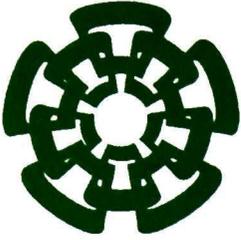


CT-741 SS1
Don. 2013

xx(209446.1)



Centro de Investigación y de Estudios Avanzados
del Instituto Politécnico Nacional
Unidad Guadalajara

Análisis del Motor de Inducción en el Dominio Armónico y en el Tiempo incluyendo Saturación Magnética

**CINVESTAV
IPN
ADQUISICION
LIBROS**

Tesis que presenta:
Pablo Rodríguez Arce

para obtener el grado de:
Maestro en Ciencias

en la especialidad de:
Ingeniería Eléctrica

Director de Tesis
Dr. José Manuel Cañedo Castañeda

CLASIF..	CT 00645
ADQUIS..	CT-741-881
FECHA:	16-07-2013
PROCED.	Doni: 2013
	\$

10: 209116 2001

Análisis del Motor de Inducción en el Dominio Armónico y en el Tiempo incluyendo Saturación Magnética

**Tesis de Maestría en Ciencias
Ingeniería Eléctrica**

Por:

Pablo Rodríguez Arce
Ingeniero en Electrónica

Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente
2005-2010

Becario de Conacyt, expediente no. 243172

Director de Tesis
Dr. José Manuel Cañedo Castañeda

A la memoria de mi abuela, Imelda

A mi padre, Miguel

A mi madre, Maru

A mi hermana, María Inés

Agradecimientos

En primer lugar quisiera agradecer a mis padres por todo su amor y apoyo brindado desde siempre, ya que sin ellos no estaría donde estoy en este momento.

A mi hermana porque siempre está ahí, en las buenas y en las malas, gracias.

A mi abuela por todo su cariño y apoyo, y sabiendo que esté en donde esté siempre me estará cuidando.

Al Dr. José Manuel Cañedo Castañeda, por la paciencia que tuvo, por todas las enseñanzas y apoyo que me brindó para la realización de este trabajo de tesis.

Al Dr. Abner Ramírez, porque sin sus enseñanzas no hubiera podido realizar este trabajo.

Al Dr. Juan Manuel Ramírez, Dr. Pablo Moreno, Dr. Arturo Román Messina y al Dr. Javier Ruiz por su ayuda en mi formación académica.

A mis compañeros, mis amigos, del área de Potencia por su apoyo y las risas que hacían cada día más llevadero.

A CONACYT por otorgarme el apoyo económico con la que pude realizar los estudios de la maestría.

Resumen

En este trabajo de tesis se estudia la influencia de la saturación magnética en el motor de inducción trifásico balanceado. Para este propósito se desarrollan modelos matemáticos que incluyen la saturación magnética. Se utilizan las técnicas en el dominio del tiempo, en el dominio armónico estático y dominio armónico dinámico. En las técnicas del dominio armónico se utilizan las series de Fourier.

Se analiza la operación del motor y los contenidos armónicos de las variables más importantes de motor cuando se incluye la saturación, ante diferentes condiciones de operación. Se comparan los resultados cuando no es incluida la saturación magnética.

Se muestra que en la prueba en vacío hay presencia importante de componentes armónicos que se deben tener presentes en la determinación experimental de los parámetros eléctricos, que no pueden ser observados si no se incluye la saturación magnética.

Se presentan resultados de simulaciones que avalan las conclusiones y recomendaciones principales de este trabajo de investigación.

Abstract

In this thesis has been studied the influence of magnetic saturation by the balanced three phase induction motors. For this purpose, mathematical models that include magnetic saturation have been developed. The time domain, static harmonic domain and the dynamic harmonic domain techniques are used. The harmonic domain techniques are based on the Fourier series.

It analyzed the motor operation and the harmonic content of the most important motor variables when saturation is included under different operation conditions. The results are compared when the magnetic saturation is not included into the model.

It is shown that in the vacuum test has a meaningful presence of harmonic components that must be taken in consideration for experimental determination of electrical parameters that cannot be observed without including magnetic saturation.

The simulation results shown here endorse the main conclusions and recommendations of this research

Índice

Lista de figuras	xi
Lista de Tablas	xvi
Lista de Símbolos	xvii
Capítulo 1	1
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Motivación	1
1.2 Antecedentes	2
1.2.1 Armónicos en el motor de inducción	2
1.2.2 Saturación en el motor de inducción	2
1.3 Objetivos de la tesis	3
1.4 Aportaciones de la tesis	3
1.5 Organización de la tesis	3
Capítulo 2	5
2 DESCRIPCIÓN MATEMÁTICA DE LA TÉCNICA EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA	5
2.1 Transformación del DT a DA	5
2.2 Transformación del DT a DAD	7
Capítulo 3	9
3 MODELADO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN EN EL DOMINIO DEL TIEMPO ...	9
3.1 Modelado del motor de inducción sin saturación magnética	9
3.1.1 Modelo en sistema de referencia ABC	9
3.1.2 Modelo en sistema de referencia DQ	14
3.2 Modelado del motor de inducción incluyendo saturación	16
3.2.1 Modelo incluyendo saturación magnética	16
Capítulo 4	20
4 MODELADO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN EN EL DOMINIO ARMÓNICO ...	20
4.1 Modelado del motor de inducción en el dominio armónico dinámico (DAD)	20
4.1.1 Modelo en el sistema de referencia ABC sin incluir saturación magnética ...	20
4.1.2 Modelo en el sistema de referencia DQ sin incluir saturación magnética	22

4.1.3	Modelo en el sistema de referencia DQ incluyendo saturación magnética....	24
4.2	Modelado del motor de inducción en el dominio armónico estático (DA)	26
4.2.1	Modelo en el sistema de referencia ABC sin incluir saturación magnética ...	26
4.2.2	Modelo en el sistema de referencia DQ sin incluir saturación magnética.....	27
4.2.3	Modelo en el sistema de referencia DQ incluyendo saturación magnética....	27
Capítulo 5	.....	30
5	OPERACIÓN EN VACÍO Y ROTOR BLOQUEADO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN.....	30
5.1	Operación en vacío en el dominio del tiempo	30
5.1.1	Operación en vacío cuando se desprecia la saturación magnética	31
5.1.2	Operación en vacío cuando se incluye la saturación magnética.....	32
5.2	Operación a rotor bloqueado en dominio del tiempo.....	32
5.2.1	Operación a rotor bloqueado cuando se desprecia la saturación magnética... 33	
5.2.2	Operación a rotor bloqueado considerando saturación.....	33
5.3	Operación en vacío y rotor bloqueado en el dominio armónico	34
5.3.1	Operación en vacío cuando se desprecia la saturación magnética	34
5.3.2	Operación a rotor bloqueado cuando se desprecia la saturación magnética... 35	
5.3.3	Operación en vacío considerando saturación	36
5.3.4	Operación a rotor bloqueado considerando saturación.....	38
Capítulo 6	.....	39
6	RESULTADOS	39
6.1	Voltajes de entrada.....	40
6.2	Operación en vacío	43
6.2.1	Caso cuando se desprecia la saturación magnética	43
6.2.2	Resultados incluyendo saturación magnética	46
6.2.3	Contenido armónico entre el caso de magnetización sin saturación y con saturación magnética	51
6.3	Operación a rotor bloqueado a voltaje nominal.....	56
6.3.1	Caso cuando se desprecia la saturación magnética	56
6.3.2	Resultados incluyendo saturación magnética.....	59
6.3.3	Contenido armónico entre el caso sin saturación y con saturación magnética	

6.4	Operación a rotor bloqueado a corriente nominal.....	68
6.4.1	Caso cuando se desprecia la saturación magnética	68
6.4.2	Resultados incluyendo saturación magnética.....	71
6.4.3	Contenido armónico entre el caso de magnetización lineal y con saturación magnética.....	76
6.5	Operación del motor de inducción sin carga	81
6.5.1	Caso cuando se desprecia la saturación magnética	81
6.5.2	Resultados incluyendo saturación magnética.....	86
6.5.3	Comparación del contenido armónico entre el caso de magnetización lineal y con saturación magnética.....	94
6.6	Operación del motor de inducción con carga nominal	98
6.6.1	Caso cuando se desprecia la saturación magnética	98
6.6.2	Resultados incluyendo saturación magnética.....	104
6.6.3	Comparación del contenido armónico entre el caso de magnetización lineal y con saturación magnética.....	112
Capítulo 7	.....	117
7	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	117
7.1	Conclusiones.....	117
7.2	Trabajos Futuros	118
APÉNDICE	.....	119
A.	Aproximación de la curva de saturación.....	119
B.	Parámetros del motor de inducción.....	122
REFERENCIAS	.....	123

