la corriente alterna inducida por el movimiento de los polos en el rotor [2].

Analizando circuitalmente la figura 1, se pueden plantear las ecuaciones eléctricas que describen el funcionamiento del alternador sincrónico. Este modelo es conocido como el modelo primitivo o de fases que se describe muy brevemente a continuación.

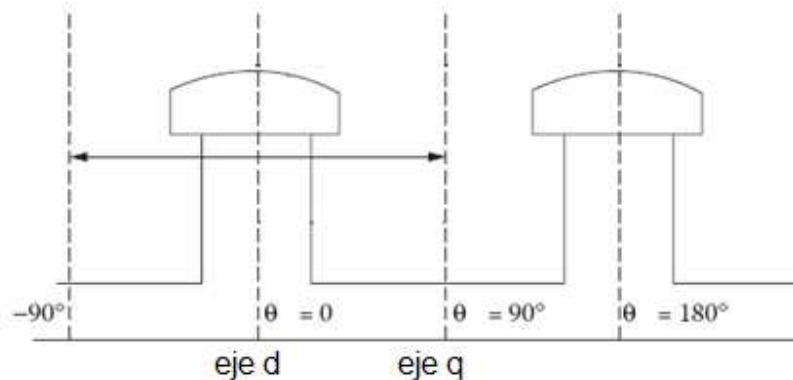
#### **4.2 MODELO DE FASES DE LA MÁQUINA SÍNCRONA**

Entre los modelos más avanzados para el análisis de transitorios electromagnéticos se encuentran el modelo de fases y el modelo de ejes ortogonales, más conocido como modelo dq0. Son modelos analíticos y básicamente representan el funcionamiento de la máquina por circuitos.

El modelo de fases describe a la máquina sincrónica por medio de 3 circuitos (1 por cada fase) magnéticamente acoplados a través del movimiento, los cuales constan de las bobinas de fase [5].

Para representar el funcionamiento del rotor, se definen dos ejes que se ubican sobre él mismo y que giran a la misma velocidad, los ejes d y q, también llamados ejes directo y de cuadratura, como se puede observar en la figura 1. El eje d se encuentra ubicado en el centro del polo norte magnético y el eje q en cualquier instante de tiempo se encuentra adelantado  $90^\circ$  eléctricos con respecto al eje directo o en la mitad del par de polos. Esto se puede observar en la figura 2 [15].

figura 2. Ubicación de los ejes d y q.



Fuente: KUNDUR, Prabha. Power system stability and control, traducido por Andrés Santos y Carlos Gómez.

Colinealmente al eje directo, se encuentra ubicado el devanado de campo (fd), que es alimentado con corriente continua. Además sobre el rotor también se encuentra un número par de devanados amortiguadores, de los cuales uno de cada par se ubica sobre el eje directo (al cual se identificará con el subíndice kd) y el otro sobre el eje de cuadratura (kq). Ésta descripción se puede observar en la figura 1.

La función de éstos devanados amortiguadores principalmente es estabilizar el punto de operación de la máquina, evitando que se aumenten las pérdidas mecánicas en el punto de operación, además de proteger la integridad física del aislamiento de la bobina de excitación del campo. Físicamente son similares al devanado del rotor de jaula de ardilla de los motores de inducción, pues son barras de cobre cortocircuitadas a lo largo del rotor [2] [23].

Los devanados amortiguadores aumentan la reluctancia de la trayectoria del flujo principal y disminuyen la reactancia del eje directo, reduciendo la f.m.m del devanado de campo.

Cuando el rotor gira a una velocidad de sincronismo no circula corriente alguna por los devanados amortiguadores, por lo tanto su tensión es 0. Sí la velocidad del

rotor varía, el deslizamiento entre el campo y el rotor obliga a circular corrientes en los devanados amortiguadores produciendo un torque que tiene dirección opuesta a la dirección de la diferencia de velocidades [2].

De la figura 1 también se define el ángulo  $\theta$  que es el existente entre el eje d y el eje del devanado de la fase A ubicado en el estator.

El funcionamiento de la máquina esta descrito por el siguiente sistema de 6 ecuaciones. Para más detalles ver Anexo A:

$$[e_{abcdefDQ}] = -[I_{abcdefDQ}] * [R_{abcdefDQ}] - \frac{d[\varphi_{abcdefDQ}]}{dt} \quad (4.1)$$

De donde

$$e_{abcdefDQ} = [e_a \ e_b \ e_c \ e_f \ 0 \ 0] \quad (4.2)$$

$$I_{abcdefDQ} = [I_a \ I_b \ I_c \ I_f \ I_D \ I_Q] \quad (4.3)$$

$$[\varphi_{abcdefDQ}] = [L_{abcdefDQ}] * [I_{abcdefDQ}] \quad (4.4)$$

Los elementos de la matriz  $L_{abcdefDQ}$  contienen la información de las inductancias propias y mutuas en el estator, rotor y el acoplamiento entre los devanados del estator y rotor. Estos valores varían de acuerdo con la posición del rotor, debido a la variación de la permeancia magnética ocasionada por la forma del rotor y también por el movimiento relativo existente entre la parte móvil y la parte en movimiento de la máquina. Por este motivo, esta matriz debe ser calculada cada vez que el rotor cambia su posición, aumentando la complejidad al resolver o simular el comportamiento de la máquina y el sistema de potencia al cual se encuentra conectado [15].

La variabilidad de la permeancia magnética es mucho más notoria en los rotores de polos salientes, ya que la distancia del entrehierro no es constante: es mínima en la cabeza del polo y máxima en la mitad del par de polos.

### 4.3 TRANSFORMACION DE VARIABLES DE PARK

Esta transformada desarrollada por R.H PARK, obtiene la proyección de las variables del estator, tales como flujos, tensiones y corrientes, sobre 2 ejes ubicados en el rotor y que se mueven con él: los ejes directo y de cuadratura y un nuevo eje estacionario, llamado eje 0, el cual se asocia con las componentes simétricas de secuencia cero. Este último se encuentra desacoplado magnéticamente de los otros dos ejes y su existencia permite que la transformación sea bidireccional; o sea, que se pueda aplicar la transformada inversa para llegar a los datos primitivos [2] [4] .

Esta transformada es similar a la que se hace en los transformadores, al referir valores o variables que se encuentran en el secundario al primario o viceversa. La transformada representada en la ecuación (4.5) tiene las propiedades de ortogonalidad e invarianza en potencia [15].

$$[F_{dq0}] = \sqrt{\frac{2}{3}} * \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \text{Sen}(\theta) & \text{Sen}(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \text{Sen}(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} * [F_{abc}] \quad (4.5)$$

Suponiendo que se tenga un sistema de tensiones balanceado de amplitud  $V_m$  y de forma sinusoidal, aplicando la transformada de Park para hallar los valores de las tensiones en los ejes d,q y 0 se tiene que:

$$\begin{bmatrix} e_d \\ e_q \\ e_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} * \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \text{Sen}(\theta) & \text{Sen}(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \text{Sen}(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_m * \text{sen}(w_s * t) \\ V_m * \text{sen}(w_s * t - \frac{2\pi}{3}) \\ V_m * \text{sen}(w_s * t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Resolviendo esta multiplicación de matrices se llega a las siguiente ecuación:

$$e_d = V_m * \text{sen}(w_s * t - \theta) \quad (4.7)$$

Por lo general, el rotor gira a la velocidad de sincronismo, esto implica que  $w_r = w_s$ . Por lo tanto,  $\theta = w_s * t + \delta$ , en donde  $\delta$  es el ángulo de carga; parámetro que depende de las condiciones de operación de la máquina.

Esto nos lleva a encontrar que las tensiones en el sistema de referencia dq0 son constantes: [5] [15]

$$e_d = V_m * \text{sen}(\delta) \quad (4.8)$$

$$e_q = -V_m * \text{cos}(\delta) \quad (4.9)$$

Como se había mencionado anteriormente, el eje 0 tiene una estrecha relación con las componentes simétricas. Por lo tanto, en este devanado la tensión y la corriente ( $e_0, I_0$  respectivamente) serán diferentes de cero cuando se presente una falla asimétrica (monofásica, bifásica). Al realizar ésta transformada y recordando que se supone un sistema balanceado, las componentes de secuencia 0 de tensión y de corriente, serán las sumas de las tensiones de las fases y las corrientes a,b,c respectivamente, que por lo tanto son 0.

En el Anexo B Se puede ver el desarrollo matemático que lleva a obtener estos resultados. Para las corrientes del eje directo y cuadratura se obtienen las siguientes expresiones:

$$I_d = I_m * \text{sen}(\delta + \phi) \quad (4.10)$$

$$I_q = I_m * \text{cos}(\delta + \phi) \quad (4.11)$$

En donde  $\phi$  es el ángulo del factor de potencia y cuya forma de calcularlo se muestra en el capítulo 5.

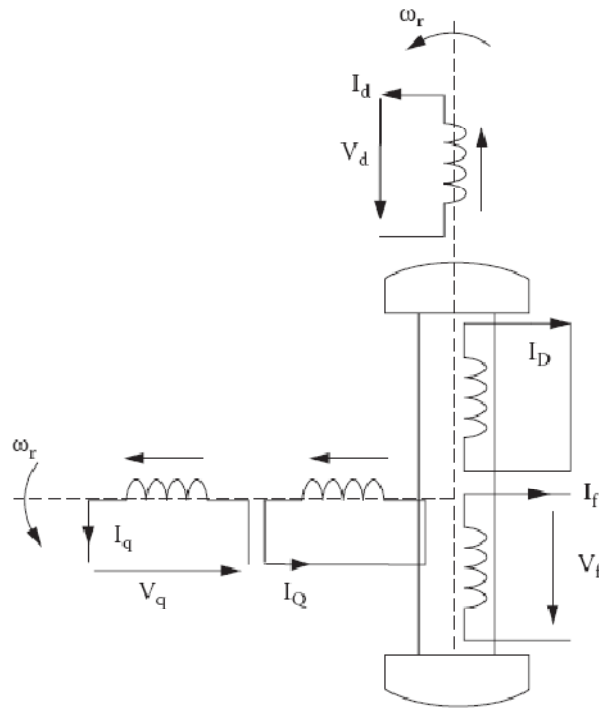
#### 4.4 MODELO dq0

Partiendo de la transformación de coordenadas de Park, con la cual se expresan o reflejan las variables del estator de la máquina sobre los ejes d y q, se logra eliminar la dependencia de la posición del rotor que tenían las inductancias de la matriz  $L_{abcfdQ}$ , ya que el rotor, o mejor dicho, los ejes d y q ven que el entrehierro existente con el estator es constante, salvo que el estator no tenga una forma cilíndrica.

Al transformar las variables se obtienen 6 devanados ficticios que se pueden observar en la figura 3, que se encuentran distribuidos de la siguiente manera:

- sobre el eje directo se tienen en total 3 devanados: 1 devanado “nuevo” que para fácil recordación se hará notación con la letra d como subíndice. Este devanado es el resultado de la transformación de coordenadas. En otras palabras, es el devanado sobre el eje directo que contiene la información de las variables del estator. Sobre este eje se conservan los devanados que definía el modelo de fases: el devanado de campo (fd) y un devanado amortiguador (kd).
- Sobre el eje de cuadratura se tienen 2 devanados. Se conserva el devanado amortiguador y ahora se tiene un devanado que resulta de aplicar la transformación de Park y que se notará con la letra q como subíndice.
- Sobre el eje 0 solo se tiene un devanado.

figura 3. Ubicación de los devanados del modelo dq0.



Fuente: BOLDEA, Ion. The electric generator handbook 1 ed.: 2006.

Para comenzar a describir matemáticamente el modelo dq0, se deben definir los flujos que atraviesan los 6 devanados descritos anteriormente, esto se hace por medio de las siguientes 6 ecuaciones:

$$\varphi_d = -L_d * I_d + L_{afd} * I_f + L_{akd} * I_{kd} \quad (4.12)$$

$$\varphi_q = -L_q * I_q + L_{akq} * I_{kq} \quad (4.13)$$

$$\varphi_0 = -L_0 * I_0 \quad (4.14)$$

$$\varphi_{fd} = L_{fd} * I_{fd} + L_{fkd} * I_{kd} - L_{afd} * I_d \quad (4.15)$$

$$\varphi_{kd} = L_{fkd} * I_{fd} + L_{kd} * I_{kd} - L_{akd} * I_d \quad (4.16)$$

$$\varphi_{fq} = L_{kq} * I_{kq} - L_{akq} * I_q \quad (4.17)$$

Las inductancias  $L_d$ ,  $L_q$  son las resultantes de la transformación de variables del sistema estático al sistema rotórico, y están asociadas al flujo total ligado ocasionado por las corrientes  $I_d$  e  $I_q$  respectivamente.  $L_d$  y  $L_q$  contienen dos tipos de información: La inductancia de dispersión debida al flujo que no enlaza ningún circuito del rotor (flujo de dispersión) y la inducción mutua debida al flujo que se enlaza con los circuitos del rotor. Matemáticamente esto puede escribirse de la siguiente manera [2] [15]:

$$L_d = L_{ad} + L_l \quad (4.18)$$

$$L_q = L_{aq} + L_l \quad (4.19)$$

Siendo  $L_l$  la inductancia de dispersión y  $L_{ad}$ ,  $L_{aq}$  las inductancias mutuas con el eje d y q respectivamente [15].

En las ecuaciones 4.12 a 4.19 todos los valores de las inductancias, corrientes y flujos se encuentran en el sistema por unidad. La elección de las cantidades base se puede ver en el Anexo C.

Haciendo una buena elección de las cantidades base del sistema p.u, se pueden hacer las siguientes simplificaciones: [15]

$$L_{akd} = L_{afd} = L_{ad} \quad (4.20)$$

$$L_{akq} = L_{aq} \quad (4.21)$$

Conociendo las ecuaciones que relacionan el flujo y las corrientes, se procede a definir la relación entre las tensiones y las corrientes en el sistema de referencia dq0, que se describen por las ecuaciones mostradas a continuación:

$$e_d = \frac{\partial \varphi_d}{\partial t} - \varphi_q * w_r - R_a * I_d \quad (4.22)$$

$$e_q = \frac{\partial \varphi_q}{\partial t} + \varphi_d * w_r - R_a * I_q \quad (4.23)$$

$$e_0 = \frac{\partial \varphi_0}{\partial t} - R_a * I_0 \quad (4.24)$$

$$e_{fd} = \frac{\partial \varphi_{fd}}{\partial t} - R_{fd} * I_{fd} \quad (4.25)$$

$$e_{kd} = \frac{\partial \varphi_{kd}}{\partial t} - R_{kd} * I_{kd} \quad (4.26)$$

$$e_{kq} = \frac{\partial \varphi_{kq}}{\partial t} - R_{kq} * I_{kq} \quad (4.27)$$

Las anteriores ecuaciones relacionan las tensiones y las corrientes en los 6 devanados que se describieron con anterioridad. Asimismo, estas ecuaciones describen el funcionamiento del alternador tanto en estado estable como transitorio.

Como se presentó anteriormente, los valores de las inductancias en éste modelo son constantes. Por lo tanto, al aplicar la diferencial que proponen las ecuaciones (4.22) a (4.27) los únicos términos que puede cambiar son las corrientes.

Para simplificar la escritura, se va a resumir la descripción matemática de la máquina sincrónica planteando el siguiente sistema de 6 ecuaciones diferenciales escritas en forma matricial:

$$[e] = [L_T] * \frac{\partial [I]}{\partial t} + [L_E] * \omega_r * [I] + [R] * [I] \quad (4.28)$$

De donde:  $[e] = [e_d \ e_q \ e_0 \ e_{fd} \ e_{kd} \ e_{kq}]$

$$[I] = [I_d \ I_q \ I_0 \ I_{fd} \ I_{kd} \ I_{kq}]$$

$$[L_T] = \begin{bmatrix} -L_d & 0 & 0 & L_{afd} & L_{akd} & 0 \\ 0 & -L_q & 0 & 0 & 0 & L_{akq} \\ 0 & 0 & -L_0 & 0 & 0 & 0 \\ -L_{afd} & 0 & 0 & L_{ffd} & L_{fkd} & 0 \\ -L_{akd} & 0 & 0 & L_{fkd} & L_{kkd} & 0 \\ 0 & -L_{akq} & 0 & 0 & 0 & L_{kkq} \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

$$[L_E] = \begin{bmatrix} 0 & L_q & 0 & 0 & 0 & -L_{akq} \\ -L_d & 0 & 0 & L_{afd} & L_{akd} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.30)$$

$$[R] = \begin{bmatrix} -R_a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -R_a & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -R_a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{fd} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_{kd} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_{kq} \end{bmatrix} \quad (4.31)$$

En el sistema de ecuaciones (4.28), los términos  $[L_E] * w_r * [I]$  son llamados voltajes de velocidad y representa la tensión inducida en la armadura debido al flujo que rota a la velocidad de sincronismo. Por su parte, el término que contiene la diferencial es llamado tensión de transformación y representa las tensiones que se inducen cuando el flujo cambia de magnitud en el tiempo [15].