Lista de figuras

Figura 3.1. Diagrama del motor de inducción trifásico en ABC.....	10
Figura 3.2 Circuito equivalente en el eje q.....	16
Figura 3.3 Circuito equivalente en el eje d.....	16
Figura 6.1 Voltajes de estator en coordenadas ABC.....	41
Figura 6.2 Contenido armónico de los voltajes de estator de entrada en ABC.....	41
Figura 6.3 Voltajes en el estator en referencia qd.....	42
Figura 6.4 Contenido armónico de los voltajes de estator en referencia qd.....	42
Figura 6.5 Corrientes del estator NS, operación en vacío.....	43
Figura 6.6 Corrientes en rotor NS, operación en vacío.....	43
Figura 6.7 Flujos de estator NS, operación en vacío.....	44
Figura 6.8 Flujos de rotor NS, operación en vacío.....	44
Figura 6.9 Par electromagnético para NS, operación en vacío.....	45
Figura 6.10 Diferencia entre el DT y DA NS, operación en vacío.....	45
Figura 6.11 Corrientes de estator CS, operación en vacío.....	46
Figura 6.12 Corrientes de rotor CS, operación en vacío.....	46
Figura 6.13 Corrientes de estator, rotor y magnetización CS, operación en vacío.....	47
Figura 6.14 Enlaces de flujo del estator CS, operación en vacío.....	47
Figura 6.15 Enlaces de flujo de rotor CS, operación en vacío.....	48
Figura 6.16 Corriente de magnetización CS, operación en vacío.....	48
Figura 6.17 Enlace de flujo de magnetización CS, operación en vacío.....	49
Figura 6.18 Curva de magnetización, operación en vacío.....	49
Figura 6.19 Par electromagnético CS, operación en vacío.....	50
Figura 6.20 Diferencias entre el DT y DA CS, operación en vacío.....	50
Figura 6.21 Comparación del contenido armónico de las corrientes de estator cuando se incluye y se desprecia la saturación, operación en vacío.....	52
Figura 6.22 Comparación del contenido armónico de las corrientes de rotor cuando se incluye y se desprecia la saturación, operación en vacío.....	52
Figura 6.23 Contenido armónico de la corriente de magnetización para el caso con saturación.....	53
Figura 6.24 Comparación del contenido armónico de los flujos de estator cuando se incluye y no se incluye la saturación, operación en vacío.....	53
Figura 6.25 Comparación del contenido armónico de los flujos de rotor cuando se incluye y se desprecia la saturación, operación en vacío.....	54
Figura 6.26 Contenido armónico del enlace de flujo de magnetización par el caso con saturación.....	54
Figura 6.27 Comparación del contenido armónico en el par electromagnético cuando se incluye y se desprecia la saturación, operación en vacío.....	55

Figura 6.28. Corrientes de estator NS del motor de inducción, rotor bloqueado a voltaje nominal	56
Figura 6.29 Corrientes de rotor NS, rotor bloqueado a voltaje nominal	56
Figura 6.30 Enlaces de flujo del estator NS, rotor bloqueado a voltaje nominal	57
Figura 6.31 Enlaces de flujo del rotor NS, rotor bloqueado a voltaje nominal	57
Figura 6.32 Par electromagnético NS, rotor bloqueado a voltaje nominal	58
Figura 6.33 Diferencias entre el DT y DA NS, rotor bloqueado a voltaje nominal	58
Figura 6.34 Corrientes del estator CS, rotor boqueado a voltaje nominal.....	59
Figura 6.35 Corrientes de rotor CS, rotor bloqueado a voltaje nominal	59
Figura 6.36 Flujos de estator CS, rotor bloqueado a voltaje nominal	60
Figura 6.37 Enlaces de flujos de rotor CS, rotor bloqueado a voltaje nominal.....	60
Figura 6.38 Corriente de magnetización CS, a rotor bloqueado a voltaje nominal.....	61
Figura 6.39 Enlace de flujo de magnetización CS, rotor bloqueado a voltaje nominal	61
Figura 6.40 Curva de magnetización en operación a rotor bloqueado a voltaje nominal	62
Figura 6.41 Par electromagnético CS, rotor bloqueado a voltaje nominal	62
Figura 6.42 Diferencias entre el DT y DA CS, rotor bloqueado a voltaje nominal	63
Figura 6.43 Comparación del contenido armónico de las corrientes de estator cuando se incluye y se desprecia la saturación del motor de inducción a rotor bloqueado	64
Figura 6.44 Contenido armónico de las corrientes de rotor cuando se incluye y se desprecia la saturación del motor de inducción a rotor bloqueado.....	64
Figura 6.45 Comparación del contenido armónico de los enlaces de flujo del estator cuando se incluye y se desprecia la saturación del motor de inducción a rotor bloqueado	65
Figura 6.46 Comparación contenido armónico de los enlaces de flujo del rotor cuando se incluye y se desprecia la saturación del motor de inducción a rotor bloqueado	65
Figura 6.47 Contenido armónico de la corriente de magnetización en operación a rotor bloqueado a voltaje nominal.....	66
Figura 6.48 Contenido armónico del enlace de flujo de magnetización en operación a rotor bloqueado a voltaje nominal.....	66
Figura 6.49 Comparación del contenido armónico del par electromagnético cuando se incluye y se desprecia la saturación del motor de inducción a rotor bloqueado	67
Figura 6.50 Corrientes de estator NS, rotor bloqueado con corriente nominal	68
Figura 6.51 Corrientes de rotor NS, operación a rotor bloqueado a corriente nominal	69
Figura 6.52 Enlaces de flujo de estator NS, rotor bloqueado a corriente nominal	69
Figura 6.53 Enlaces de flujo de rotor NS, rotor bloqueado a corriente nominal.....	70
Figura 6.54 Par electromagnético NS, rotor bloqueado a corriente nominal	70
Figura 6.55 Diferencias entre el DT y DA CS, rotor bloqueado con corriente nominal	71
Figura 6.56 Corrientes de estator CS, rotor bloqueado a corriente nominal	71
Figura 6.57 Corrientes del rotor CS, rotor bloqueado a corriente nominal	72
Figura 6.58 Enlaces de flujo de estator CS, rotor bloqueado a corriente nominal	72
Figura 6.59 Enlaces de flujo de rotor CS, rotor bloqueado a corriente nominal	73
Figura 6.60 Corriente de magnetización CS, rotor bloqueado a corriente nominal	73

Figura 6.61 Enlace de flujo de magnetización CS, rotor bloqueado a corriente nominal	74
Figura 6.62 Curva de magnetización a rotor bloqueado a corriente nominal.....	74
Figura 6.63 Par electromagnético CS, rotor bloqueado a corriente nominal	75
Figura 6.64 Diferencias entre el DT y DA CS, rotor bloqueado con corriente nominal	75
Figura 6.65 Comparación del contenido armónico de las corrientes de estator cuando se incluye y se desprecia la saturación, rotor bloqueado a corriente nominal	77
Figura 6.66 Comparación del contenido armónico de las corrientes de rotor cuando se incluye y se desprecia la saturación, rotor bloqueado a corriente nominal	77
Figura 6.67 Comparación del contenido armónico de los enlaces de flujo de estator cuando se incluye y se desprecia la saturación, rotor bloqueado a corriente nominal	78
Figura 6.68 Comparación del contenido armónico de los enlaces de flujo de rotor cuando se incluye y se desprecia la saturación, rotor bloqueado a corriente nominal	78
Figura 6.69 Contenido armónico de la corriente de magnetización CS a rotor bloqueado a corriente nominal	79
Figura 6.70 Contenido armónico del enlace de flujo de magnetización a rotor bloqueado a corriente nominal	79
Figura 6.71 Comparación del contenido armónico del par electromagnético cuando se incluye y se desprecia la saturación, rotor bloqueado a corriente nominal	80
Figura 6.72 Velocidad del rotor del motor de inducción sin carga	81
Figura 6.73 Par electromagnético NS del motor de inducción sin carga	82
Figura 6.74 Corrientes de estator NS del motor de inducción sin carga	82
Figura 6.75 Corrientes del rotor NS del motor de inducción sin carga	83
Figura 6.76 Corrientes de estator NS del motor de inducción sin carga	83
Figura 6.77 Corrientes de rotor NS del motor de inducción sin carga	84
Figura 6.78 Flujos de estator NS del motor de inducción sin carga	84
Figura 6.79 Flujos de rotor NS del motor de inducción sin carga	85
Figura 6.80 Par electromagnético NS del motor de inducción sin carga	85
Figura 6.81 Diferencias entre el DT y DA NS del motor de inducción sin carga	86
Figura 6.82 Velocidad del rotor incluyendo saturación, operación sin carga	86
Figura 6.83 Comparación de la velocidad del rotor para el caso de magnetización lineal y con saturación del motor de inducción sin carga.....	87
Figura 6.84 Par electromagnético CS del motor de inducción sin carga.....	87
Figura 6.85 Corriente de estator del motor de inducción CS sin carga	88
Figura 6.86 Corriente de rotor del motor de inducción CS sin carga	88
Figura 6.87 Corrientes de estator CS del motor de inducción sin carga	89
Figura 6.88 Corrientes del rotor CS del motor de inducción sin carga	89
Figura 6.89 Flujos de estator para el CS del motor de inducción sin carga	90
Figura 6.90 Flujos de rotor CS del motor de inducción sin carga	90
Figura 6.91 Corriente de magnetización del motor de inducción sin carga	91
Figura 6.92 Enlace de flujo de magnetización del motor de inducción sin carga	91
Figura 6.93 Curva de magnetización del modelo en DQ sin carga	92