### Análisis en estado estable

Como se vio en la sección de la transformada de Park, las corrientes en el sistema de referencia dq0 son constantes en operación estable. Por lo tanto, del sistema de ecuaciones, el término referente a la tensión de transformación es cero debido a que la corriente tiene un valor constante y por lo tanto la derivada o diferencial es cero. Esto lleva a que el estado estable de la máquina sincrónica pueda ser descrito por el siguiente sistema de ecuaciones:

$$[e] = [L_E] * w_r * [I] + [R] * [I] \quad (4.32)$$

## **Análisis en estado transitorio**

De la ecuación (4.28) se puede obtener el funcionamiento de la máquina sincrónica en estado transitorio, ya que en estado transitorio las corrientes cambian de valor y las tensiones de transformación serán diferentes de 0.

Este sistema de ecuaciones diferenciales (4.28) debe ser resuelto por medio de un método de integración numérica. El método de integración además de ofrecer estabilidad numérica, también debe ser de gran aproximación y eficiencia. Métodos de integración explícitos como el Runge-Kutta, son dependientes de los valores de las constantes de la máquina. Más específicamente, de las constantes de tiempo; ya que su paso de integración se define proporcionalmente al valor más pequeño de dichas constantes [6].

Los métodos de integración implícitos, como por ejemplo la regla trapezoidal, definen su paso de tiempo independientemente de los valores de las constantes de tiempo y sólo es restringido por el grado de exactitud que se requiera. [6]

Además de esto, la regla trapezoidal ofrece una clara reducción de la cantidad de cálculos a realizar, ya que al tener un paso de tiempo constante crea matrices de transición constantes. En consecuencia, no requiere acumular demasiada información, pues sólo necesita los valores del instante de tiempo precedente a la iteración que se está realizando [6].

El desarrollo matemático que resulta de la implementación de la regla trapezoidal para discretizar el sistema de ecuaciones (4.28) se puede observar en el Anexo D, y su resultado para calcular el vector de corrientes se muestra en la ecuación (4.33):

$$[I(t)] = [A]^{-1} * [ [e(t)] + [e(t - \Delta t)] - [B] * [I(t - \Delta t)] ] \quad (4.33)$$

La anterior ecuación ha discretizado el sistema de ecuaciones (4.28) y plantea la forma de calcular la corriente en el caso que la falla presentada sea de tensión

osea fallas en las cuales la tensión aumenta o disminuye súbitamente. Generalmente son cortocircuitos monofásicos o trifásicos, en los cuales el valor de la tensión en la o las líneas cae a 0.

También se puede presentar el caso en el cual la falla no sea de tensión sino de corriente. Por ejemplo, una pérdida de generación o la apertura instantánea y equivocada de un interruptor; en las cuales las corrientes llegan a un valor de cero. Para este caso, se conoce la corriente y se deseará hallar la forma de variación de tensión de la máquina. Para ello la ecuación (4.33) se convierte en:

$$[e(t)] = [A] * [I(t)] + [B] * [I(t - \Delta t)] - [e(t - \Delta t)] \quad (4.34)$$

#### **4.5 INCLUSIÓN DE LA SATURACIÓN EN EL MODELO dq0**

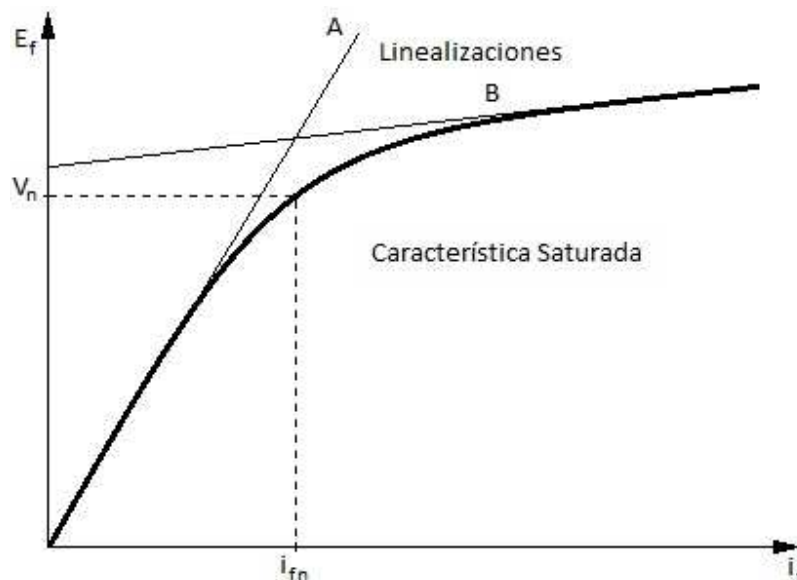
En el modelado de la máquina sincrónica es muy común adoptar la hipótesis de un comportamiento magnético lineal. Esto proporciona resultados satisfactorios para un buen número de aplicaciones. Sin embargo, cuando se requiere que la simulación del funcionamiento del generador sincrónico sea lo más cercano a la realidad, no se puede despreciar el efecto de la saturación. Para ello se necesita definir e implementar un modelo matemático que incluya o represente el impacto que tiene el efecto de la saturación sobre los parámetros propios de la máquina. En esta sección se estudia el fenómeno de la saturación en las máquinas sincrónicas, con el objetivo de analizar la inclusión de dicho efecto en el modelo dq0.

##### **4.5.1 Características de la Saturación en las máquinas sincrónicas**

Las características de la saturación se observan al realizar la prueba de circuito abierto en la máquina sincrónica, ya que al graficar los datos de la tensión como función de la corriente de campo se obtiene la curva de saturación de la máquina o también conocida como curva característica de saturación a circuito abierto. Esta

curva puede tener dos formas, dependiendo del estado del circuito magnético de la máquina síncrona. Si dicho circuito se encuentra en estado no saturado, la curva de circuito abierto será una línea recta, recibiendo el nombre de línea del entrehierro. Esto debido a que la región lineal del entrehierro consume la mayor parte de la f.m.m. Si por el contrario el circuito magnético de la máquina se encuentra en saturación, la característica comienza a desviarse tomando la forma de un codo [2] [15].

figura 4. Curva característica de vacío de la máquina síncrona

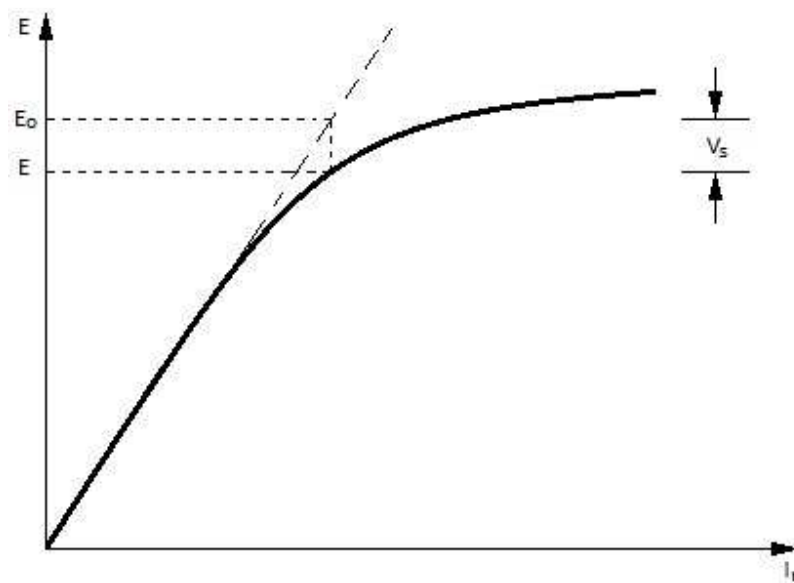


Fuente : ALLER, José Manuel. Máquinas eléctricas rotativas

En la figura 4 se observan tres características de la curva de saturación. La primera, el estado lineal inicial, corresponde a la línea del entrehierro (línea A); la segunda es la forma de codo que toma la curva, ocasionando la desviación de la línea del entrehierro, esto debido a la saturación que presenta la máquina, y la tercera es la linealización que se presenta en la curva de saturación representada por la línea B.

La saturación de la máquina síncrona suele manifestarse como una desmagnetización, en la cual se ve afectada la tensión de la máquina. En la figura 5 se muestra una tensión  $V_s$  que cae debido al estado saturado de la máquina [8].

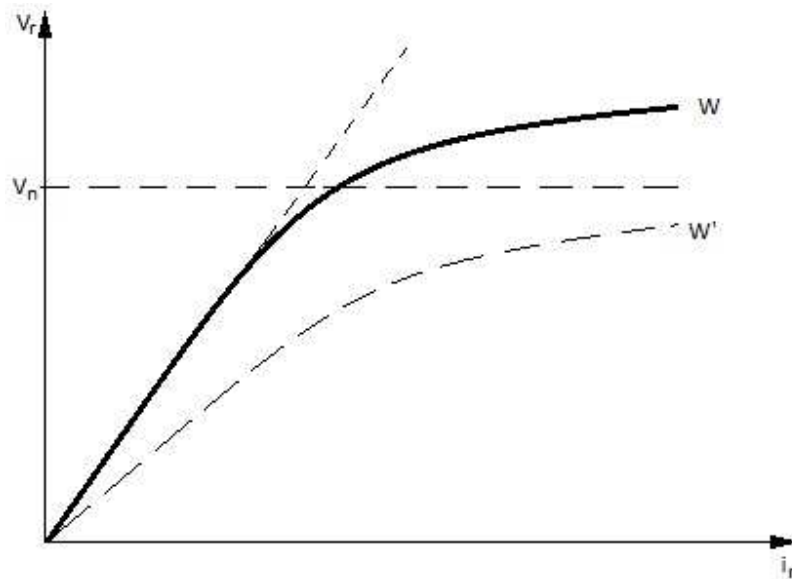
figura 5. Caída de tensión debido a la saturación de la máquina



Fuente: Díez Saldarriaga, Emiro. Máquinas eléctricas síncronas.

Si se considera que el flujo del estator y el flujo del rotor son muy grandes, siendo la diferencia entre los dos muy pequeña, la máquina no se satura; por lo que la saturación de la máquina depende del flujo neto. Si se realiza otra curva de saturación, pero esta vez modificando la velocidad y manteniendo la misma corriente de campo, se obtiene una curva semejante, lo que confirma que la saturación sólo depende de la magnitud del flujo, tal como se muestra en la figura 6 [8].

figura 6. Curvas de saturación a diferente velocidad, igual corriente de campo



Fuente: Díez Saldarriaga, Emiro. Máquinas eléctricas síncronas.

#### 4.5.2 Representación de la saturación de las máquinas síncronas

Para representar la saturación de la máquina síncrona, es necesario considerar lo siguiente:

- (a) Al estar los flujos de dispersión la mayor parte de sus trayectorias en el aire, se considera que son independientes a los efectos producidos por la saturación. Por tanto se considera que la saturación afecta exclusivamente a las inductancias que no son de dispersión. [15].
- (b) Los flujos de dispersión al ser pequeños y estar la mayor parte de su trayectoria en el aire, no contribuyen a la saturación del hierro. [15].
- (c) Se considera que en condiciones de carga y sin carga, la relación entre la saturación de flujo en el entrehierro y la f.m.m serán iguales. [15].
- (d) No hay acoplamiento magnético entre los ejes d y q. [15].

Según las consideraciones anteriores, se debe recordar que la saturación es exclusivamente para las inductancias que no son de dispersión. Por tanto, si se tiene [15]:

$$L_d = L_{ad} + L_l \quad (4.35)$$

$$L_q = L_{aq} + L_l \quad (4.36)$$

Sólo  $L_{ad}$  y  $L_{aq}$  saturan.

Ahora, Si se considera  $L_{adu}$  y  $L_{aqu}$  como los valores no saturados de  $L_{ad}$  y  $L_{aq}$  respectivamente, la saturación se considera a través de factores de saturación para cada eje. Siendo  $K_{sd}$  el factor de saturación para el eje directo y  $K_{sq}$  el factor para el eje de cuadratura. Con dichos factores de saturación se puede identificar el grado de saturación en cada uno de los ejes [15].

De acuerdo con lo anterior, los efectos de la saturación se pueden representar como

$$L_{ad} = K_{sd}L_{adu} \quad (4.37)$$

$$L_{aq} = K_{sq}L_{aqu} \quad (4.38)$$

Según la consideración (c) mencionada anteriormente, al realizar el ensayo de la máquina es posible obtener la curva característica de saturación a circuito abierto. Ésta es la grafica de la tensión terminal en vacío a velocidad nominal contra, la corriente de excitación ( $i_f$ ), También es válida la curva en condiciones de carga, interpretada como una curva  $\psi_{at}$  contra  $i$  (flujo magnético a través del entrehierro contra la corriente magnetizante) [15].

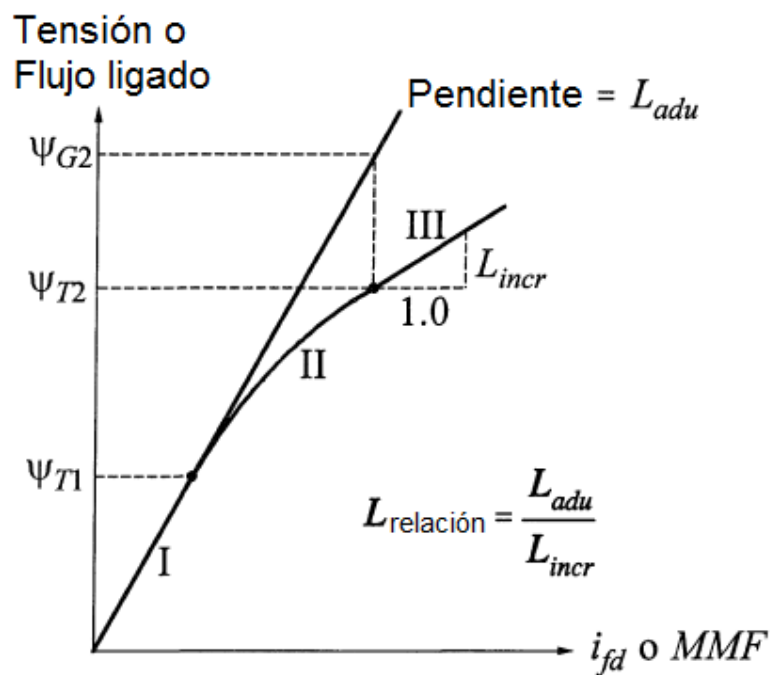
La curva característica de saturación permite obtener, para un punto de operación, el valor del  $K_{sd}$  en condiciones de vacío. Siendo “a” un punto de la curva de saturación mostrada en la figura 7, el factor de saturación está dado por: [15]



Segmento II: Región no lineal. Segmento definido por  $\psi_{T1} \leq \psi_{at} \leq \psi_{T2}$

Segmento III: Región lineal y completamente saturada. Segmento definido por  $\psi_{at} \geq \psi_{T2}$

figura 8. Regiones de la curva de saturación.



Fuente : KUNDUR, Prabha. Power system stability and control, traducido por Andrés Santos y Carlos Gómez.

En el segmento I, al ser la región no saturada, se presenta una línea recta. En este segmento la curva característica de saturación es igual a la curva en estado no saturado. Por tal razón, el flujo  $\psi_I$  en este segmento se considera nulo.

$$\psi_I = 0 \quad (4.42)$$

En el segmento II, según la figura 8, se observa que la curva de saturación muestra una desviación con respecto a la línea del entrehierro (estado no saturado). Este segmento, por la curvatura presentada en forma de codo, se considera como no lineal. Para la representación del flujo  $\psi_I$  se considera la expresión

$$\psi_I = A_{sat} e^{B_{sat}(\psi_{at} - \psi_{T1})} \quad (4.43)$$

Donde  $A_{sat}$  y  $B_{sat}$  son constantes en función de la característica de saturación del segmento II. [15].

Al considerar  $\psi_{at} = \psi_{T1}$ , en la ecuación (4.43), el flujo tomaría el valor de la constante  $A_{sat}$  en el límite del segmento I y II, lo que indica una discontinuidad, ya que se había mencionado que el valor del flujo  $\psi_I$  a lo largo del segmento I es nulo. Sin embargo, se considera que la constante  $A_{sat}$  toma valores muy pequeños, ocasionando que la discontinuidad presentada en dicho límite no tenga una mayor importancia. [15].

El segmento III se considera lineal y completamente saturado. La expresión para el flujo en este segmento es

$$\psi_I = \psi_{G2} + L_{relacion}(\psi_{at} - \psi_{T2}) - \psi_{at} \quad (4.44)$$

Donde

$$L_{relacion} = \frac{L_{adu}}{L_{incr}} \quad (4.45)$$

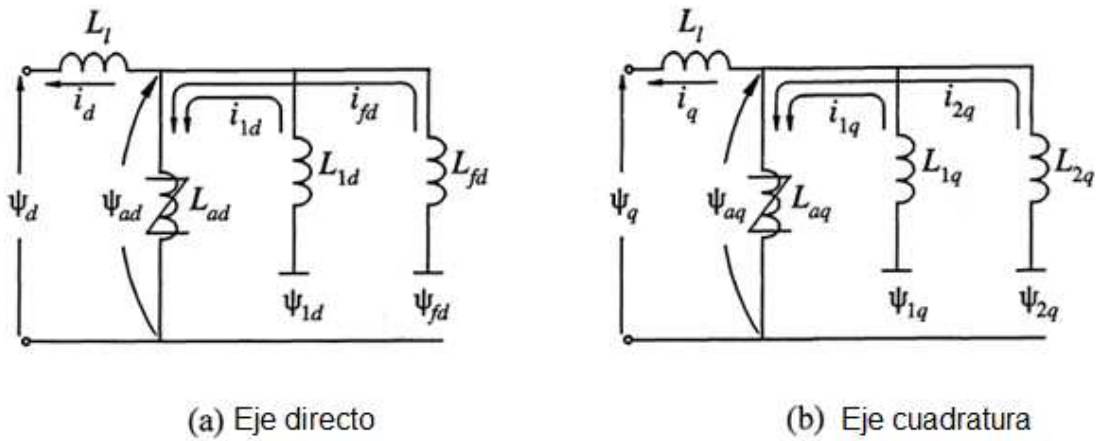
Siendo  $L_{adu}$  la pendiente de la línea del entrehierro y  $L_{incr}$  la pendiente de la curva característica de saturación del segmento III.

Según la ecuación 4.41, para el cálculo del factor de saturación  $K_{sd}$  es necesario el flujo  $\psi_{at}$  el cual está dado por

$$\psi_{at} = \sqrt{\psi_{ad}^2 + \psi_{aq}^2} \quad (4.46)$$

Donde  $\psi_{ad}$  y  $\psi_{aq}$  son las componentes del entrehierro de los ejes d y q respectivamente, componentes mostradas en la figura 9. [15].

figura 9. Circuitos equivalente no lineales.



Fuente : KUNDUR, Prabha. Power system stability and control, traducido por Andrés Santos y Carlos Gómez.

Los enlaces de los flujos del entrehierro de los ejes d y q están dados por

$$\psi_{ad} = \psi_d + L_l i_d = (e_q + R_a i_q) + L_l i_d \quad (4.47)$$

$$\psi_{aq} = \psi_q + L_l i_q = (-e_d - R_a i_d) + L_l i_q \quad (4.48)$$

En por unidad el valor del flujo  $\psi_{at}$  es igual a la tensión del entrehierro

$$\check{E}_a = \check{E}_t + (R_a + jX_l)\check{I}_t \quad (4.49)$$

Calculando el valor de  $E_a$  y las ecuaciones de  $\psi_I$  en cada uno de los segmentos, se puede determinar el valor del factor de saturación  $K_{sd}$  [15].

## 5. IMPLEMENTACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO

En el capítulo anterior se ha dado el fundamento teórico necesario para desarrollar o analizar el funcionamiento de la máquina síncrona en estado estable y transitorio. En este capítulo se implementa el modelo descrito anteriormente, mediante un algoritmo que muestra los pasos a seguir para facilitar el cálculo de los parámetros y variables necesarios, así como el método de inclusión del efecto de saturación.

Para implementar el modelo dq0 en la máquina síncrona se van a hacer las siguientes suposiciones:

### 5.1 SUPOSICIONES PREVIAS

- El modelo dq0 a seguir en la presente metodología no tiene en cuenta el sistema de ecuaciones mecánicas de la máquina síncrona, pues se supone variaciones no muy significativas en la velocidad del rotor.
- El modelo cuenta con dos devanados amortiguadores, uno en el eje directo y el otro en el eje de cuadratura
- Se plantea la opción de incluir o no los efectos de la saturación.
- El paso de integración es de 0.1 ms, tomado como sugerencia de [6].

Luego de haber establecido las anteriores suposiciones y delimitaciones se procede a definir la clase y forma de los datos requeridos para determinar y desarrollar el modelo.

### 5.2 ENTRADA DE DATOS

Los parámetros que se necesitan para llevar a cabo el análisis del funcionamiento de la máquina sincrónica bajo el modelo dq0 son los valores de las resistencias e inductancias del estator y rotor, así como los valores de placa. Normalmente los fabricantes además de los valores de placa, sólo entregan los valores de la

resistencia de armadura, las inductancias del estator (estables, transitorias y subtransitorias) y las constantes de tiempo.

También se pueden tener los datos acerca de la saturación del núcleo magnético de la máquina y si así se desea, puede realizarse el estudio teniendo en cuenta dicho efecto sobre las variables de la máquina. Estos datos generalmente vienen dados de forma gráfica.

### 5.2.1 Parámetros de la máquina.

Se requieren los datos de placa y condición de operación, así como también los parámetros constructivos de la máquina:

- Datos de placa y operación:

Tabla 1. Descripción datos de placa y operación

Parámetro	Descripción
S	Potencia aparente nominal
V	Tensión Nominal
E	Tensión de operación en p.u. Generalmente es 1
P	Potencia Activa generada en p.u
Q	Potencia Reactiva en p.u

- Parámetros: Resistencias, inductancias y constantes de tiempo detalladas en la Tabla 2.

Tabla 2. Descripción de parámetros de la máquina

Parámetro	Descripción
Ra	Resistencia de armadura.
Ld, Xd	Inductancia o reactancia del eje directo
Lq, Xq	Inductancia o reactancia del eje de cuadratura

Tabla 2. (continuación)	
Parámetro	Descripción
$L_0, X_0$	Inductancia o reactancia del eje 0
$L_d', X_d'$	Inductancia o reactancia transitoria del eje directo
$L_d'', X_d''$	Inductancia o reactancia subtransitoria del eje directo
$L_q', X_q'$	Inductancia o reactancia transitoria del eje de cuadratura
$L_q'', X_q''$	Inductancia o reactancia subtransitoria del eje de cuadratura
$L_l, X_l$	Inductancia o reactancia de dispersión
$T_{d0}'$	Constante de tiempo transitoria del eje directo
$T_{d0}''$	Constante de tiempo subtransitoria del eje directo
$T_{q0}'$	Constante de tiempo transitoria del eje de cuadratura
$T_{q0}''$	Constante de tiempo subtransitoria del eje de cuadratura

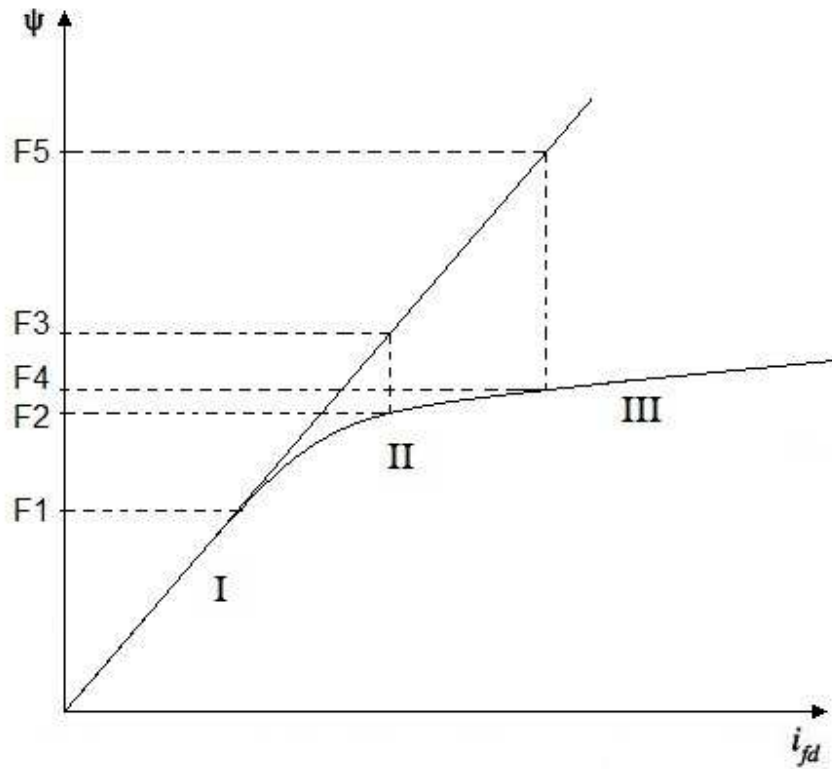
Los parámetros descritos en la Tabla 2 deben estar referenciados en el sistema por unidad. En el Anexo C se describe el procedimiento para expresar todas los parámetros y variables de la máquina en por unidad.

### 5.2.2 Datos de saturación

En el capítulo 2 se explicó el procedimiento a seguir para calcular la variación del flujo y la corriente en presencia de la saturación. Dicho procedimiento se encuentra detallado con mayor amplitud en [15] y [4].

Se requiere conocer como mínimo 5 valores de flujo que se encuentren en la zona II de la curva de saturación de circuito abierto u OCC por su acrónimo en inglés. En la figura 10 se puede observar que de dichos datos, 3 (F1, F2, F4) se encuentran sobre de la curva de circuito abierto y uno de ellos (F1) debe ser el límite inferior de dicha zona. Los otros 2 valores (F2 y F4) se proyectan sobre la línea del entrehierro y se obtienen los valores de F3 y F5 faltantes, para tener un total de 5.

figura 10. Obtención de los datos de saturación de la máquina



Fuente : KUNDUR, Prabha. Power system stability and control.

### 5.3 CALCULO DE CONDICIONES DE OPERACIÓN

Luego de haber obtenido los valores descritos en la Tabla 1, se procede a calcular la corriente, el ángulo del factor de potencia y la tensión de fase, utilizando las ecuaciones que se muestran a continuación.

$$I_t = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{E} \quad (5.1)$$

$$\phi = \cos^{-1}\left(\frac{P}{I_t * E}\right) \quad (5.2)$$

$$\tilde{E}_a = \tilde{E}_t + (R_a + jX_l)\tilde{I}_t \quad (5.3)$$

#### 5.4 CÁLCULO DE LAS MATRICES $[L_T]$ , $[L_E]$ Y $[R]$

El siguiente paso consiste en calcular y obtener los valores contenidos en las matrices descritas por las ecuaciones (4.29), (4.30) y (4.31), a partir de los datos obtenidos y descritos en la Tabla 2. Se tiene la opción de escoger si despreciar o no la saturación de la máquina.

A continuación se muestra el procedimiento a seguir para cualquiera de las dos opciones que se puede tomar: (con o sin saturación):

- Sin saturación

Cuando la saturación es despreciada se calculan los valores de los elementos que conforman las matrices (4.29), (4.30) y (4.31), utilizando las ecuaciones (5.4) a (5.14) que se describen a continuación:

$$L_{ad} = L_d - L_l \quad (5.4)$$

$$L_{aq} = L_q - L_l \quad (5.5)$$

$$L_{fd} = L_{ad} * \frac{(L'_d - L_l)}{L_{ad} - L'_d + L_l} \quad (5.6)$$

$$L_{kq} = L_{aq} * \frac{(L''_q - L_l)}{L_{aq} - L''_q + L_l} \quad (5.7)$$

$$L_{kd} = (L''_d - L_l) * \frac{(L_{ad} * L_{fd})}{L_{ad} * L_{fd} - (L''_d - L_l) * (L_{ad} * L_{fd})} \quad (5.8)$$

$$R_{fd} = \frac{(L_{ad} + L_{fd})}{T'_{d0} * 2\pi f} \quad (5.9)$$

$$R_{kd} = \frac{\frac{L_{ad} * L_{fd}}{L_{ad} + L_{fd}}}{T''_{d0} * 2\pi f} \quad (5.10)$$

$$R_{kq} = \frac{L_{aq} + L_{kq}}{T''_{q0} * 2\pi f} \quad (5.11)$$

$$L_{kkd} = L_{ad} + L_{kd} \quad (5.12)$$

$$L_{kkq} = L_{aq} + L_{kq} \quad (5.13)$$

$$L_{ffd} = L_{ad} + L_{fd} \quad (5.14)$$

- Con saturación

Recordando de la sección 5.2.2 que se han obtenido en total 5 datos (de F1 a F5) para recoger la información de la saturación en la zona II de la curva de circuito abierto, se procede a calcular los parámetros de la máquina que se ven afectados por la saturación. En la sección 4.5 se llegó a la conclusión que sólo los valores de  $L_{ad}$  y  $L_{aq}$  se saturan, y por lo tanto los valores que dependen de ellos van a cambiar su valor. En las ecuaciones (5.15) y (5.16) se calculan los valores sin saturar de  $L_{ad}$  y  $L_{aq}$ , a los cuales en el subíndice se les añade la letra u para diferenciarlos como valores no saturados (en ingles= unsaturated).

$$L_{adu} = L_d - L_l \quad (5.15)$$

$$L_{aqu} = L_q - L_l \quad (5.16)$$

Para simplificar la escritura se definen las siguientes variables:

$$C = F3 - F2$$

$$D = F5 - F4$$

$$E = F2 - F1$$

$$F = F4 - F1$$

Con lo cual se procede a calcular las constantes de la función que aproxima o describe la saturación en la zona II

$$A_{sat} = e^{\frac{\ln(C) - \frac{E}{F} \ln(D)}{1 - \frac{E}{F}}} \quad (5.17)$$

$$B_{sat} = \frac{\ln\left(\frac{C}{A_{sat}}\right)}{E} \quad (5.18)$$

$$\psi_I = A_{sat} e^{B_{sat}(|E_a| - F_1)} \quad (5.19)$$

A continuación se procede a calcular la constante de proporcionalidad que incluye el efecto de la saturación en los valores de  $L_{ad}$  y  $L_{aq}$ .

$$K_{sd} = \frac{|E_a|}{\psi_I + |E_a|} \quad (5.20)$$

Ahora se calcula el valor de las inductancias que se saturan y su incidencia sobre los demás parámetros de la máquina:

$$L_{ad} = K_{sd} L_{adu} \quad (5.21)$$

$$L_{aq} = K_{sq} L_{aqu} \quad (5.22)$$

$$L_d = L_{ad} + L_l \quad (5.23)$$

$$L_q = L_{aq} + L_l \quad (5.24)$$

Finalmente se deben calcular las inductancias que dependen de los valores anteriores, descritas por las ecuaciones de (5.6) a (5.14)

### 5.5 CÁLCULO DEL ÁNGULO DE TORQUE $\delta$

Para calcular el ángulo del torque son necesario datos como el ángulo del factor de potencia, la corriente, la tensión, la resistencia de armadura y la inductancia del eje de cuadratura; datos que fueron suministrados o que fueron hallados en cálculos anteriores. Con estos datos se procede a realizar los reemplazos en la ecuación (5.25)

$$\delta = \tan^{-1} \left( \frac{L_q I_t \cos(\theta) - R_a I_t \sin(\theta)}{E + R_a I_t \cos(\theta) + L_q I_t \sin(\theta)} \right) \quad (5.25)$$

## 5.6 CÁLCULO DE LAS CORRIENTES DE ESTADO ESTABLE O PREFALLA

Habiendo calculado el ángulo del torque, el ángulo del factor de potencia y la corriente, se procede a calcular las corrientes de los ejes directo y de cuadratura empleando las ecuaciones mostradas a continuación

$$I_d = I_t \sin(\delta_i + \phi) \quad (5.26)$$

$$I_q = I_t \cos(\delta_i + \phi) \quad (5.27)$$

Debido a que la máquina se encuentra en estado estable o de prefalla, se considera que la corriente de componentes simétricas se expresa como

$$I_0 = I_a + I_b + I_c = 0 \quad (5.28)$$

## 5.7 CÁLCULO DEL VALOR DE TENSIONES DE ESTADO ESTABLE O PREFALLA

Aplicando lo descrito en la sección 4.3, y utilizando la ecuación (4.6) se realiza la transformación de tensiones y se obtienen los valores de  $e_d$ ,  $e_q$  y  $e_0$ . Donde  $V_m$  se toma como la tensión de operación  $E$  descrita en la sección 5.2.1.

$$\begin{bmatrix} e_d \\ e_q \\ e_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} * \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_m * \sin(\omega_s * t) \\ V_m * \sin(\omega_s * t - \frac{2\pi}{3}) \\ V_m * \sin(\omega_s * t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (5.29)$$

En estas ecuaciones  $\theta$  es la posición del rotor, que se calcula multiplicando la velocidad del rotor que se supone es la velocidad de sincronismo, por el tiempo transcurrido.

$$\theta = \omega_r * t = \omega_s * t$$

## 5.8 CÁLCULO DE LA CORRIENTE DE CAMPO

Para el cálculo de la corriente de campo es necesario haber calculado previamente datos como la tensión, resistencias, inductancias y las corrientes de los ejes d y q.

$$I_{fd} = \frac{e_q + R_a I_q + L_d I_d}{L_{ad}} \quad (5.30)$$

## 5.9 CÁLCULO DE LAS CORRIENTES EN ESTADO TRANSITORIO

Utilizando la ecuación (4.27) se tiene la opción de calcular el vector de las 6 corrientes del modelo dq0 cuando se presente una falla de tensión.

$$[I(t)] = [A]^{-1} * [ [e(t)] + [e(t - \Delta t)] - [B] * [I(t - \Delta t)] ]$$

Para cada instante de tiempo se debe hallar el valor de las corrientes de campo, del eje directo, de cuadratura, del eje 0 y de los devanados amortiguadores.