Figura 6.94 Par electromagnético CS del motor de inducción sin carga.....	92
Figura 6.95 Diferencias entre el DT y DA NS del motor de inducción sin carga.....	93
Figura 6.96 Comparación del contenido armónico de las corrientes de estator cuando se incluye y se desprecia la saturación del motor de inducción sin carga	94
Figura 6.97 Comparación del contenido armónico de las corrientes de rotor cuando se incluye y se desprecia la saturación del motor de inducción sin carga	95
Figura 6.98 Comparación del contenido armónico de los enlaces de flujo de estator cuando se incluye y se desprecia la saturación del motor de inducción sin carga.....	95
Figura 6.99 Comparación del contenido armónico de los enlaces de flujo del rotor cuando se incluye y se desprecia la saturación del motor de inducción sin carga.....	96
Figura 6.100 Contenido armónico de la corriente de magnetización del motor de inducción sin carga.....	96
Figura 6.101 Contenido armónico del enlace de flujo de magnetización del motor de inducción sin carga.....	97
Figura 6.102 Comparación del contenido armónico del par electromagnético cuando se incluye y se desprecia la saturación del motor de inducción sin carga	97
Figura 6.103 Velocidad del rotor del motor de inducción con carga.....	99
Figura 6.104 Comparación de las velocidades del rotor con y sin carga.....	99
Figura 6.105 Par electromagnético NS del motor de inducción con carga.....	100
Figura 6.106 Corrientes del estator NS del motor de inducción con carga.....	101
Figura 6.107 Corrientes del rotor NS del motor de inducción con carga.....	101
Figura 6.108 Corrientes de estator para NS del motor de inducción con carga.....	102
Figura 6.109 Corrientes de rotor NS del motor de inducción con carga.....	102
Figura 6.110 Flujos de estator NS del motor de inducción con carga.....	103
Figura 6.111 Flujos de rotor NS del motor de inducción con carga.....	103
Figura 6.112 Par electromagnético del caso de magnetización lineal del motor de inducción sin carga.....	104
Figura 6.113 Diferencias entre el DT y DA NS del motor de inducción con carga.....	104
Figura 6.114 Velocidad del rotor del motor de inducción con carga.....	105
Figura 6.115 Par electromagnético CS del motor de inducción con carga.....	105
Figura 6.116 Corrientes del estator CS del motor de inducción con carga.....	106
Figura 6.117 Corrientes del rotor CS del motor de inducción con carga.....	106
Figura 6.118 Corrientes de estator CS del motor de inducción con carga.....	107
Figura 6.119 Corrientes del rotor CS del motor de inducción con carga.....	107
Figura 6.120 Flujos de estator CS del motor de inducción con carga.....	108
Figura 6.121 Flujos de rotor CS del motor de inducción con carga.....	108
Figura 6.122 Corriente de magnetización CS del motor de inducción con carga	109
Figura 6.123 Enlace de flujo de magnetización del motor de inducción con carga.....	109
Figura 6.124 Curva de saturación del modelado en DQ con carga.....	110
Figura 6.125 Par electromagnético CS del motor de inducción con carga.....	110
Figura 6.126 Diferencias entre el DT y DA CS del motor de inducción con carga.....	111

Figura 6.127 Comparación del contenido armónico de las corrientes de estator cuando se incluye y se desprecia la saturación del motor de inducción con carga	112
Figura 6.128 Comparación del contenido armónico de las corrientes de rotor cuando se incluye y se desprecia la saturación del motor de inducción con carga	113
Figura 6.129 Comparación del contenido armónico de los flujos de estator cuando se incluye y se desprecia la saturación del motor de inducción con carga	113
Figura 6.130 Comparación del contenido armónico de los flujos de rotor cuando se incluye y se desprecia la saturación del motor de inducción con carga	114
Figura 6.131 Contenido armónico de la corriente de magnetización del motor de inducción con carga.....	114
Figura 6.132 Contenido armónico del flujo de magnetización del motor de inducción con carga.....	115
Figura 6.133 Comparación del contenido armónico del par electromagnético cuando se incluye y se desprecia la saturación del motor de inducción con carga	115
Figura A.1 Curva de magnetización	119
Figura A.2 Curva de aproximación del polinomio de saturación.....	121

Lista de Tablas

Tabla 6.1. Diferencia entre las señales del DT y DA para el caso NS, operación en vacío .	45
Tabla 6.2. Diferencia entre las señales del DT y DA para el caso CS, operación en vacío .	50
Tabla 6.3. Comparación de los valores máximos, mínimos y medios de las variables para el caso SS y CS.....	51
Tabla 6.4. Componentes armónicas para el caso sin saturación y con saturación	55
Tabla 6.5. Diferencia entre las señales del DT y DA para el caso NS, rotor bloqueado a voltaje nominal	58
Tabla 6.6. Diferencia entre las señales del DT y DA para el caso NS, rotor bloqueado a voltaje nominal	62
Tabla 6.7. Valores máximos, mínimos y medios de las variables para el caso NS y CS	63
Tabla 6.8. Componentes armónicas para el caso no saturado y saturado.....	67
Tabla 6.9 Diferencias entre las señales del DT y DA para el caso NS, rotor bloqueado con corriente nominal	70
Tabla 6.10. Diferencias entre las señales del DT y DA para el caso CS, rotor bloqueado con corriente nominal	75
Tabla 6.11. Comparación de los valores máximos, mínimos y medios de las variables para el caso NS y CS	76
Tabla 6.12. Componentes armónicas para el caso con saturación y sin saturación	80
Tabla 6.13. Diferencias entre las señales del DT y DA para el caso NS del motor de inducción sin carga	85
Tabla 6.14. Diferencias entre las señales del DT y DA para el caso NS del motor de inducción sin carga	93
Tabla 6.15. Comparación de los valores máximos, mínimos y medios de las variables para el caso NS y CS	93
Tabla 6.16. Componentes armónicas para el caso lineal y con saturación.....	98
Tabla 6.17. Diferencias entre las señales del DT y DA para el caso NS del motor de inducción con carga	104
Tabla 6.18. Diferencias entre las señales del DT y DA para el caso CS del motor de inducción con carga	110
Tabla 6.19. Comparación de los valores máximos, mínimos y medios de las variables para el caso NS y CS	111
Tabla 6.20. Componentes armónicas para el caso lineal y con saturación.....	116
Tabla A.1. Coeficientes del polinomio de aproximación	120

Lista de Símbolos

p	Derivada con respecto al tiempo
a_1, a_3, a_5	Coefficientes del polinomio de magnetización
x, y	Variables de estado
u	Entrada del sistema
a_p, b_p, c_p, d_p	Coefficientes periódicos en el tiempo
$\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{U}$	Vectores armónicos
\mathbf{S}	Matriz de diferenciación
$\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}, \mathbf{D}$	Matrices tipo Toeplitz
V_m	Voltaje pico
$\mathbf{v}_{abc}, \mathbf{v}_{abcr}$	Voltajes en ABC de estator y rotor
$\mathbf{i}_{abc}, \mathbf{i}_{abcr}$	Corrientes en ABC de estator y rotor
$\lambda_{abc}, \lambda_{abcr}$	Enlaces de flujo en ABC de estator y rotor
\mathbf{R}_{abc}	Matriz de resistencias de estator y rotor
r_s, r_r	Resistencias de estator y rotor
$\mathbf{L}_s, \mathbf{L}_r$	Matriz de inductancias propias del estator y rotor
\mathbf{L}_{sr}	Matriz de inductancias mutuas del estator y rotor
L_{ls}, L_{lr}	Inductancias de dispersión de estator y rotor
L_m	Inductancia de magnetización
θ_r	Desplazamiento del rotor
ω_r	Velocidad del rotor
N_p	Número de polos
J	Inercia del motor
T_e	Par mecánico
T_L	Par electromagnético
ω	Sistema de referencia
ω_e	Velocidad síncrona
ω_s	Frecuencia fundamental del sistema
$\mathbf{v}_{qds}, \mathbf{v}_{qdr}$	Voltajes en referencia qd de estator y rotor
$\mathbf{i}_{qds}, \mathbf{i}_{qdr}$	Corrientes en referencia qd de estator y rotor
$\lambda_{qds}, \lambda_{qdr}$	Enlaces de flujo en referencia qd de estator y rotor