## 5.10 CÁLCULO DE LAS CORRIENTES DE FASE

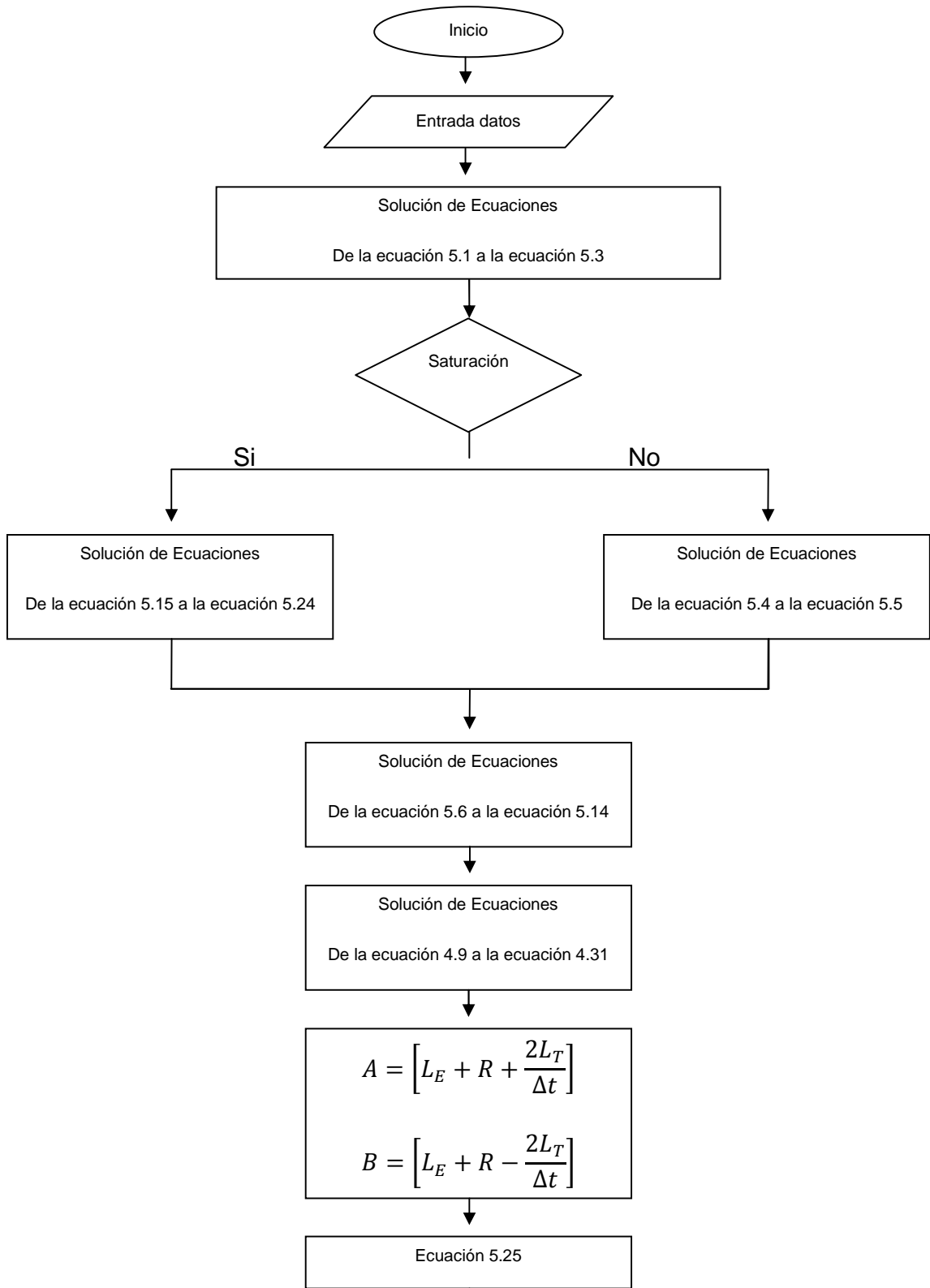
Los variables de salida que se pueden desear son las corrientes y tensiones tanto de fase como de los ejes dq0.

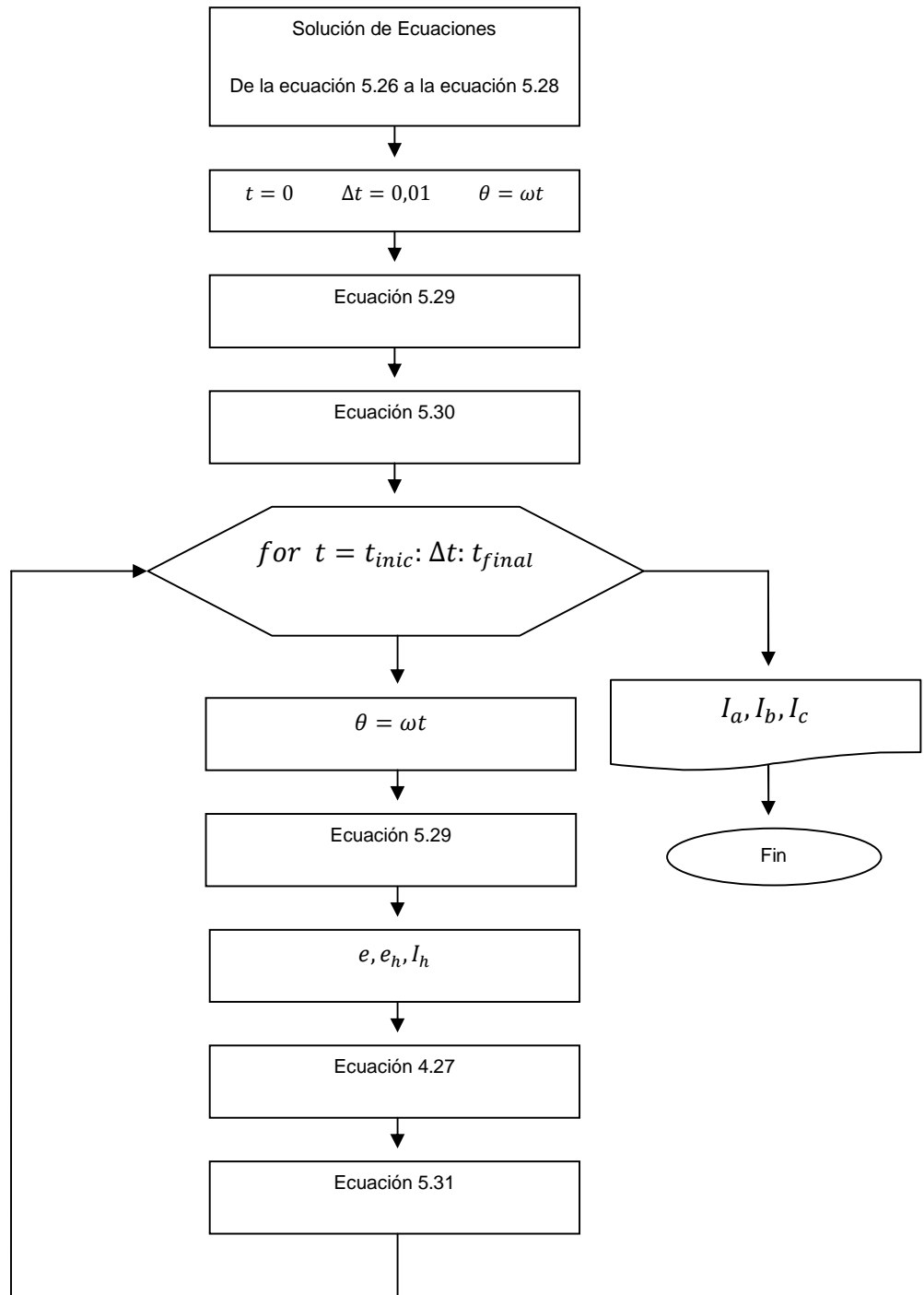
Aprovechando la propiedad de ortogonalidad de la transformación de Park descrita en la sección 4.3, se aplica la transformación inversa para obtener los valores de las corrientes de fase a partir de las conocidas corrientes de los ejes dq0.

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} * \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\text{Sen}(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\text{Sen}(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\text{Sen}(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_0 \end{bmatrix}$$

## **5.11 RESUMEN**

Para resumir el método propuesto a lo largo del presente capítulo, se presenta el siguiente algoritmo que tiene el objetivo de servir como guía a la hora de realizar ordenadamente la serie de cálculos a desarrollar para obtener o conocer el comportamiento de la máquina sincrónica ante cualquier disturbio. También al presentar esta metodología de manera gráfica, se facilita la implementación en cualquier software de desarrollo numérico; por ejemplo en MATLAB®.





## 6. SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el capítulo anterior se ha descrito el modelo a implementar para el estudio del funcionamiento de la máquina síncrona en estado transitorio, bajo el sistema de referencia  $dq0$ . También se ha visto la necesidad de poder implementar dicho modelo mediante una herramienta computacional, debido a la cantidad de cálculos e iteraciones que se deben realizar.

Para facilitar dicha implementación se ha desarrollado una herramienta que permite obtener las respuestas de tensiones y corrientes en estado transitorio de la máquina sincrónica. Dichas respuestas se pueden obtener para el sistema de referencia  $abc$  y el  $dq0$ .

Esta herramienta se ha desarrollado en MATLAB® gracias a la facilidad que ofrece dicha plataforma a la hora de desarrollar algoritmos, crear software, aplicaciones especiales y toolboxes que trae adjunto, y que además es una herramienta de la cual, la Universidad Industrial de Santander ha adquirido las licencias necesarias para que sus estudiantes la puedan disfrutar en su versión más completa posible. Por estas razones la herramienta computacional *DQ0* ha sido desarrollada bajo la plataforma de MATLAB® y ha sido entregada en forma ejecutable (archivo de extensión \*.exe) de tal manera que no se requiera tener instalado MATLAB® para poder ejecutarla.

Se recomienda leer el manual del usuario que se encuentra en el Anexo D del presente documento y también el manual de instalación que se encuentra en el CD de anexos.

En este capítulo se va a realizar una comparación de los resultados obtenidos por la herramienta *DQ0*, contrastándolos con el resultado propuesto u obtenido por el autor que desarrollo este tema específico. Esto se hace con el ánimo de validar o

comprobar que los resultados obtenidos por la herramienta *DQ0* son lo más cercanos posible a los esperados.

A continuación se procede a presentar la bibliografía que va a ser utilizada para la comparación de resultados, resumiendo los aspectos más importantes y presentando los valores de los parámetros que se necesitan para la simulación.

### **6.1 ESTUDIO A COMPARAR**

En la revisión bibliográfica se encuentra un artículo aceptado y publicado por la IEEE, titulado “*A phase-domain synchronous generator including saturation effects*” presentado por J. R Martí y K. W LOUIE [17], en el cual los autores realizan una simulación de un alternador sincrónico utilizando un modelo propuesto en MicroTran’s® y un nuevo modelo propuesto por ellos mismos, el cual incluye los efectos de la saturación. En dicho artículo se presenta y se hace una comparación entre los resultados obtenidos de corriente de campo y de fase, con y sin el efecto de la saturación.

Se va a tomar como referencia dicho artículo para comparar sus resultados con los obtenidos con la herramienta *DQ0* propuesta en el presente trabajo, básicamente por las siguientes razones:

- el modelado de la máquina se hace por medio del modelo de fases, lo cual sirve de guía para verificar que los resultados obtenidos con el modelo dq0 no son diferentes a los del modelo de fases.
- Ofrecen resultados en los cuales el efecto de la saturación ha sido tenido en cuenta. Esto ayudará a corroborar que el modelo de saturación implementado en la herramienta propuesta ofrece resultados satisfactorios.
- Brinda los resultados necesarios para realizar la validación del modelo.

A continuación se presentan los parámetros, valores de placa y condiciones de operación de la máquina que los autores simularon en el artículo descrito anteriormente.

## 6.2 DATOS DE ENTRADA

Cómo se ha observado en el capítulo 3 para analizar el comportamiento de la máquina se requiere el conocimiento de parámetros básicos que son ofrecidos o entregados por los fabricantes en el manual de operación y mantenimiento del alternador. A continuación se presentan los parámetros de la máquina que fue objeto de estudio y simulación por los autores anteriormente mencionados. [17].

### 6.2.1 Parámetros y datos de saturación

En la Tabla 3 se muestran los parámetros de la máquina simulada por J.R. Martí y K.W. LOUIE.

Tabla 3. Parámetros de la máquina a simular.

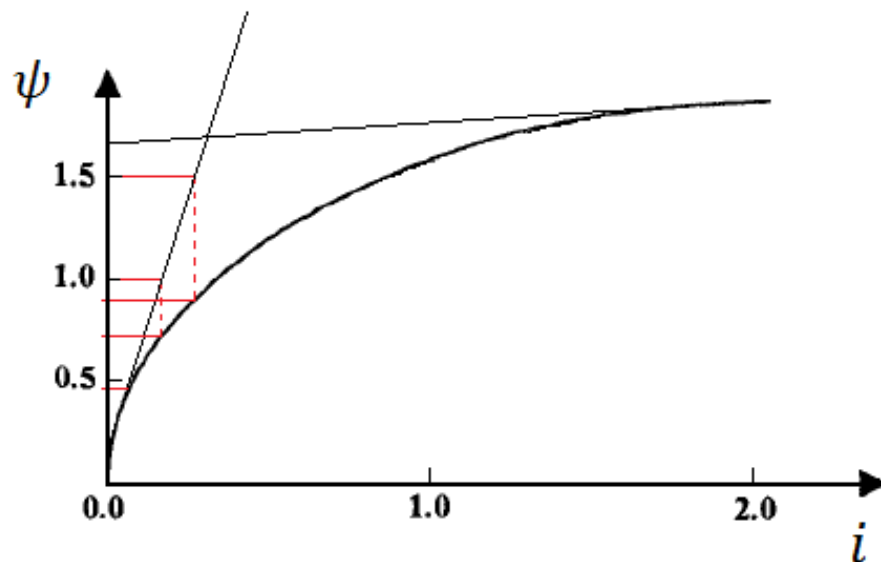
Ra [p.u]	0.001096
Ld [p.u]	1.7
Lq [p.u]	1.64
L0 [p.u]	1.4
Ld' [p.u]	0.238324
Ld'' [p.u]	0.18469
Lq' [p.u]	1.64
Lq'' [p.u]	0.185151
Ll [p.u]	0.15
Td0' [s]	6.19487
Td0'' [s]	0.028716
Tq0' [s]	0
Tq0'' [s]	0.07496

Todos los datos presentados en la Tabla 3 son ingresados a la herramienta *DQ0* en la opción parámetros. Para ello nuevamente se recomienda ver el Anexo D, en el cual se presenta cómo se deben ingresar dichos datos.

Como se ha descrito anteriormente, la herramienta computacional *DQ0* permite escoger si incluir o despreciar el efecto de saturación, dependiendo del análisis que el usuario requiera hacer. Generalmente los datos referentes a la saturación de la máquina vienen presentados de forma gráfica. En la sección 5.2.2 se ha explicado la manera de obtención de los datos de la curva de saturación.

En la figura 11 se muestra la característica de saturación de la máquina a simular utilizada en [17]. También se muestran los 5 datos que se necesitan como entrada para el aplicativo *DQ0*, los cuales se presentan en la Tabla 4 y deben ser ingresados a la herramienta mediante la opción de saturación.

figura 11. Curva de saturación para la máquina



Fuente: MARTÍ, J.R; LOUIE, K.W. A phase-domain synchronous generator including saturation effects.

A continuación en la tabla 4 se presentan los 5 puntos de la gráfica de saturación mostrada en la figura 11. Aproximadamente son:

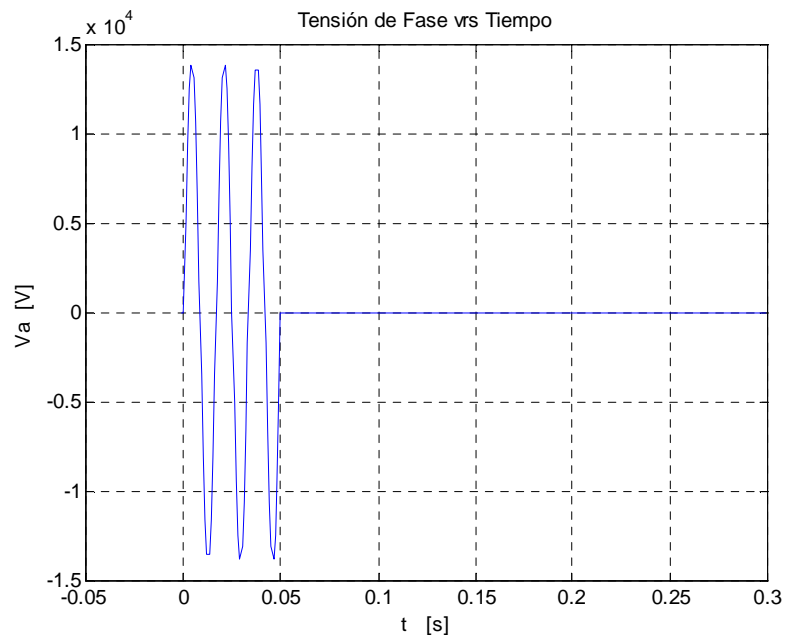
Tabla 4. Datos de saturación.

F1	0.46
F2	0.72
F3	1
F4	0.89
F5	1.5

### 6.2.2 Condiciones de operación de prefalla y valores de placa:

La máquina se encuentra operando a tensión nominal bajo condición de plena carga, a velocidad nominal. En 50 ms un corto circuito trifásico es aplicado en sus terminales [17]. En la gráfica 12 se puede observar la forma de onda de la tensión de la fase a en los terminales de la máquina, en donde claramente se observa el tiempo en el cual la tensión cae súbitamente a 0.

figura 12. Tensión de la Fase a



En la Tabla 5 se resumen los datos correspondientes al tipo y tiempo de falla descritos en el párrafo anterior, los cuales deben ser ingresados a la herramienta *DQ0* en la opción tipo de falla.

Tabla 5. Datos a ingresar en tipo de falla.

Tipo de Falla	Trifásica
Tiempo de inicio	0.05 [s]
Tiempo final de simulación	0.3 [s]

En la opción datos de placa se deben ingresar los datos de operación que también se describieron en los párrafos precedentes y que se resumen en la Tabla 6 junto con los valores de placa de potencia y tensión suministrados en [17].

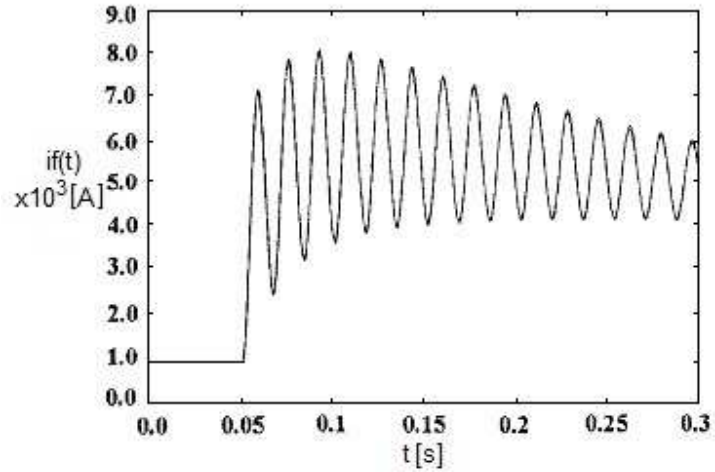
Tabla 6. Datos de placa y operación

S [MVA]	200
V [V]	13800
E [p.u]	1
P [p.u]	1
Q [p.u]	0

### 6.3 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

La figura 13 ha sido el resultado obtenido para la corriente de campo cuando la saturación es incluida por MARTÍ y LOUIE, presentado en [17].

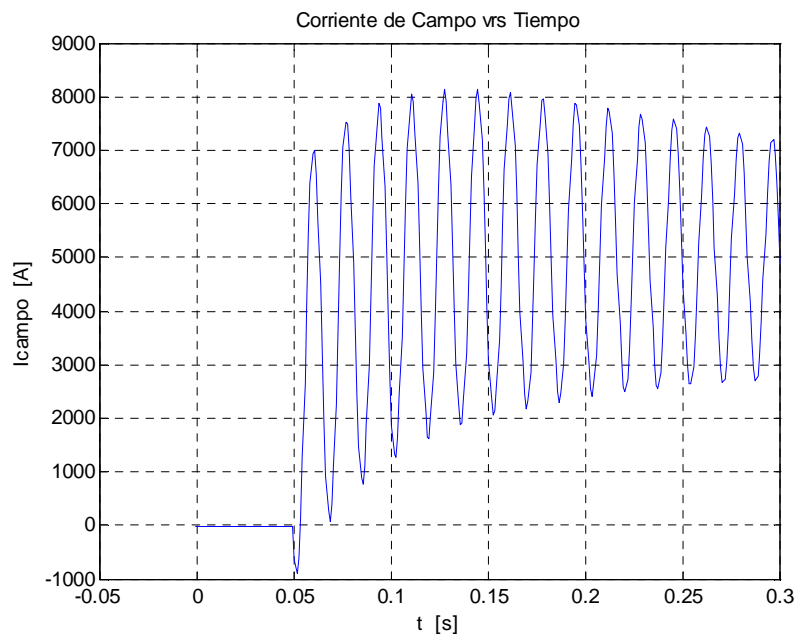
figura 13. Corriente de Campo



Fuente: MARTÍ , J.R; LOUIE, K.W. A phase-domain synchronous generator including saturation effects.

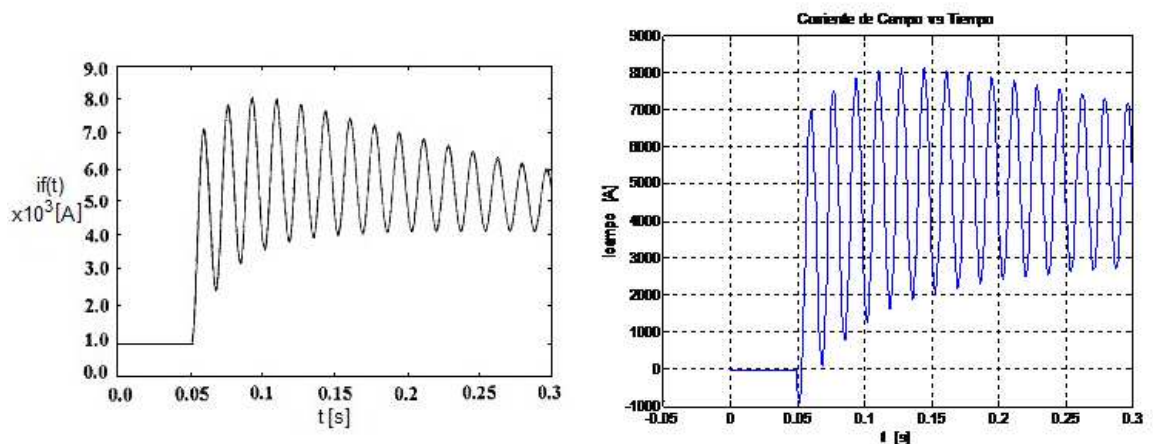
La figura 14 ha sido el resultado obtenido utilizando la herramienta computacional *DQ0* para la corriente de campo de la máquina cuando el efecto de la saturación no es despreciado.

figura 14. Corriente de campo con saturación obtenida con la herramienta DQ0



En la figura 15 se dispone de las figuras 13 y 14 ubicadas de tal manera que una comparación visual sea más fácil de realizar.

figura 15. Comparativo figuras 13 y 14.



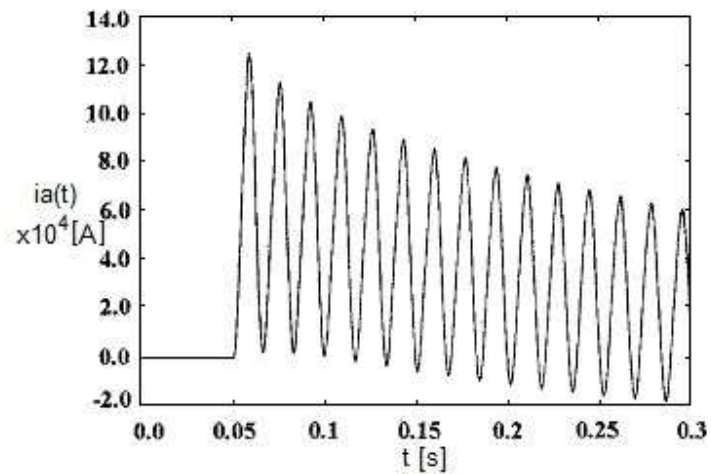
Fuente: MARTÍ , J.R; LOUIE, K.W. A phase-domain synchronous generator including saturation effects. (figura de la izquierda).

Observando la figura 15, se puede observar la gran similitud que comparten tanto en la forma como en sus valores máximos.

- La primera oscilación alcanza un valor muy cercano a los 7000 [A] tanto en el resultado propuesto por los autores en [17] como la gráfica obtenida con el software *DQ0*.
- La segunda y tercera oscilación alcanzan valores máximos cercanos a los 7500 y 8000 [A] respectivamente y los valores obtenidos por la herramienta *DQ0* mostrados en la figura 14 son iguales a los obtenidos y mostrados en la figura 13.
- A partir de la cuarta oscilación en la figura 13 se observa una tendencia descendente inmediata, mientras que en la figura 14 una tendencia estable y luego a partir de la 5 oscilación comienza a decrecer muy lentamente comparado con el descenso que presenta la figura 13.

Ahora, se procede a analizar y comparar los resultados obtenidos para las corrientes de fase. En la figura 16 se muestra el resultado obtenido en [17] para el caso en el efecto de la saturación es tenido en cuenta.

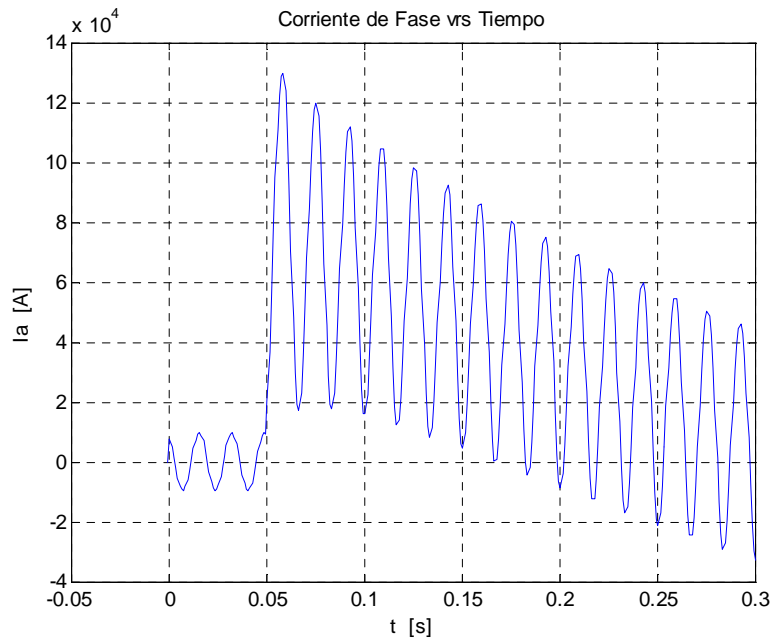
figura 16. Corriente de fase a con saturación



Fuente: MARTÍ , J.R; LOUIE, K.W. A phase-domain synchronous generator including saturation effects.

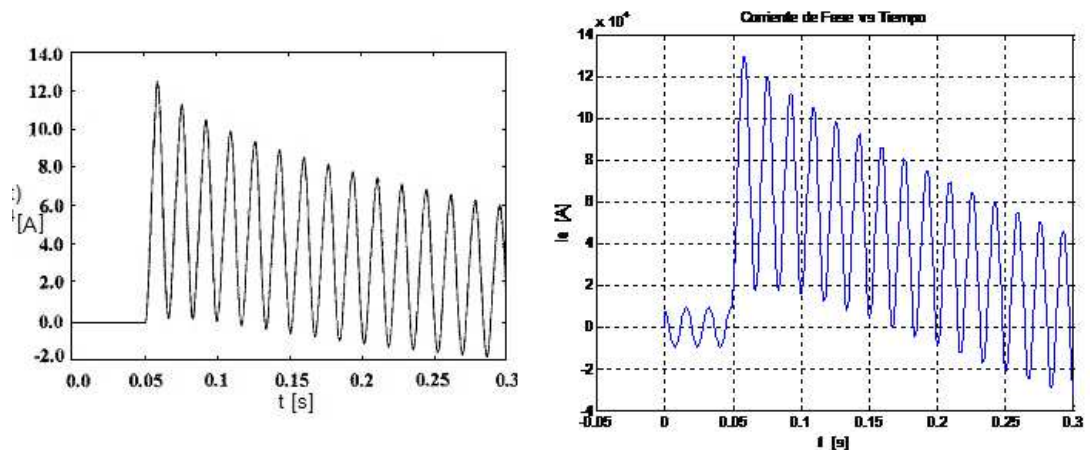
En la figura 17 se muestra el resultado obtenido por medio de la herramienta DQ0 para la corriente de la fase a considerando el efecto de la saturación.

figura 17. Corriente de Fase a con saturación obtenida con la herramienta DQ0



En la figura 18 se presentan nuevamente las figuras 16 y 17, pero esta vez dispuestas de una manera tal que la interacción visual con ellas permita una rápida comparación y toma de conclusiones.

figura 18. Comparativo entre figuras 16 y 17



Fuente: [MARTÍ, J.R; LOUIE, K.W. A phase-domain synchronous generator including saturation effects. (figura de la izquierda).

Comparando el resultado ofrecido por la herramienta *DQ0* (figura 17) con los resultados obtenidos por MARTÍ y LOUIE en [17] (figura 16) se puede observar la similitud en la forma de las gráficas. A continuación se presentan ciertas aproximaciones y diferencias que se detallan al comparar gráficas presentadas en la figura 18:

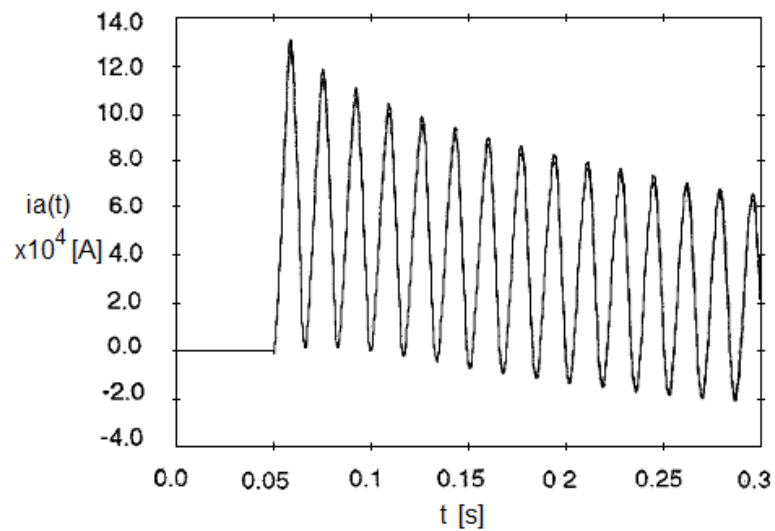
- El valor máximo que se presenta en la primera oscilación es muy cercano a los 130000 [A], y es muy similar en ambas gráficas.
- La segunda y tercera oscilación en las dos gráficas tienen un valor muy similar, cercano a los 120000 y 110000 A, respectivamente.
- En la cuarta oscilación se presenta una diferencia entre los valores presentados entre la respuesta obtenida con la herramienta *DQ0* y la respuesta presentada en [17]. En la figura 16 esta oscilación tiene un valor que supera los 100000 A, mientras que en la figura 16 dicha oscilación no alcanza a llegar al valor mencionado.
- Entre la quinta y octava oscilación las dos figuras se aproximan en sus valores, llegando a tomar un valor de 80000 A en la octava oscilación, Esto se presenta aproximadamente a los 180 ms.
- Antes de llegar a los 250 ms se observa una diferencia sostenida entre las dos figuras. En la última oscilación que se presenta antes de finalizar la simulación, la figura 16 se observa que el valor de esta última oscilación aproximadamente se encuentra por debajo de los 50000 A, mientras que en la figura 16 dicho valor llega a los 60000.