\mathbf{R}_{qd}	Matriz de resistencias modificada en referencia qd
\mathbf{L}_{qd}	Matriz de inductancias en referencia qd
λ_m, i_m	Enlace de flujo y corriente de magnetización
$\lambda_{mq}, \lambda_{md}$	Enlace de flujo de magnetización en el eje q y d
i_{mq}, i_{md}	Corriente de magnetización en el eje q y d
$L_{mq}(i_{mq}),$ $L_{md}(i_{md})$	Inductancia dependiente de la corriente de magnetización en el eje q y d
$g_{mq}(i_{mq}),$ $g_{md}(i_{md})$	Derivada de la inductancia de magnetización en el eje q y d
$\mathbf{R}_{qd}(i_{mqd})$	Matriz de resistencias modificada en referencia qd dependiente de la corriente de magnetización
$\mathbf{L}_{qd}(i_{mqd})$	Matriz de inductancias dependiente de la corriente de magnetización en referencia qd
h	Número de armónicos
H	Tamaño de matrices y vectores armónicos
\mathbf{I}_{abc_h}	Vector de corrientes ABC en el dominio armónico
\mathbf{V}_{abc_h}	Vector de voltajes ABC en el dominio armónico
\mathbf{R}_{abc_h}	Matriz de resistencias modificada ABC en el dominio armónico
$\mathbf{r}_{s_h}, \mathbf{r}_{r_h}$	Matriz diagonal de resistencias de estator y rotor en dominio armónico
\mathbf{L}_{abc_h}	Matriz de inductancias en el dominio armónico
$\mathbf{L}_{s_h}, \mathbf{L}_{r_h}$	Matriz de inductancias propias en el dominio armónico
\mathbf{L}_{sr_h}	Matriz de inductancias mutuas en el dominio armónico
\mathbf{L}_{m_h}	Matriz de inductancias de magnetización en el dominio armónico
\mathbf{T}_e	Vector con el contenido armónico del par electromagnético
\mathbf{T}_L	Vector con el contenido armónico del par mecánico
Ω_{r_h}	Velocidad del rotor en el dominio armónico
$\mathbf{I}_{as_h}, \mathbf{I}_{bs_h},$ \mathbf{I}_{cs_h}	Vectores con el contenido armónico de las corrientes de estator y rotor ABC
\mathbf{O}	Matriz de ceros
\mathbf{I}_{qd_h}	Vector con el contenido armónico de las corrientes de estator y rotor qd
\mathbf{V}_{qd_h}	Vector con el contenido armónico de los voltajes de estator y rotor qd

L_{qd_h}	Matriz con el contenido armónico de las inductancias propias y mutuas
R_{qd_h}	Matriz con el contenido armónico de las resistencias modificada qd
$L_{mq}(\mathbf{i}_{qd_h})_h$	Matriz Toeplitz de inductancia dependiente de corriente de magnetización
$L_{md}(\mathbf{i}_{qd_h})_h$	
$\mathbf{g}_{mq}(\mathbf{i}_{qd_h})_h$	Matriz Toeplitz de la derivada de la inductancia de magnetización
$\mathbf{g}_{md}(\mathbf{i}_{qd_h})_h$	
$R_{qd}(\mathbf{i}_{qd_h})_h$	Matriz con el contenido armónico de las resistencias modificada qd dependiente de la corriente de magnetización
$L_{qd}(\mathbf{i}_{qd_h})$	Matriz con el contenido armónico de inductancias dependiente de la corriente de magnetización
Ψ_{qs_h}, Ψ_{ds_h}	Matriz tipo Toeplitz de los flujos de estator en q y d
$\mathbf{I}_{qs_h}, \mathbf{I}_{ds_h}$	Vector con el contenido armónico de las corrientes de estator en q y d
$\mathbf{I}_s, \mathbf{I}_r$	Vector con el contenido armónico de las corrientes de estator y rotor
\mathbf{I}_m	Vector con el contenido armónico de la corriente de magnetización
\mathbf{I}_{mTp}	Matriz tipo Toeplitz de la corriente de magnetización
Ψ_m	Vector con el contenido armónico del flujo de magnetización
\mathbf{w}_h	Matriz tipo Toeplitz de la velocidad del rotor

Capítulo 1

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

El término de armónico se define como una componente sinusoidal de una onda periódica, la cual tiene una frecuencia igual a un múltiplo entero de la frecuencia fundamental del sistema [1].

El efecto de los armónicos en las señales de voltajes y de corrientes en una máquina eléctrica rotatoria (asíncrona o síncrona) se refleja en mayores pérdidas en el cobre y en el hierro que provocan aumentos en la temperatura y en vibraciones mecánicas. Esto trae como consecuencia disminución en la eficiencia de las máquinas y en la vida media de las mismas. Puede también afectar las comunicaciones y el ruido auditivo generado por las componentes armónicas. Es sabido que las componentes armónicas no producen trabajo útil (transformación de la energía eléctrica-mecánica o viceversa) [2].

Los armónicos también pueden producir un flujo equivalente en el entrehierro, que puede causar que el motor no arranque de manera suave o que el deslizamiento sea mayor en las máquinas asíncronas [3].

Los armónicos generan oscilaciones mecánicas en un sistema motor-carga. Estas oscilaciones son causadas por oscilaciones en el par, debidas a la interacción de los armónicos de las corrientes y de los enlaces de flujo [4]. Si la frecuencia de resonancia mecánica es cercana a una de las componentes armónicas de la señal eléctrica de alimentación del motor de inducción, se pueden generar fuerzas mecánicas que someten a fuerzas cortantes el eje del motor.

La saturación magnética, casi siempre presente en la operación normal de las máquinas eléctricas, pueden generar componentes armónicos en las corrientes y en los enlaces de flujo, que modifican los parámetros eléctricos, de manera importante en el valor de la reactancia de magnetización, que influyen en la operación del motor de inducción [5]. Recientemente se ha observado que la saturación en el entrehierro puede introducir efectos de acoplamiento, que no pueden ser predichos en los modelos que no consideran la saturación (magnetización lineal), esto quiere decir que la corriente en un devanado puede afectar al flujo de otro devanado no considerado en los modelos lineales [6].

En este trabajo se desarrollan modelos de un motor asíncrono de jaula de ardilla en donde se incluyen los efectos de la saturación magnética. Los modelos se representan en el dominio del tiempo y en el dominio armónico. En el dominio armónico se utilizan: la técnica en estado estable conocida como armónico estático DA y el dinámico conocido como armónico dinámico DAD.

1.2 Antecedentes

El motor de inducción es una máquina asíncrona. Los devanados de estator son excitados con corriente alterna, de manera similar a las máquinas síncronas. En las máquinas síncronas los devanados del rotor son excitados con fuentes de frecuencia cero, mediante devanados de excitación de CD, imanes permanentes o excitación de valor cero en las máquinas de reluctancia. Mientras que en la máquina asíncrona las corrientes de rotor son alimentadas por corriente alterna, por inducción en la máquina de jaula de ardilla o por fuentes de CA, en los devanados del rotor mediante escobillas en las máquina de rotor devanado. El motor de inducción es el motor más utilizado en la industria debido a su robustez, bajo mantenimiento y precio bajo. [7]

1.2.1 Armónicos en el motor de inducción

En [8] el autor presenta un modelo de la máquina de inducción saturada incluyendo el efecto de la tercera armónica. Este modelo se deriva de un modelo convencional de parámetros constantes de la máquina de corriente alterna, el cual se modifica para incluir los efectos de saturación en el estator y rotor. El modelo modificado puede ser usado para predecir el comportamiento de la máquina ante grandes variaciones de las señales de entrada. El modelo resultante contiene inductancias variantes con el tiempo que a su vez son funciones del nivel de saturación.

Brauer [9] realiza un análisis bidimensional de Fourier para mostrar que los armónicos por la saturación de diferentes frecuencias, órdenes y velocidades pueden estar presentes en un motor de inducción monofásico. Las señales, debido a la saturación, pueden contener armónicos que incluyan frecuencias tres o hasta cinco veces la frecuencia fundamental y de orden igual al número de polos, lo cual produce una corriente no sinusoidal. En esta tesis se incluyen todas las componentes armónicas que pueden influir de manera significativa en el comportamiento del motor de inducción cuando se incluye la saturación magnética.

En [10] se presenta un modelo armónico en estado estable del motor de inducción, que es utilizado para el estudio de los armónicos en el motor. El circuito de lazo cerrado depende de la velocidad del rotor así como de la frecuencia de excitación. Este modelo considera las variables en el plano complejo, que produce una dependencia de las resistencias y las inductancias con la frecuencia.

1.2.2 Saturación en el motor de inducción

En [11] el autor hace una representación de la curva de saturación, donde aproxima la curva mediante una relación no lineal de la reactancia de magnetización y la corriente de magnetización. La curva de magnetización se modifica haciendo pruebas experimentales. Estas pruebas consisten en alimentar el motor de inducción con diferentes magnitudes de voltaje, así obtiene la corriente y forma nuevamente la curva de saturación. Al final, el autor representa la inductancia de magnetización mediante un polinomio de tercer grado.

Yi-Kang He y T. A. Lipo [12] proponen una orientación de los ejes d - q , donde se alinea el voltaje de entrada con el eje q , para así incorporar los efectos de la saturación en la inductancia mutua. De esta forma la corriente y los flujos de magnetización tienen componentes en los ejes q y d .

Lucian y Lupsa [13] evitan aproximar la curva de saturación con funciones trascendentales como son: funciones logarítmicas, trigonométricas o hiperbólicas, ya que éstas son implementadas mediante sumatorias o multiplicaciones que requieren demasiado tiempo computacional para el cálculo. Proponen el modelo de Fröhlich, donde aproximan la curva mediante la permeabilidad relativa (μ_i), permeabilidad (μ_0) y la densidad de flujo saturado (B_{sat}).

En [14] se explica la existencia de dos tipos de saturación de la máquina de inducción: la saturación de la inductancia de magnetización en los ejes de cuadratura y directa y la saturación del flujo de dispersión. El primero es debido a la interacción entre los flujos de los dos ejes, mientras que el segundo es debido a las inductancias de dispersión.

1.3 Objetivos de la tesis

El principal objetivo de esta tesis es desarrollar modelos y algoritmos, en el dominio del tiempo y en el dominio armónico, del motor de inducción en donde se incluyen los efectos de la saturación magnética. Se hace un análisis de la influencia en la operación y en los parámetros del motor debido a efectos de la saturación magnética.

1.4 Aportaciones de la tesis

Las principales aportaciones de este trabajo son las siguientes:

- La inclusión del comportamiento no lineal en el flujo de magnetización del motor de inducción a partir de una aproximación a la curva de saturación.
- El desarrollo de un modelo en el dominio armónico del motor de inducción para el estudio del comportamiento armónico del motor.
- Implementación de una herramienta de simulación digital para la simulación del motor de inducción en el dominio del tiempo y armónico que considere la influencia de la saturación magnética.

1.5 Organización de la tesis

En el capítulo 2 se hace una descripción matemática de las técnicas utilizadas en el análisis en el dominio armónico. En este capítulo se explican los dos métodos utilizados en el análisis: el análisis en dominio armónico en estado estable y el análisis en dominio armónico dinámico. El primero es una técnica que da la respuesta de operación en estado estable, mientras que la segunda técnica entrega la respuesta en estado transitorio del sistema. Una vez estabilizada la respuesta se puede obtener el estado estable de la función.

En el capítulo 3 se describen los modelos en dominio del tiempo del motor de inducción. Los modelos del motor de inducción están representados en término de las corrientes de estator y del rotor, como variables de estado. Se hace un análisis para un sistema de magnetización lineal (inductancia de magnetización constante) (NS), y un sistema de magnetización no lineal (inductancia de magnetización variable) (CS).

En el capítulo 4 se describen los modelos del motor de inducción en el dominio armónico. Esto se realiza utilizando las técnicas del dominio armónico estático y dominio armónico dinámico, que se describen en el capítulo 2.

En el capítulo 5 se hace la descripción en el dominio del tiempo y en el dominio armónico del motor de inducción cuando se encuentra operando en vacío y a rotor bloqueado. Este análisis al igual que el anterior se hace para un sistema de magnetización lineal y un sistema de magnetización no lineal.

Los resultados de la implementación de los modelos y la metodología propuesta se presentan en el capítulo 6. Se señala la influencia de la saturación en la generación de armónicos en las variables más importantes del motor.

En el capítulo 7 se dan las conclusiones generales del trabajo de tesis y algunas recomendaciones de trabajos futuros.

Capítulo 2

2 DESCRIPCIÓN MATEMÁTICA DE LA TÉCNICA EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA

En este capítulo se describe la teoría básica de las técnicas del dominio armónico (DA) y del dominio armónico dinámico (DAD). La particularidad de estas técnicas consiste principalmente en un cambio de variables del dominio del tiempo (DT) al dominio armónico (DA) y viceversa. Esta teoría está basada en las series de Fourier.

2.1 Transformación del DT a DA

Los sistemas eléctricos de potencia como lo son las máquinas de inducción se pueden representar por un sistema lineal periódico en el tiempo (LPT) de ecuaciones diferenciales ordinarias (ODEs). Estas ecuaciones pueden ser transformadas a un nuevo sistema de ecuaciones utilizando la técnica DA [15]. Esta técnica permite determinar los armónicos que influyen en la respuesta en estado estable del sistema. Además, los coeficientes periódicos en el tiempo (en dominio del tiempo) se convierten en matrices tipo Toeplitz en el DA.

Considerando el sistema escalar LPT [16]:

$$\begin{aligned}\dot{x}_p &= a_p x_p + b_p u, \\ y_p &= c_p x_p + d_p u,\end{aligned}\tag{2.1}$$

donde el subíndice p denota que es periódica en el tiempo, x es el estado, y la salida y u la entrada al sistema. Si se considera que cualquier variable en (2.1) puede ser expresada en series de Fourier:

$$x(t) = \sum_{h=-\infty}^{\infty} X_h e^{jh\omega_p t}\tag{2.2}$$

$$y(t) = \sum_{h=-\infty}^{\infty} Y_h e^{jh\omega_p t}\tag{2.3}$$

$$u(t) = \sum_{h=-\infty}^{\infty} U_h e^{jh\omega_p t}\tag{2.4}$$

En su forma expandida x_p y su derivada queda representada como:

$$\begin{aligned}x_p(t) &= x_{-h}(t)e^{-jh\omega_p t} + \dots + x_{-1}(t)e^{-j\omega_p t} + x_0(t) + x_1(t)e^{j\omega_p t} + \dots + x_h(t)e^{jh\omega_p t} \\ \dot{x}_p(t) &= (\dot{x}_{-h}(t) - jh\omega_0 x_{-h}(t))e^{-jh\omega_p t} + \dots + \dot{x}_0(t) + \dots + (\dot{x}_h(t) + jh\omega_0 x_h(t))e^{jh\omega_p t}\end{aligned}\tag{2.5}$$

donde h representa el armónico de mayor valor considerado en el análisis y ω_0 corresponde a la frecuencia fundamental del sistema. Al ser expresadas todas las variables de (2.1) por sus series de Fourier como en (2.5), eliminando los términos exponenciales y haciendo la derivada del vector armónico cero, la representación de estados de (2.1) en el dominio armónico estático DA es:

$$\begin{aligned}\mathbf{x} &= (\mathbf{S} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{B}\mathbf{U}, \\ \mathbf{y} &= \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{D}\mathbf{U}.\end{aligned}\tag{2.6}$$

Las variables en letras negritas en (2.6) son vectores y/o matrices con coeficientes armónicos invariantes en el tiempo, por ejemplo \mathbf{x} está definido como:

$$\mathbf{x} = [x_{-h} \quad \dots \quad x_{-1} \quad x_0 \quad x_1 \quad \dots \quad x_h]^T\tag{2.7}$$

donde el superíndice T denota transpuesta. La matriz \mathbf{S} es la matriz de diferenciación y se encuentra definida como:

$$\mathbf{S} = \text{diag}\{-j\omega_0 \quad \dots \quad -j\omega_0 \quad 0 \quad j\omega_0 \quad \dots \quad j\omega_0\}\tag{2.8}$$

Nótese que la derivada en DT en su transformación a DA se escribe como:

$$(DT) \quad \dot{\mathbf{x}} \longleftrightarrow \mathbf{S}\mathbf{x} \quad [DA].\tag{2.9}$$

Si a_p , b_p , c_p , y d_p , son invariantes en el tiempo, las matrices \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} y \mathbf{D} son matrices diagonales en el dominio armónico,

$$\mathbf{A} = \text{diag}\{a_{-h} \quad \dots \quad a_{-1} \quad a_0 \quad a_1 \quad \dots \quad a_h\},\tag{2.10}$$

$$\mathbf{B} = \text{diag}\{b_{-h} \quad \dots \quad b_{-1} \quad b_0 \quad b_1 \quad \dots \quad b_h\},\tag{2.11}$$

$$\mathbf{C} = \text{diag}\{c_{-h} \quad \dots \quad c_{-1} \quad c_0 \quad c_1 \quad \dots \quad c_h\},\tag{2.12}$$

$$\mathbf{D} = \text{diag}\{d_{-h} \quad \dots \quad d_{-1} \quad d_0 \quad d_1 \quad \dots \quad d_h\}.\tag{2.13}$$

Si a_p , b_p , c_p , y d_p son variantes en el tiempo la matriz \mathbf{A} así como las matrices \mathbf{B} , \mathbf{C} y \mathbf{D} son matrices tipo Toeplitz, que contienen los coeficientes armónicos de a_p , b_p , c_p y d_p respectivamente,

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_0 & a_{-1} & \cdots & a_{-h} & \\ a_1 & a_0 & & & a_{-h} \\ \vdots & & & & \vdots \\ a_h & & & a_0 & a_{-1} \\ & a_h & \cdots & a_1 & a_0 \end{bmatrix}, \quad (2.14)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_0 & b_{-1} & \cdots & b_{-h} & \\ b_1 & b_0 & & & b_{-h} \\ \vdots & & & & \vdots \\ b_h & & & b_0 & b_{-1} \\ & b_h & \cdots & b_1 & b_0 \end{bmatrix}, \quad (2.15)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_0 & c_{-1} & \cdots & c_{-h} & \\ c_1 & c_0 & & & c_{-h} \\ \vdots & & & & \vdots \\ c_h & & & c_0 & c_{-1} \\ & c_h & \cdots & c_1 & c_0 \end{bmatrix}, \quad (2.16)$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} d_0 & d_{-1} & \cdots & d_{-h} & \\ d_1 & d_0 & & & d_{-h} \\ \vdots & & & & \vdots \\ d_h & & & d_0 & d_{-1} \\ & d_h & \cdots & d_1 & d_0 \end{bmatrix}. \quad (2.17)$$

Las variables del sistema de ecuaciones en (2.6) son de dimensión $2h+1$; la respuesta en dominio del tiempo DT se obtiene aplicando la inversa de la serie de Fourier.