Hasta el momento se han analizado los resultados que se obtienen cuando se tiene en cuenta el efecto de la saturación magnética. Ahora se procede a analizar los resultados obtenidos cuando se desprecia dicho efecto.

El procedimiento comienza ingresando los datos de la misma manera que se ha descrito en el numeral 4.2, exceptuando sólo los datos correspondientes a la saturación ya que no van a ser tenidos en cuenta en esta parte.

En la figura 19 se muestra el resultado obtenido en [17] para la corriente de fase.

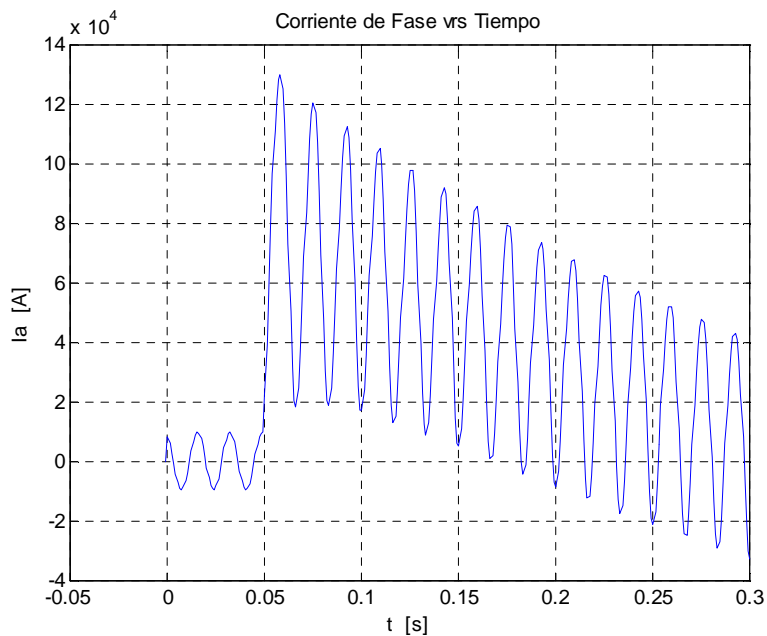
figura 19. Corriente de fase sin saturación



Fuente: MARTÍ , J.R; LOUIE, K.W. A phase-domain synchronous generator including saturation effects.

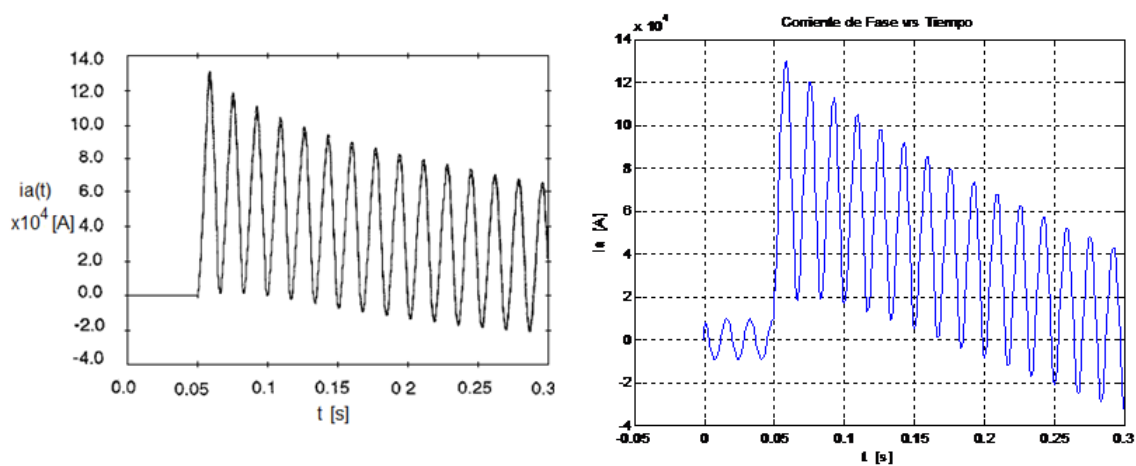
En la figura 20 se muestra la respuesta obtenida utilizando la herramienta *DQ0* para la corriente de la fase a despreciando el efecto de la saturación.

figura 20. Corriente de Fase sin Saturación



Comparando las figuras 19 y 20 se puede analizar y tomar conclusiones similares a las tomadas para el caso en el cual la saturación es tomada en cuenta.

figura 21. Comparativo figuras 19 y 20.



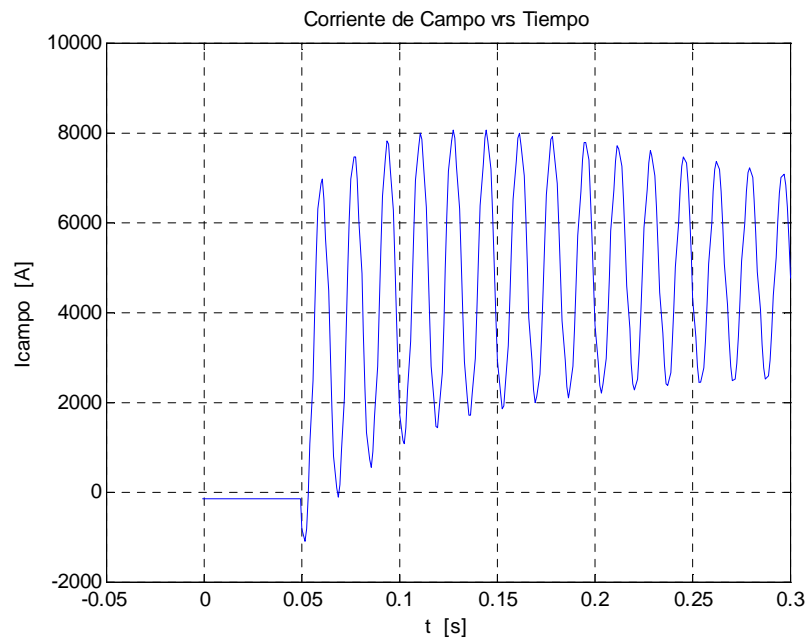
Fuente: MARTÍ, J.R; LOUIE, K.W. A phase-domain synchronous generator including saturation effects.(Figura de la izquierda).

De la primera a la octava oscilación las dos gráficas presentan valores muy parecidos. A partir de allí se observa una diferencia considerable entre los valores presentados por ambas graficas. El valor de la ultima oscilación presentada en la figura 19 es de aproximadamente 60000 A, mientras que en la figura 20 es de 40000 A aproximadamente.

La causa de las anteriores diferencias presentadas pueden ser de tipo metodológico o de tipo estructural, ya que puede ser errores de aproximación presentados por el método de integración numérica o también pueden ser debidas a las aproximaciones o suposiciones que se han hecho y planteado para el desarrollo e implementación de este modelo.

La figura 22 corresponde al resultado obtenido mediante la utilización de la herramienta *DQ0* para la corriente de campo cuando la saturación es despreciada. Estos valores no son mostrados en los resultados que se presentan en [17], por lo cual no se cuenta con la contraparte para poder contrastarlos. Pero comparando los resultados mostrados en la figura 22 con la figura 14, se puede observar que al tener en cuenta el efecto de la saturación magnética la corriente de campo es un poco mayor que cuando se desprecia ese efecto.

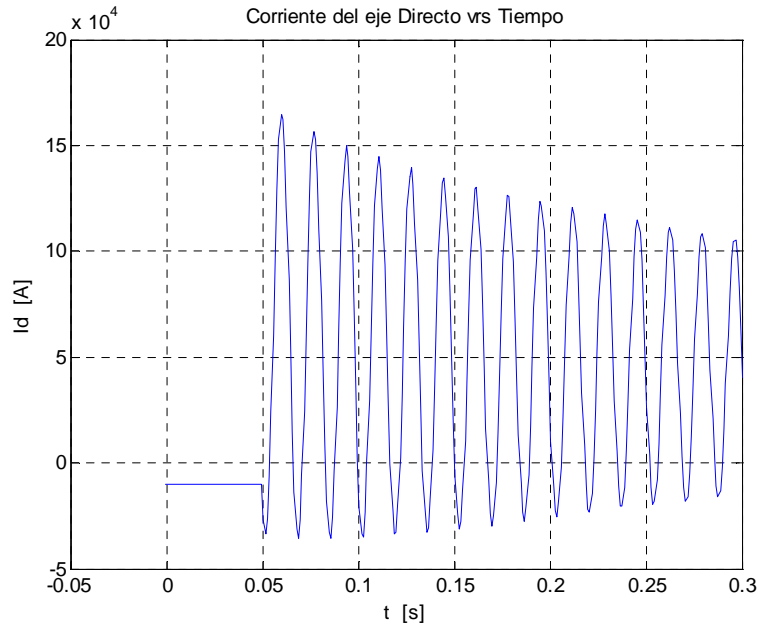
figura 22. Corriente de Campo sin saturación



Además de los resultados mostrados en las anteriores figuras, la herramienta DQ0 también puede entregar los resultados para las tensiones de fase, las tensiones y las corrientes en los ejes dq0.

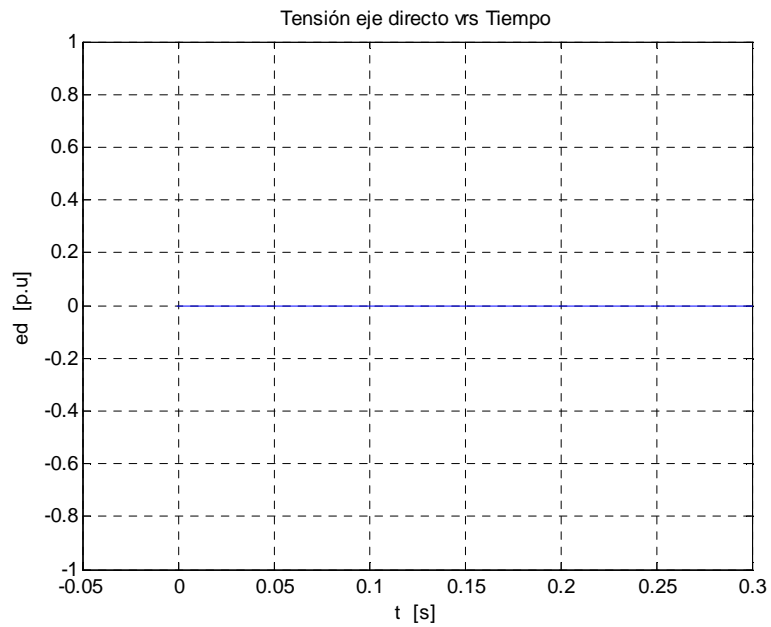
En la figura 23 se muestra la respuesta obtenida para la corriente en el eje directo, cuando el efecto de la saturación es tenido en cuenta.

figura 23. Corriente en el eje directo con saturación



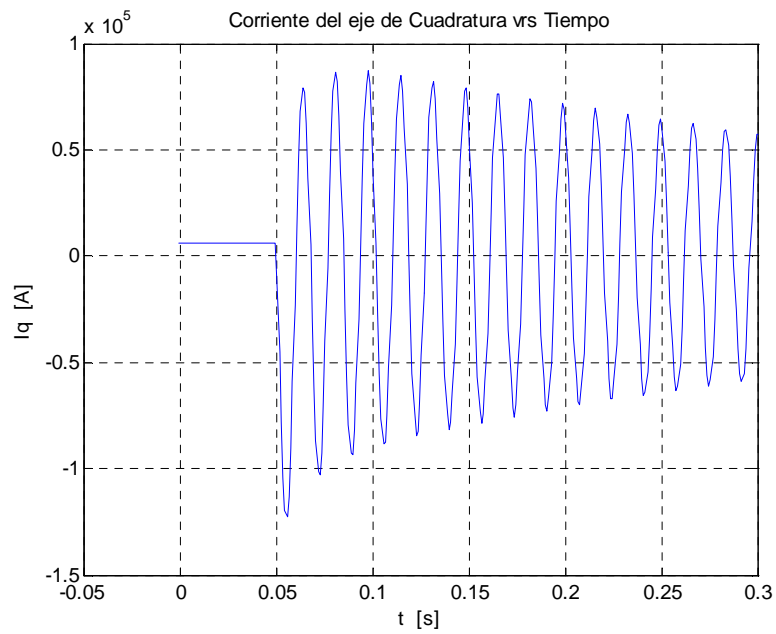
La tensión en el eje directo, como se vio en los capítulos 2 y 3, es obtenida mediante la aplicación de la transformada de Park, y para las condiciones de operación y suposiciones que se hicieron antes de implementar el modelo, dicha tensión toma un valor de 0 mientras la máquina se encuentra en estado estable, y por condiciones externas impuestas por las condiciones del tipo de perturbación, mantiene su valor cuando la falla ha ocurrido en la máquina. Esta tensión es mostrada en la figura 24.

figura 24. Tensión en el eje directo.



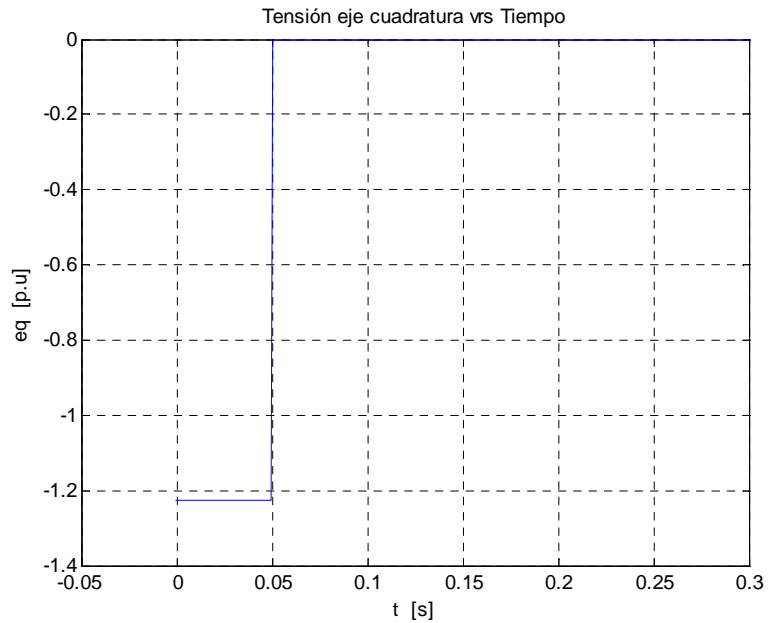
En las figuras 25 y 26 respectivamente se muestran las gráficas obtenidas para la corriente y tensión en el eje de cuadratura. En la figura 25 se puede ver que la corriente de cuadratura en estado estable tiene un valor constante y al aparecer la ocurrencia de falla, comienza a oscilar tomando valores cercanos a los 10000 A.

figura 25. Corriente eje de cuadratura con saturación.



Mientras que para la tensión de cuadratura, mostrada en la figura 26, en estado estable cuenta con un valor constante y al aparecer la falla cae a 0; pues esa es la condición de la falla que se traslada al eje de cuadratura por medio de la transformada de Park.

figura 26. Tensión eje de cuadratura con saturación.