2.2 Transformación del DT a DAD

La técnica del dominio armónico dinámico DAD a diferencia de la técnica de dominio armónico estático DA, que da lugar a es un sistema de ecuaciones algebraicas y sólo entrega la solución en estado estable, se formula por un sistema de ecuaciones diferenciales, que proporciona la solución en estado transitorio del sistema. La derivada en DAD queda descrita como:

$$(DT) \quad \dot{\mathbf{x}} \longleftrightarrow \dot{\mathbf{x}} + \mathbf{S}\mathbf{x} \quad [DA]. \quad (2.18)$$

La formulación dinámica en el dominio armónico del sistema (2.1) tiene la forma:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}} &= (\mathbf{A} - \mathbf{S})\mathbf{x} + \mathbf{B}U, \\ \mathbf{y} &= \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{D}U,\end{aligned}\tag{2.19}$$

Donde los vectores armónicos contienen coeficientes variantes en el tiempo, por ejemplo:

$$\mathbf{x} = [x_{-h}(t) \quad \dots \quad x_{-1}(t) \quad x_0(t) \quad x_1(t) \quad \dots \quad x_h(t)]^T\tag{2.20}$$

Las matrices **A**, **B**, **C**, y **D** son las mismas que para el caso en DA, definidas en (2.10)-(2.17). La respuesta en el dominio armónico puede ser transformada al dominio del tiempo mediante las series de Fourier.

Capítulo 3

3 MODELADO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN EN EL DOMINIO DEL TIEMPO

En este capítulo se desarrolla el modelado del motor de inducción en el dominio del tiempo (DT). Se analiza la condición sin saturación magnética (esto implica que la inductancia de magnetización sea constante) y la condición de saturación magnética, cuando la inductancia de magnetización depende de la corriente de magnetización.

La saturación magnética, conocida como curva de saturación, es aproximada por un polinomio utilizando la técnica de mínimos cuadrados. Uno de los efectos indeseables de la saturación es la generación de armónicos, cuando el flujo magnético se encuentra por encima del codo de la curva de magnetización. Además, los armónicos pueden estar presentes en los voltajes de entrada del motor (producidos por cargas no lineales conectadas a la misma fuente de alimentación) o por no excentricidad entre los ejes del rotor y del estator del motor. También pueden ser generados por los sistemas de control o de alimentación que incorporan dispositivos de electrónica de potencia.

El modelo del motor se describe en los ejes naturales ABC o en un marco de referencia arbitrario DQ. El modelo DQ se obtiene a partir de la transformada de Park [17]. Esta transformada simplifica los modelos matemáticos, ya que se elimina la dependencia de la matriz de inductancias con respecto a la posición del rotor. En este trabajo se utiliza un sistema de referencia DQ con velocidad cero.

Los estados del modelo del motor de inducción pueden ser representados en términos de las corrientes, flujos o una combinación de éstos. En este trabajo se eligen como variables de estado las corrientes del estator y del rotor.

3.1 Modelado del motor de inducción sin saturación magnética

3.1.1 Modelo en sistema de referencia ABC

El arreglo de los devanados de la máquina de inducción balanceada en coordenadas ABC es representado en la Figura 3.1, los devanados de estator son idénticos, desplazados 120° y sinusoidalmente distribuidos, con N_s vueltas equivalentes y resistencia r_s . De igual manera se encuentran distribuidos los devanados del rotor, con N_r vueltas y resistencia r_r .

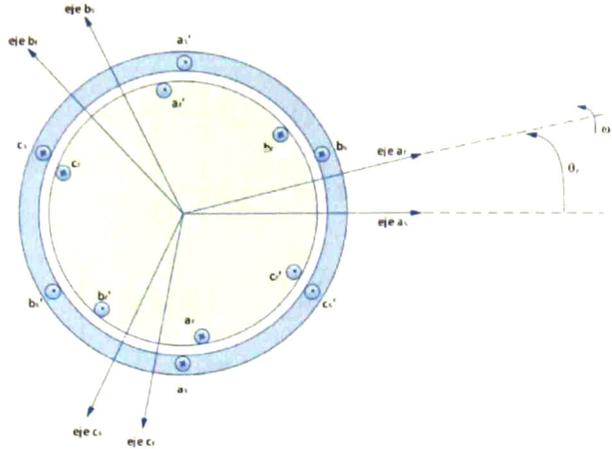


Figura 3.1. Diagrama del motor de inducción trifásico en ABC

Las ecuaciones de voltajes en coordenadas ABC [18] o variables de máquina se representan matricialmente de la siguiente forma,

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v} \boldsymbol{\lambda}_{abc s} \\ \mathbf{v} \boldsymbol{\lambda}_{abc r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{r}_s & 0 \\ 0 & \mathbf{r}_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{abc s} \\ \mathbf{i}_{abc r} \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} abc s \\ abc r \end{bmatrix}, \quad (3.1)$$

donde el vector de voltaje se define como $[v_{as} \ v_{bs} \ v_{cs} \ v_{ar} \ v_{br} \ v_{cr}]^T$, donde T significa transpuesta, la matriz de resistencias tiene la forma $diag([r_s \ r_s \ r_s \ r_r \ r_r \ r_r])$, las corrientes y los enlaces de flujos tienen la misma forma que los voltajes y son $[i_{as} \ i_{bs} \ i_{cs} \ i_{ar} \ i_{br} \ i_{cr}]^T$ y $[\lambda_{as} \ \lambda_{bs} \ \lambda_{cs} \ \lambda_{ar} \ \lambda_{br} \ \lambda_{cr}]^T$ respectivamente.

Los enlaces de flujo magnético están definidos como:

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{\lambda}_{abc s} \\ \boldsymbol{\lambda}_{abc r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_s & \mathbf{L}_{sr} \\ \mathbf{L}_{sr}^T & \mathbf{L}_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{abc s} \\ \mathbf{i}_{abc r} \end{bmatrix}, \quad (3.2)$$

donde,

$$\mathbf{L}_s = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{ls} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{ls} + L_{ms} \end{bmatrix}, \quad (3.3)$$

$$\mathbf{L}_r = \begin{bmatrix} L_{lr} + L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} \\ -\frac{1}{2}L_{mr} & L_{lr} + L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} \\ -\frac{1}{2}L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} & L_{lr} + L_{mr} \end{bmatrix}, \quad (3.4)$$

$$\mathbf{L}_{sr} = L_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta_r) & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix}. \quad (3.5)$$

Las variables \mathbf{L}_s y \mathbf{L}_r son las matrices del estator y rotor respectivamente, L_{ls} y L_{lr} son las inductancias de dispersión, L_{ms} y L_{mr} son las inductancias de magnetización del estator y rotor respectivamente, L_{sr} es la amplitud de las inductancias mutuas entre los devanados de estator y rotor y θ_r es el ángulo de desplazamiento del rotor (grados eléctricos).

$$\theta_r = \int \omega_r dt + \theta_0. \quad (3.6)$$

Los parámetros del rotor se transforman por sus equivalentes vistos del lado del estator. Esto se hace usando apropiadamente la relación entre el número de vueltas de las bobinas del estator y del rotor. Los voltajes, flujos y corrientes se expresan por:

$$\mathbf{x}_{abcr} = \frac{N_r}{N_s} \mathbf{x}_{abcs}, \quad (3.7)$$

donde \mathbf{x}_{abcr} puede representar a los vectores de corrientes, voltajes y enlaces de flujo del rotor, \mathbf{x}_{abcs} son los vectores de las variables del estator, N_s y N_r son el número de vueltas de las bobinas del estator y rotor respectivamente. Las inductancias mutuas y de magnetización se relacionan por:

$$L_{ms} = \frac{N_s}{N_r} L_{sr}, \quad (3.8)$$

$$L_{mr} = \left(\frac{N_r}{N_s}\right)^2 L_{ms}, \quad (3.9)$$

$$\mathbf{L}'_{sr} = \frac{N_s}{N_r} \mathbf{L}_{sr}, \quad (3.10)$$

$$\mathbf{L}_r = \left(\frac{N_s}{N_r} \right)^2 \mathbf{L}_r, \quad (3.11)$$

$$L'_{lr} = \left(\frac{N_s}{N_r} \right)^2 L_{lr}, \quad (3.12)$$

$$\mathbf{r}_r = \left(\frac{N_s}{N_r} \right)^2 \mathbf{r}_r. \quad (3.13)$$

Utilizando las expresiones (3.8) a (3.13) se pueden reescribir las ecuaciones (3.4) y (3.5),

$$\mathbf{L}'_r = \begin{bmatrix} L'_{lr} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & L'_{lr} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & L'_{lr} + L_{ms} \end{bmatrix}, \quad (3.14)$$

$$\mathbf{L}'_{sr} = L_{ms} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta_r) & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix}. \quad (3.15)$$

Los enlaces de flujo (3.2) ahora se reescribirán,

$$\begin{bmatrix} \lambda_s \\ \lambda_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_s & \mathbf{L}'_{sr} \\ (\mathbf{L}'_{sr})^T & \mathbf{L}_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_s \\ \mathbf{i}'_r \end{bmatrix}. \quad (3.16)$$

Al incluir la ecuación de enlaces de flujo (3.16) en la ecuación de voltajes (3.1), se derivan los enlaces de flujo respecto del tiempo para obtener las ecuaciones en términos de corrientes.