En el capítulo 2 se explicó que era necesario la definición de un nuevo eje para que la transformada de Park pueda ser bidireccional. Este nuevo eje se asocia a las componentes de secuencia simétrica, en las cuales, los valores de tensión y de corriente sólo van a ser diferentes de cero en caso de presentarse una falla de tipo asimétrico. Para este caso, en la sección 4.2.2 se ha establecido que el tipo de falla que va a perturbar el funcionamiento estable de la máquina va a ser una falla de tipo simétrico. Por este motivo en las figuras 27 y 28 se observa que la tensión y corriente en el eje 0 son cero.

figura 27. Corriente en el eje 0.

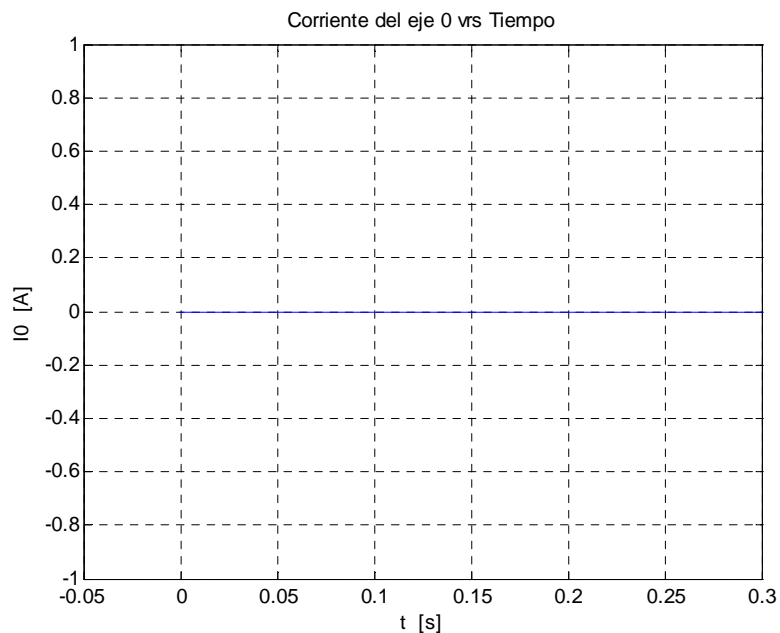
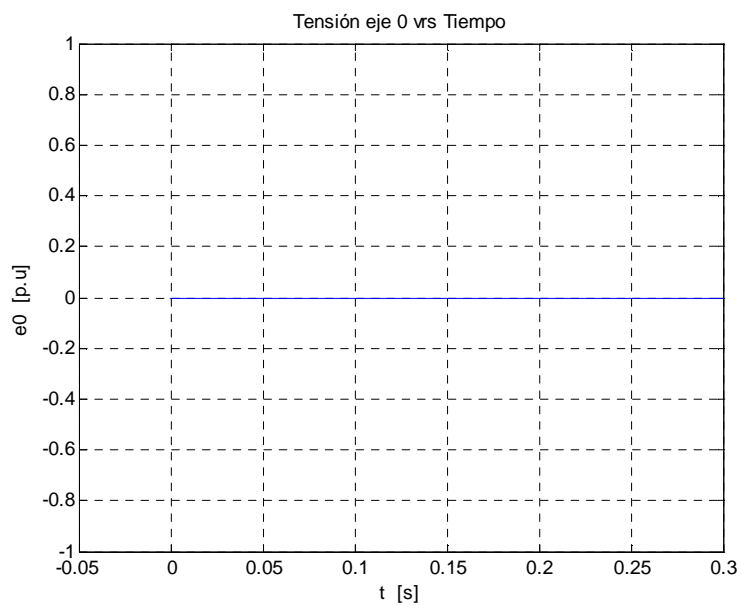


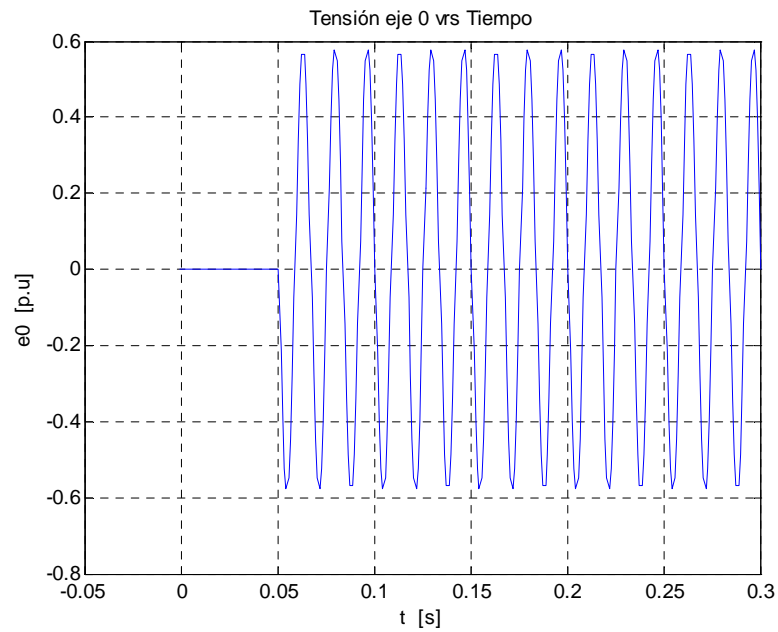
figura 28. Tensión en el eje 0.



Con el ánimo de mostrar la relación existente entre el eje 0 y las componentes simétricas, a continuación en la figura 29 se muestra el resultado obtenido para

cuando se simula una falla monofásica, que es asimétrica y que por lo tanto se espera que tanto la corriente como la tensión en el eje 0 dejen de ser constantes y diferentes de 0.

figura 29. Tensión eje 0 falla asimétrica.



## 7. CONCLUSIONES

- ✓ Mediante la manipulación en tiempo discreto del sistema de ecuaciones característico de la máquina sincrónica, se implementó un programa en el lenguaje y plataforma de MATLAB® que permite estudiar el comportamiento de la máquina en estado transitorio e incluyendo el estado de saturación de la misma.
- ✓ Debido a las ventajas que presenta el modelo dq0 a la hora de hacer menos cálculos gracias a la no dependencia de la posición del rotor, es un modelo que simplifica las tareas en el momento de programar.
- ✓ La inclusión del efecto de la saturación en el modelo de la máquina sincrónica, es importante por las consecuencias que ésta trae sobre el análisis del comportamiento de la misma. Si se omite la saturación los resultados arrojados en el análisis pueden presentar un error mayor. Si la saturación se incluye se tiene una mejor aproximación sobre el comportamiento real de la máquina.
- ✓ Para discretizar las ecuaciones que describen el funcionamiento de la máquina síncrona es necesario la aplicación de un método de integración numérica que debe cumplir como mínimo la condición de estabilidad numérica. La regla trapezoidal ofrece una alta estabilidad numérica, sumado a la poca memoria que requiere tener, ya que sólo necesita almacenar los resultados de la iteración anterior. Además es un método de fácil implementación.

- ✓ En el capítulo 4 se pudo ver la validez del modelo implementado mediante la comparación de resultados de investigaciones publicados con anterioridad. Se pudo observar que la herramienta DQ0 presenta gran similitud en cuanto a la forma de la onda y sus valores máximos.
- ✓ Al comparar los resultados obtenidos por la herramienta DQ0, se observa que después de transcurrido cierto tiempo comienza a presentar diferencias con la respuesta esperada. Esta diferencia puede ser causada por el método de integración escogido, ya que todos estos métodos traen implícitos limitantes de exactitud. O también las causas pueden ser el impacto que alguna de las suposiciones hechas ejerce sobre los resultados globales.
- ✓ Se sugiere para una futura investigación, la inclusión del cálculo y de la simulación de la parte mecánica de la máquina. Esto es, no suponer que la velocidad del rotor no varía sino todo lo contrario, incluir la forma de calcular dicha variación. Así como la utilización de diferentes métodos de integración numérica para la solución de las ecuaciones diferenciales y analizar su inferencia en la exactitud de las respuestas presentadas en el modelo.

## 8. BIBLIOGRAFIA

- [1] ADKINS, M.A. Transient theory of a synchronous generators connected to power systems. 1950.
- [2] ALLER, José Manuel. Máquinas eléctricas rotativas 1 ed.: Editorial EQUINOCCIO, 2007. ISBN 980-237-223-4.
- [3] ANDERSSON, Paul M. Analysis of faulted power systems 2 ed.: John Wiley & Sons, INC, 1995. (IEEE Press power system engineering series) . ISBN 0-7803-1145-0.
- [4] ANDERSON, Paul M; FOUAD, A. Power systems control and stability 2 ed.: John Wiley & Sons, Inc, 2003. (IEEE Press power system engineering series). ISBN 0-471-23862-7.
- [5] BOLDEA, Ion. The electric generator handbook 1 ed.: 2006.
- [6] Brandwajn, Vladimir. Synchronous generators models for the simulation of electromagnetic transients. The university of British Columbia, Vancouver, Canada. 1977
- [7] CRARY, S. B. y WARING, M. L. Torque –angle characteristics of synchronous machines following system disturbances. A.I.E.E Quarterly transactions. 1932.
- [8] Díez Saldarriaga, Emiro. Máquinas eléctricas sincrónicas. : Universidad Pontificia Bolivariana, sede Medellín. 1990.
- [9] DOHERTY, R.E; NICKLE,C.A. Synchronous machine I : an extension of Blondel’s two reaction theory. A.I.E.E Quarterly transactions.
- [10] DOHERTY, R. E y NICKLE, C. A. Three-phase short circuit synchronous machines V. A.I.E.E Quarterly transactions. 1930.

- [11] DOHERTY, R. E. A simplified method of analyzing short-circuit problems. A.I.E.E Quarterly transactions. 1923.
- [12] DOHERTY, R. E y NICKLE, C. A. Synchronous machines IV. A.I.E.E Quarterly transactions. 1928.
- [13] GONZALEZ-LONGANTT, Francisco M. Entendiendo la transformación de park. I.E.E.E. 2004.
- [14] KILGORE, L. A. Calculation of synchronous machine constants reactances and time constants affecting transient characteristics. A.I.E.E Quarterly transactions. 1931.
- [15] KUNDUR, Prabha. Power system stability and control. Mc Graw Hill, Inc. 1994.
- [16] LOUIE, K. W. A study on magnetic saturation effects in a synchronous generator during unbalanced faults. I.E.E.E. 2004.
- [17] MARTÍ , J.R; LOUIE, K.W. A phase-domain synchronous generator including saturation effects. IEEE Transactions on Power Systems, Vol 12 N° 1 Febrero 1997.
- [18] MARTÍNEZ AYALA, DIEGO FERNANDO. Herramienta software para la estimación de parámetros de la máquina sincrónica mediante el método de errores de predicción. Trabajo de grado Ingeniero Electricista. Bucaramanga.: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, 2007. 121 p.
- [19] NICKLE, C. A. y PIERCE, C.A. Stability of synchronous machines effect of armature circuit resistance. A.I.E.E Quarterly transactions. 1929.

- [20] Osorio Niño, Omar Fernando. Estudio teórico de las fallas de cortocircuito cercanas al neutro del bobinado del estator de un generador sincrónico. Trabajo de grado Ingeniero Electricista. Bucaramanga.: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, 2009. 101 p.
- [21] PARK, R.H. Two-reaction theory of synchronous machines generalized method of analysis part I. A.I.E.E Quarterly transactions. 1929.
- [22] PARK, R.H. Two-reaction theory of synchronous machines part II. A.I.E.E Quarterly transactions. 1933.
- [23] Villamizar Montes, Libardo. R.H. Prototipo de herramienta software para la estimación de parámetros de la máquina síncrona bajo condiciones de carga. Trabajo de grado para la obtención del Máster en Ingeniería. Bucaramanga.: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, 2008. 206 p.

## ANEXO A : DESCRIPCIÓN MATEMÁTICA DE LA MÁQUINA SÍNCRONA EN EL SISTEMA DE FASES

Las ecuaciones que describen el comportamiento de la máquina en el modelo de fases son:

$$e_a = -I_a * R_a - \frac{d\varphi_a}{dt}$$

$$e_b = -I_b * R_a - \frac{d\varphi_b}{dt}$$

$$e_c = -I_c * R_a - \frac{d\varphi_c}{dt}$$

En donde:  $\varphi_a = L_{aa} * I_a + L_{ab} * I_b + L_{ac} * I_c + L_{af} * I_f + L_{aD} * I_D + L_{aQ} * I_Q$

Similares expresiones se obtienen para  $\varphi_b$  y  $\varphi_c$ . Las tensiones de los devanados de campo y amortiguadores ubicados en los ejes d y q respectivamente son:

$$e_f = -I_f * R_f - \frac{d\varphi_f}{dt}$$

$$0 = -I_D * R_D - \frac{d\varphi_D}{dt}$$

$$0 = -I_Q * R_Q - \frac{d\varphi_Q}{dt}$$

Organizando las anteriores ecuaciones de forma matricial:

$$[e_{abcfdQ}] = -[I_{abcfdQ}] * [R_{abcfdQ}] - \frac{d[\varphi_{abcfdQ}]}{dt}$$

En donde  $[e_{abcfdQ}] = [e_a \ e_b \ e_c \ e_f \ 0 \ 0]^t$

$$[I_{abcfdQ}] = [I_a \ I_b \ I_c \ I_f \ I_D \ I_Q]^t$$

$$[R_{abcfdQ}] = \text{diag}[R_a R_a R_a R_f R_D R_Q]$$

$$[\varphi_{abcfdQ}] = [L_{abcfdQ}] * [I_{abcfdQ}]$$

$$[L_{abcfdQ}] = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} & L_{af} & L_{aD} & L_{aQ} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} & L_{bf} & L_{bD} & L_{bQ} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} & L_{cf} & L_{cD} & L_{cQ} \\ L_{af} & L_{bf} & L_{cf} & L_{ff} & L_{fD} & 0 \\ L_{aD} & L_{bD} & L_{cD} & L_{fD} & L_{DD} & 0 \\ L_{aQ} & L_{bQ} & L_{cQ} & 0 & 0 & L_{QQ} \end{bmatrix}$$

De donde :

$$L_{aa} = L_{aa0} + L_{aa2} \cos 2\theta$$

$$L_{bb} = L_{aa0} + L_{aa2} \cos 2\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$L_{cc} = L_{aa0} + L_{aa2} \cos 2\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$L_{ab} = L_{ba} = -L_{ab0} - L_{ab2} \cos\left(2\theta + \frac{\pi}{3}\right)$$

$$L_{bc} = L_{cb} = -L_{ab0} - L_{ab2} \cos(2\theta - \pi)$$

$$L_{ca} = L_{ac} = -L_{ab0} - L_{ab2} \cos\left(2\theta - \frac{\pi}{3}\right)$$

Son valores que dependen de la posición del rotor  $\theta$ .

## ANEXO B. TRANSFORMACIONES DE VARIABLES DE TENSIÓN Y CORRIENTE AL SISTEMA DQ0

En la sección 4.3 se ha presentado una de las dos formas más comunes de encontrar y utilizar la transformada de PARK. Allí se utilizaba un factor de  $\sqrt{2/3}$  para que la transformada cumpliera con la ortogonalidad y la invarianza en potencia. A continuación se procede a presentar los resultados que se obtienen al transformar las variables de tensión de fase en variables rotoricas de los ejes dq0, pero aquí se presenta la transformada de PARK multiplicada por un factor de  $2/3$ , que es otra de las formas comunes de utilizar dicha transformada.

$$\begin{bmatrix} e_d \\ e_q \\ e_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} * \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\text{Sen}(\theta) & -\text{Sen}(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\text{Sen}(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_m * \text{Sen}(w_s t) \\ V_m * \text{Sen}(w_s t - \frac{2\pi}{3}) \\ V_m * \text{Sen}(w_s t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

Resolviendo la multiplicación de matrices propuesta, se tiene para la tensión del eje directo la siguiente expresión:

$$e_d = \frac{2}{3} * V_m * [\cos(\theta) * \text{Sen}(w_s t) + \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) * \text{Sen}(w_s t - \frac{2\pi}{3}) + \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) * \text{Sen}(w_s t + \frac{2\pi}{3})]$$

Aplicando las siguientes identidades trigonométricas

$$\begin{aligned} \cos(x \pm y) &= \cos(x) * \cos(y) \mp \text{sen}(x) * \text{sen}(y) \\ \text{sen}(x \pm y) &= \text{sen}(x) * \cos(y) \mp \text{sen}(y) * \cos(x) \end{aligned}$$

Y agrupando los términos se llega a

$$e_d = \frac{2}{3} * V_m * \left[ \frac{3}{2} \text{Cos}(\theta) * \text{Sen}(w_s t) + \frac{\sqrt{3}}{4} \text{Cos}(\theta) * \text{Cos}(w_s t) - \frac{3}{4} \text{Sen}(\theta) * \text{Cos}(w_s t) \right. \\ \left. - \frac{\sqrt{3}}{4} \text{Cos}(\theta) * \text{Cos}(w_s t) - \frac{3}{4} \text{Sen}(\theta) * \text{Cos}(w_s t) \right]$$

$$e_d = \frac{2}{3} * V_m * \left[ \frac{3}{2} \text{Sen}(w_s - \theta) \right]$$

En donde  $\theta = w_r t + \delta$ . Es común que  $w_r = w_s$ . Entonces se llega a la siguiente expresión:

$$e_d = V_m \text{Sen}(\delta)$$

## ANEXO C. SISTEMA POR UNIDAD

- Bases utilizadas en el estator

$S_{base}$  = Potencia aparente trifásica de la máquina, VA.

$e_{sbase}$  = Valor de tensión fase-neutro de la máquina, V.

$f_{base}$  = Frecuencia eléctrica del sistema, Hz.

$i_{sbase}$  = Corriente de línea pico, A.

$$i_{sbase} = \frac{S_{base}}{(3/2)e_{sbase}}$$

$$Z_{sbase} = \frac{e_{sbase}}{i_{sbase}}, \Omega$$

$$\omega_{base} = 2\pi f_{base}, rad. elec/s$$

$$\omega_{mbase} = \omega_{base} \frac{2}{p_f}, rad. mec/s$$

$$L_{sbase} = \frac{Z_{sbase}}{\omega_{base}}, H$$

$$\psi_{sbase} = L_{sbase} i_{sbase}, wb \cdot vuelta$$

- Bases utilizadas en el rotor

$$i_{fdbase} = \frac{L_{ad}}{L_{afd}} i_{sbase}, A$$

$$i_{kdbase} = \frac{L_{ad}}{L_{akd}} i_{sbase}, A$$

$$i_{kqbase} = \frac{L_{aq}}{L_{akq}} i_{sbase}, A$$

$$e_{fdbase} = \frac{S_{base}}{i_{fdbase}}, V$$

$$Z_{fdbase} = \frac{S_{base}}{i_{fdbase}^2}$$

$$Z_{kdbase} = \frac{S_{base}}{i_{kdbase}^2}, \Omega$$

$$Z_{kqbase} = \frac{S_{base}}{i_{kqbase}^2}, \Omega$$

$$L_{fdbase} = \frac{Z_{fdbase}}{\omega_{base}}, H$$

$$L_{kdbase} = \frac{Z_{kdbase}}{\omega_{base}}, H$$

$$L_{kqbase} = \frac{Z_{kqbase}}{\omega_{base}}, H$$

$$t_{base} = \frac{1}{\omega_{base}}, s$$

## ANEXO D. REGLA TRAPEZOIDAL DE INTEGRACIÓN

La regla trapezoidal se basa en el reemplazo de una función complicada por una función aproximada que sea fácil de integrar.

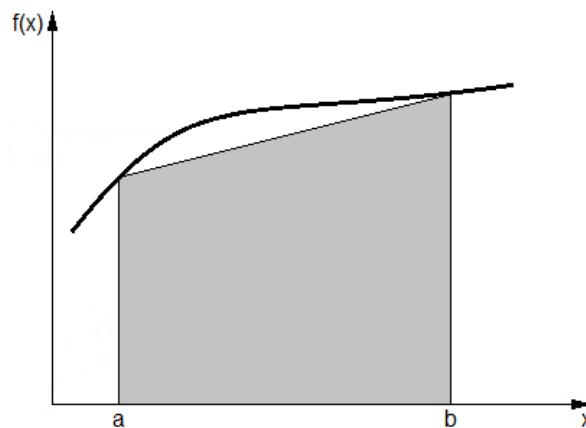
Sea  $f_n(x) = a_0 + a_1x + \dots + a_{n-1}x^{n-1} + a_nx^n$  donde  $n$  es el grado del polinomio.

El polinomio utilizado es de primer orden

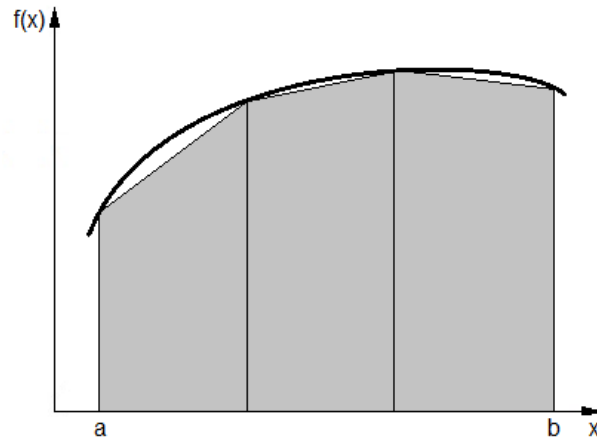
$$G = \int_a^b f_n(x) dx \cong \int_a^b f_1(x) dx$$

En la figura D.1 se presenta la integral de un polinomio, como el área bajo una línea recta.

Figura D.1. Representación gráfica de la integración por medio de la regla trapezoidal.



En la figura D.2 Se presenta la integral de un polinomio, como el área bajo tres líneas rectas.



La función representada como la línea recta es

$$f_1(x) = f(a) + \frac{f(b)-f(a)}{b-a}(x - a)$$

Siendo  $G = \int_a^b f_1(x)dx$  tendremos  $G = \int_a^b \left[ f(a) + \frac{f(b)-f(a)}{b-a} \right] dx$

El resultado de la integración es  $G = (b - a) \frac{f(a)+f(b)}{2}$

Aplicando éste método de integración al siguiente sistema de ecuaciones (4.25)

$$[e] = [L_T] * \frac{\partial[I]}{\partial t} + [L_E] * w_r * [I] + [R] * [I]$$

Despejando la diferencial

$$[L_T] * \frac{\partial[I]}{\partial t} = -[L_E] * w_r * [I] - [R] * [I] + [e]$$

Aquí el término  $(b - a)$  equivale al paso del tiempo. El punto b es el punto actual de iteración y el punto a el anterior.

$$\begin{aligned} \frac{2}{\Delta t} * [L_T] * [I(t) - I(t - \Delta t)] \\ = -[L_E] * w_r * [I(t - \Delta t)] - [R] * [I(t - \Delta t)] + [e(t - \Delta t)] - [L_E] * w_r \\ * [I(t)] - [R] * [I(t)] + [e(t)] \end{aligned}$$

Agrupando los términos semejantes

$$\left[ L_E + R + \frac{2L_T}{\Delta t} \right] * [I(t)] = [e(t)] + [e(t - \Delta t)] - \left[ L_E + R - \frac{2L_T}{\Delta t} \right] * [I(t - \Delta t)]$$

Definiendo

$$A = \left[ L_E + R + \frac{2L_T}{\Delta t} \right]$$

$$B = \left[ L_E + R - \frac{2L_T}{\Delta t} \right]$$

Y despejando el término de la corriente  $[I(t)]$

$$[I(t)] = [A]^{-1} * [ [e(t)] + [e(t - \Delta t)] - [B] * [I(t - \Delta t)] ]$$

## ANEXO E. MANUAL DEL USUARIO

### E.1 INSTALACIÓN

Anexo a este documento se entrega un CD el cual contiene los archivos necesarios para la instalación y ejecución del aplicativo *DQ0*, junto con su respectivo manual de instalación.

El CD contiene una carpeta de nombre *DQ0* en la cual se encuentran dos sub carpetas llamadas *distrib* y *src*. Para iniciar la instalación se procede a ingresar en la carpeta *distrib* y seleccionar el archivo tipo aplicación llamado *DQ0\_pkg.exe*. La ejecución de este archivo permite la instalación de **MATLAB Component Runtime 7.7 (MCR)**, el cual permite tener acceso a las librerías mínimas requeridas para la ejecución del programa final *DQ0*.

Teniendo instaladas las librerías requeridas (MCR) para el buen funcionamiento del programa *DQ0*, se procede a la ejecución del mismo. Para esto se selecciona y ejecuta el archivo tipo aplicación llamado ***DQ0.exe*** con el cual se inicia la ejecución de la interfaz gráfica desarrollada en MATLAB®.

Para más detalles en la instalación se puede ver el manual de instalación que se encuentra en el CD anexo.

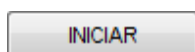
### E.2 EJECUCIÓN

Con la ejecución de *DQ0.exe* se muestra la ventana observada en la figura E1.

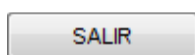
figura E.1 Ventana de inicio



En esta ventana aparecen dos botones de comando.



Abre una ventana con el menú principal.

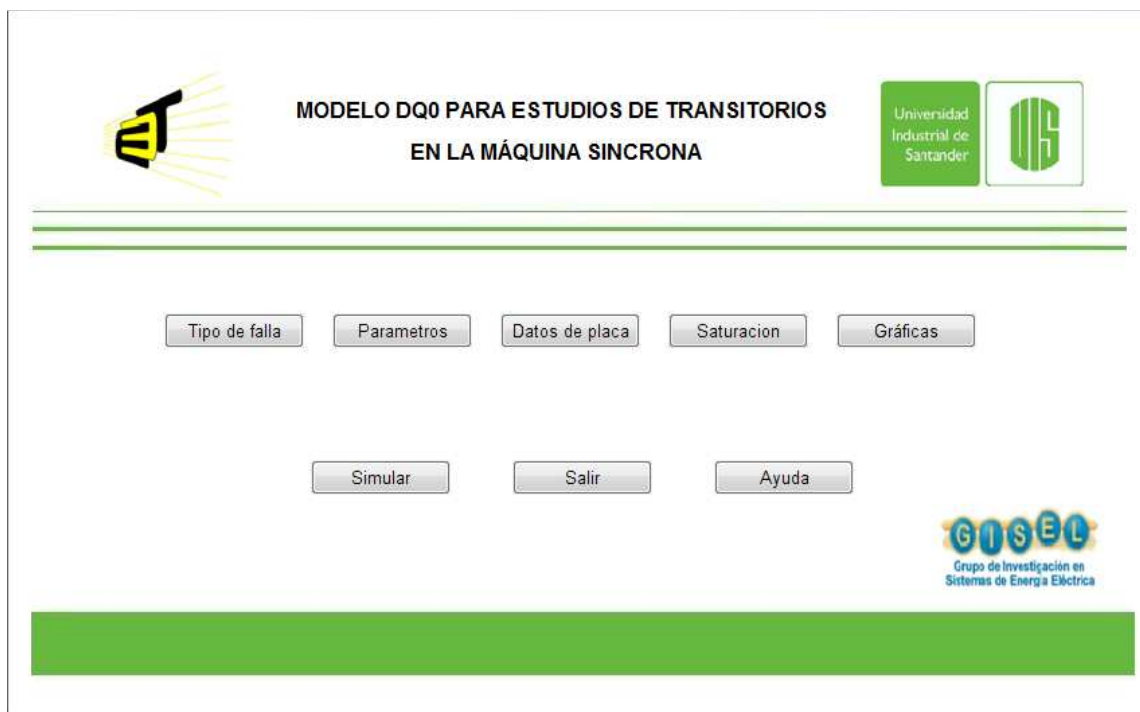


Termina la ejecución del programa.

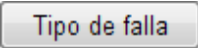
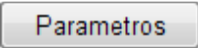
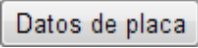
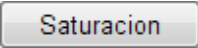
### E.3 MENÚ PRINCIPAL


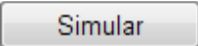

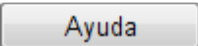
Al seleccionar el botón iniciar de la ventana de inicio mostrada en la figura E1, Se desplegará la ventana del menú principal mostrada en la figura E2.

figura E.2 Menú principal

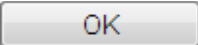


En la ventana de menú principal se muestran ocho botones de comandos, en los cuales se presentan las diferentes opciones para el ingreso de los datos.

	Abre una ventana donde se puede seleccionar el tipo de falla y el tiempo de duración de la misma.
	Abre una ventana para ingresar los parámetros de la máquina.
	Abre una ventana para ingresar los datos de placa de la máquina.
	Abre una ventana para ingresar los datos de saturación.

	Abre una ventana donde se seleccionan las graficas que se desean realizar.
	Inicia la ejecución del programa.
	Cierra el menú principal y devuelve la ventana de inicio.
	Presenta una ayuda extendida al usuario.

En las ventanas correspondientes a tipo de falla, parámetros, datos de placa, saturación y gráficas, la cuales son para ingresos de datos para el funcionamiento del programa, aparece un botón ok.

	Guarda los datos registrados y a su vez cierra la ventana regresando a la ventana del menú principal.
---	---

#### **E.4 TIPO DE FALLA**

Al seleccionar el botón tipo de falla se abre la ventana mostrada en la figura E3.

La ventana correspondiente al tipo de falla se divide en zona A y zona B.

##### **E.4.1 Zona A**

En esta zona se selecciona el tipo de falla que se quiere realizar, ya sea monofásica, bifásica o trifásica.

##### **E.4.2 Zona B**

Esta zona está dedicada al tiempo de duración de la falla. Aquí se indica el tiempo en el cual inicia la falla y el tiempo de finalización de la misma.

figura E.3 Ventana tipo de falla

MODELO DQ0 PARA ESTUDIOS DE TRANSITORIOS  
EN LA MÁQUINA SINCRONA

Universidad Industrial de Santander

**Zona A**

Tipo de falla

- Monofásica
- Bifásica
- Trifásica

**Zona B**

Tinicio 0.05

Tfinal 0.3

OK

GISEL  
Grupo de Investigación en  
Sistemas de Energía Eléctrica

## E.5 PARÁMETROS

Al hacer click en parámetros se abre la ventana mostrada en la figura E.4.

En esta ventana se ingresan los datos correspondientes a los parámetros como resistencias, inductancias y constantes de tiempo.

figura E.4 Ventana de parámetros

MODELO DQ0 PARA ESTUDIOS DE TRANSITORIOS  
EN LA MÁQUINA SINCRONA

Universidad Industrial de Santander

Ld	1.7	Lq	1.64	L0	1.4	Td0'	6.19487	Tq0'	0.0
Ld'	0.238324	Lq'	1.64	Li	0.15	Td0''	0.028716	Tq0''	0.07496
Ld''	0.18469	Lq''	0.185151	Ra	0.001096				

OK

GISEL  
Grupo de Investigación en  
Sistemas de Energía Eléctrica

## E.6 DATOS DE PLACA

Al seleccionar la opción datos de placa se despliega la ventana mostrada en la figura E.5. Esta ventana está dedicada al ingreso de los datos indicados en la placa y el estado de operación de la máquina en estudio.

Estos datos son tensión de operación, potencia activa y reactiva. Los datos se registran en por unidad.

La potencia y tensión nominal de la máquina se ingresan en MVA y V respectivamente.

figura E.5 Ventana datos de placa.

MODELO DQ0 PARA ESTUDIOS DE TRANSITORIOS  
EN LA MÁQUINA SINCRONA

Universidad Industrial de Santander

**Datos de operación**

P [p.u.]  Q [p.u.]  E [p.u.]

**Datos de Placa**

S [MVA]  V [V]

OK

GISEL  
Grupo de Investigación en  
Sistemas de Energía Eléctrica

## E.7 SATURACIÓN

La ventana de saturación es la indicada en la figura E.6.

La ventana correspondiente a saturación se divide en zona A y zona B.

### E.7.1 Zona A

En esta zona se pregunta al usuario si desea calcular la saturación. Para ello deberá elegir una opción dependiendo de sus necesidades.

### E.7.2 Zona B

Se registran los datos requeridos para incluir la saturación en el proceso. Para ello son necesarios los 5 valores de flujo de la zona II de la curva de saturación.

figura E.6 Ventana saturación

MODELO DQ0 PARA ESTUDIOS DE TRANSITORIOS  
EN LA MÁQUINA SINCRONA

Universidad Industrial de Santander

**Zona A**

¿CALCULAR SATURACION?

SI

NO

**Zona B**

F1	0.8
F2	1.3
F3	2.3
F4	1.2
F5	1.7

OK

GISEL  
Grupo de Investigación en  
Sistemas de Energía Eléctrica

## E.8 GRÁFICAS

Al seleccionar el botón gráficas se abre la ventana mostrada en la figura E7.

En esta venta se seleccionan las graficas que se desean visualizar al terminar la ejecución del programa.

figura E.7 Ventana graficas