$$p \begin{bmatrix} \lambda_s \\ \lambda_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_s & \mathbf{L}'_{sr} \\ (\mathbf{L}'_{sr})^T & \mathbf{L}_r \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} \mathbf{i}_s \\ \mathbf{i}'_r \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} \mathbf{L}_s & \mathbf{L}'_{sr} \\ (\mathbf{L}'_{sr})^T & \mathbf{L}_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_s \\ \mathbf{i}'_r \end{bmatrix}, \quad (3.17)$$

donde,

$$p \begin{bmatrix} \mathbf{L}_s & \mathbf{L}_{sr} \\ (\mathbf{L}_{sr})^T & \mathbf{L}_r \end{bmatrix} = \frac{\partial}{\partial \theta_r} \begin{bmatrix} \mathbf{L}_s & \mathbf{L}_{sr} \\ (\mathbf{L}_{sr})^T & \mathbf{L}_r \end{bmatrix} \omega_r + \frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} \mathbf{L}_s & \mathbf{L}_{sr} \\ (\mathbf{L}_{sr})^T & \mathbf{L}_r \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} \mathbf{i}_s \\ \mathbf{i}_r \end{bmatrix}. \quad (3.18)$$

Cuando no se considera la saturación,

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} \mathbf{L}_s & \mathbf{L}_{sr} \\ (\mathbf{L}_{sr})^T & \mathbf{L}_r \end{bmatrix} = 0, \quad (3.19)$$

entonces,

$$p\mathbf{L}_{sr} = \omega_r \frac{\partial}{\partial \theta_r} \mathbf{L}_{sr} = -\omega_r L_{ms} \begin{bmatrix} \sin(\theta_r) & \sin\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin(\theta_r) & \sin\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin(\theta_r) \end{bmatrix}. \quad (3.20)$$

Sustituyendo la ecuación (3.17) en (3.1) se obtienen las ecuaciones de voltajes en términos de las corrientes:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_{abc} \\ \mathbf{v}'_{abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{r}_s & 0 \\ 0 & \mathbf{r}_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{abc} \\ \mathbf{i}'_{abc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{L}_s & \mathbf{L}_{sr} \\ (\mathbf{L}_{sr})^T & \mathbf{L}_r \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} \mathbf{i}_s \\ \mathbf{i}_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & p\mathbf{L}_{sr} \\ p(\mathbf{L}_{sr})^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_s \\ \mathbf{i}_r \end{bmatrix}. \quad (3.21)$$

En forma compacta,

$$\mathbf{v}_{abc} = \mathbf{R}_{abc} \mathbf{i}_{abc} + \mathbf{L}_{abc} p\mathbf{i}_{abc} + p\mathbf{L}_{abc} \mathbf{i}_{abc}, \quad (3.22)$$

donde \mathbf{R}_{abc} es la matriz de resistencias de estator y rotor, \mathbf{L}_{abc} es la matriz de inductancias de dispersión y mutuas de estator y rotor la cual dependen de la posición del rotor y $p\mathbf{L}_{abc}$ es la derivada de la matriz de inductancias,

$$\mathbf{R}_{abc} = \begin{bmatrix} \mathbf{r}_s & 0 \\ 0 & \mathbf{r}_r \end{bmatrix}, \mathbf{L}_{abc} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_s & \mathbf{L}_{sr} \\ (\mathbf{L}_{sr})^T & \mathbf{L}_r \end{bmatrix}, p\mathbf{L}_{abc} = \begin{bmatrix} 0 & p\mathbf{L}_{sr} \\ p(\mathbf{L}_{sr})^T & 0 \end{bmatrix}. \quad (3.23)$$

Las ecuaciones de los voltajes (3.21) en ABC se complementan con la ecuación de la velocidad del rotor:

$$p\omega_r = \frac{N_p}{2J}(T_e - T_L), \quad (3.24)$$

donde N_p es el número de polos de motor de inducción, J es la inercia del rotor, T_L es la carga que se le conecta al motor y T_e es el par electromagnético definido como:

$$T_e = \frac{1}{2} \mathbf{i}' \mathbf{G} \mathbf{i}, \quad (3.25)$$

donde \mathbf{i} es el vector de corrientes y $\mathbf{G} = \frac{\partial}{\partial \theta} \mathbf{L}$. También se puede calcular con:

$$T_e = \frac{1}{\sqrt{3}} (\lambda_{as} (i_{bs} - i_{cs}) + \lambda_{bs} (i_{cs} - i_{as}) + \lambda_{cs} (i_{as} - i_{bs})). \quad (3.26)$$

3.1.2 Modelo en sistema de referencia DQ

A continuación se describe el cambio de variables del sistema ABC al sistema de referencia dq , utilizando la transformada de Park. En este trabajo se selecciona un sistema de referencia estacionario $\omega=0$

El modelo matemático en términos del sistema de coordenadas dq , para una velocidad de referencia arbitrario [17] es:

estator,

$$\mathbf{v}_{qds} = \omega \Re \lambda_{qds} + p \lambda_{qds} + \mathbf{r}_s \mathbf{i}_{qds}, \quad (3.27)$$

rotor,

$$\mathbf{v}_{qdr} = (\omega - \omega_r) \Re \lambda_{qdr} + p \lambda_{qdr} + \mathbf{r}_r \mathbf{i}_{qdr}, \quad (3.28)$$

donde los vectores de voltaje están definidos como $\mathbf{v}_{qds} = [v_{qs} \ v_{ds}]^T$ $\mathbf{v}_{qdr} = [v_{qr} \ v_{dr}]^T$ las corrientes $\mathbf{i}_{qds} = [i_{qs} \ i_{ds}]^T$ $\mathbf{i}_{qdr} = [i_{qr} \ i_{dr}]^T$ los enlaces de flujo $\lambda_{qds} = [\lambda_{qs} \ \lambda_{ds}]^T$ y $\lambda_{qdr} = [\lambda_{qr} \ \lambda_{dr}]^T$ Las matrices de resistencias \mathbf{r}_s y \mathbf{r}_r son matrices diagonales $\mathbf{r}_s = \text{diag}[r_s \ r_s]$ y $\mathbf{r}_r = \text{diag}[r_r \ r_r]$ respectivamente y $\Re = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}$ Tomando en cuenta la velocidad del sistema de referencia seleccionado, el modelo es reducido como se indica:

$$\mathbf{v}_{qds} = p \lambda_{qds} + \mathbf{r}_s \mathbf{i}_{qds}, \quad (3.29)$$

$$\mathbf{v}_{qdr} = -\omega_r \Re \lambda_{qdr} + p \lambda_{qdr} + \mathbf{r}_r \mathbf{i}_{qdr}. \quad (3.30)$$

Los enlaces de flujos en términos del sistema de referencia dq :

$$\begin{bmatrix} \lambda_{qs} \\ \lambda_{ds} \\ \lambda_{qr} \\ \lambda_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_m & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_{ls} + L_m & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_{lr} + L_m & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_{lr} + L_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix}. \quad (3.31)$$

La matriz de inductancias de la ecuación (3.31), ahora no depende de la posición del rotor. Cuando no se considera la saturación magnética, la matriz de inductancias expresada en términos del sistema dq (3.31) es constante.

Sustituyendo los enlaces de flujo (3.31) en las ecuaciones de voltaje (3.29) y (3.30), para el caso de saturación magnética lineal, se obtienen las ecuaciones que describen la dinámica de las corrientes del motor de inducción:

$$\begin{bmatrix} v_{qs} \\ v_{ds} \\ v_{qr} \\ v_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 & 0 \\ 0 & -\omega_r L_m & r_r & -\omega_r (L_{lr} + L_m) \\ \omega_r L_m & 0 & \omega_r (L_{lr} + L_m) & r_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{ls} + L_m & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_{ls} + L_m & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_{lr} + L_m & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_{lr} + L_m \end{bmatrix} P \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix}, \quad (3.32)$$

en forma compacta,

$$\mathbf{v}_{qd} = \mathbf{R}_{qd} \mathbf{i}_{qd} + \mathbf{L}_{qd} P \mathbf{i}_{qd}, \quad (3.33)$$

en donde la matriz \mathbf{R}_{qd} es la matriz de resistencias modificada, donde se encuentran las resistencias del estator y rotor y el voltaje inducido debido a la velocidad del rotor. \mathbf{L}_{qd} es la matriz de inductancias propias y mutuas de estator y rotor,

$$\mathbf{R}_{qd} = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 & 0 \\ 0 & -\omega_r L_m & r_r & -\omega_r L_r \\ \omega_r L_m & 0 & \omega_r L_r & r_r \end{bmatrix}, \quad \mathbf{L}_{qd} = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_m & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_{ls} + L_m & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_{lr} + L_m & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_{lr} + L_m \end{bmatrix}. \quad (3.34)$$

El par electromagnético en términos de las componentes dq es:

$$T_e = k (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}), \quad (3.35)$$

donde,

$$k = \frac{3N_p}{4} \quad (3.36)$$

El circuito equivalente del motor de inducción trifásico en el sistema de referencia arbitrario 'qd' en cada uno de sus ejes qd, se muestra en las Figura 3.2 y Figura 3.3:

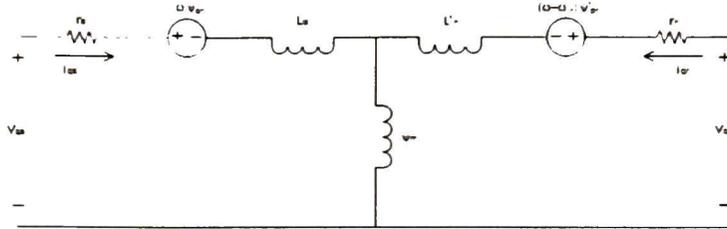


Figura 3.2 Circuito equivalente en el eje q

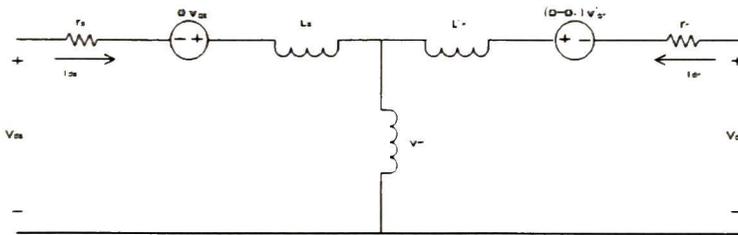


Figura 3.3 Circuito equivalente en el eje d

3.2 Modelado del motor de inducción incluyendo saturación

3.2.1 Modelo incluyendo saturación magnética

Las máquinas eléctricas están diseñadas para operar en la región no lineal de la curva de saturación, esto hace necesario que un modelo preciso considere los efectos de la saturación magnética. Ésta se formula como una dependencia de la inductancia de magnetización en función de la corriente de magnetización. Para incluir la saturación en el modelo es conveniente expresar los enlaces de flujo como la suma del flujo de dispersión más el flujo de magnetización en cada eje,

$$\begin{bmatrix} \lambda_{qs} \\ \lambda_{ds} \\ \lambda_{qr} \\ \lambda_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ls} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_{ls} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_{lr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_{lr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \lambda_{mq} \\ \lambda_{md} \\ \lambda_{mq} \\ \lambda_{md} \end{bmatrix}, \quad (3.37)$$

los enlaces de flujos de magnetización son función de las corrientes de magnetización en cada eje

$$\begin{aligned}\lambda_{mq} &= L_{mq}(i_{mq})i_{mq} \\ \lambda_{md} &= L_{md}(i_{md})i_{md}\end{aligned}\quad (3.38)$$

en este trabajo los enlaces de flujo mutuos en cada eje, (3.38), se aproximan por una función de tercer orden completa. Los detalles de aproximación se encuentran en el apéndice A.

$$\begin{aligned}\lambda_{mq} &= a_1 i_{mq} + a_2 i_{mq}^2 + a_3 i_{mq}^3 \\ &= (a_1 + a_2 i_{mq} + a_3 i_{mq}^2) i_{mq} \\ &= L_{mq}(i_{mq}) i_{mq},\end{aligned}\quad (3.39)$$

$$\begin{aligned}\lambda_{md} &= a_1 i_{md} + a_2 i_{md}^2 + a_3 i_{md}^3 \\ &= (a_1 + a_2 i_{md} + a_3 i_{md}^2) i_{md} \\ &= L_{md}(i_{md}) i_{md},\end{aligned}\quad (3.40)$$

en donde,

$$L_{mq}(i_{mq}) = a_1 + a_2 i_{mq} + a_3 i_{mq}^2, \quad i_{mq} = i_{qs} + i_{qr}, \quad (3.41)$$

$$L_{md}(i_{md}) = a_1 + a_2 i_{md} + a_3 i_{md}^2, \quad i_{md} = i_{ds} + i_{dr} \quad (3.42)$$

Las ecuaciones (3.29) y (3.30) se pueden reescribir como:

$$v_{qs} = r_s i_{qs} + L_{ls} p i_{qs} + p \lambda_{mq}, \quad (3.43)$$

$$v_{ds} = r_s i_{ds} + L_{ls} p i_{ds} + p \lambda_{md}, \quad (3.44)$$

$$v_{qr} = r_r i_{qr} - \omega_r (L_{lr} i_{dr} + \lambda_{md}) + L_{lr} p i_{qr} + p \lambda_{mq}, \quad (3.45)$$

$$v_{dr} = r_r i_{dr} + \omega_r (L_{lr} i_{qr} + \lambda_{mq}) + L_{lr} p i_{dr} + p \lambda_{md}. \quad (3.46)$$

Las derivadas de las expresiones de los enlaces de flujo de magnetización ($p\lambda_{mq}$, $p\lambda_{md}$) están expresadas como:

$$p\lambda_{mq} = \frac{\partial L(i_{mq})}{\partial i_{mq}} p i_{mq} = g_{mq}(i_{mq}) p i_{mq}, \quad (3.47)$$

$$p\lambda_{md} = \frac{\partial L(i_{md})}{\partial i_{md}} p i_{md} = g_{md}(i_{md}) p i_{md}, \quad (3.48)$$

donde,

$$g_{mq}(i_{mq}) = \frac{\partial L(i_{mq})}{\partial i_{mq}} = a_1 + 2a_2 i_{mq} + 3a_3 i_{mq}^2, \quad (3.49)$$

$$g_{md}(i_{md}) = \frac{\partial L(i_{md})}{\partial i_{md}} = a_1 + 2a_2 i_{md} + 3a_3 i_{md}^2, \quad (3.50)$$

y

$$p_{mq}^i = p_{qs}^i + p_{qr}^i, \quad (3.51)$$

$$p_{md}^i = p_{ds}^i + p_{dr}^i. \quad (3.52)$$

Sustituyendo las derivadas de los enlaces de flujo de magnetización (3.47), (3.48) y los enlaces de flujo (3.39) y (3.40) en las ecuaciones (3.43) a (3.46) se obtiene:

$$v_{qs} = r_s i_{qs} + L_{ls} p_{qs}^i + g_{mq}(i_{mq}) p_{mq}^i, \quad (3.53)$$

$$v_{ds} = r_s i_{ds} + L_{ls} p_{ds}^i + g_{md}(i_{md}) p_{md}^i, \quad (3.54)$$

$$\begin{aligned} v_{qr} &= r_r i_{qr} - \omega_r (L_{lr} i_{dr} + L_{md}(i_{md}) i_{md}) + L_{lr} p_{qr}^i + g_{mq}(i_{mq}) p_{mq}^i \\ &= r_r i_{qr} - \omega_r (L_{lr} + L_{md}(i_{md})) i_{dr} - \omega_r L_{md}(i_{md}) i_{ds} + L_{lr} p_{qr}^i + g_{mq}(i_{mq}) p_{mq}^i \\ &= r_r i_{qr} - \omega_r (L_{lr} + L_{md}(i_{md})) i_{dr} - \omega_r L_{md}(i_{md}) i_{ds} + L_{lr} p_{qr}^i + g_{mq}(i_{mq}) p_{qr}^i + g_{mq}(i_{mq}) p_{qs}^i \\ &= r_r i_{qr} - \omega_r (L_{lr} + L_{md}(i_{md})) i_{dr} - \omega_r L_{md}(i_{md}) i_{ds} + (L_{lr} + g_{mq}(i_{mq})) p_{qr}^i + g_{mq}(i_{mq}) p_{qs}^i, \end{aligned}$$

$$v_{qr} = r_r i_{qr} - \omega_r (L_{lr} + L_{md}(i_{md})) i_{dr} - \omega_r L_{md}(i_{md}) i_{ds} + (L_{lr} + g_{mq}(i_{mq})) p_{qr}^i + g_{mq}(i_{mq}) p_{qs}^i, \quad (3.55)$$

$$\begin{aligned} v_{dr} &= r_r i_{dr} + \omega_r (L_{lr} i_{qr} + \lambda_{mq}) + L_{lr} p_{dr}^i + g_{md}(i_{md}) p_{md}^i \\ &= r_r i_{dr} + \omega_r (L_{lr} i_{qr} + L_{mq}(i_{mq}) i_{mq}) + L_{lr} p_{dr}^i + g_{md}(i_{md}) p_{(i_{dr} + i_{ds})} \\ &= r_r i_{dr} + \omega_r (L_{lr} i_{qr} + L_{mq}(i_{mq}) i_{qr}) + \omega_r L_{mq}(i_{mq}) i_{qs} + L_{lr} p_{dr}^i + g_{md}(i_{md}) p_{(i_{dr} + i_{ds})} \\ &= r_r i_{dr} + \omega_r (L_{lr} + L_{mq}(i_{mq})) i_{qr} + \omega_r L_{mq}(i_{mq}) i_{qs} + (L_{lr} + g_{md}(i_{md})) p_{dr}^i + g_{md}(i_{md}) p_{ds}^i, \end{aligned}$$

$$v_{dr} = r_r i_{dr} + \omega_r (L_{lr} + L_{mq}(i_{mq})) i_{qr} + \omega_r L_{mq}(i_{mq}) i_{qs} + (L_{lr} + g_{md}(i_{md})) p_{dr}^i + g_{md}(i_{md}) p_{ds}^i. \quad (3.56)$$

en forma matricial,

$$\begin{bmatrix} v_{qs} \\ v_{ds} \\ v_{qr} \\ v_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 & 0 \\ 0 & -\omega_r L_{md}(i_{md}) & r_r & -\omega_r (L_{lr} + L_{md}(i_{md})) \\ \omega_r L_{mq}(i_{mq}) & 0 & \omega_r (L_{lr} + L_{mq}(i_{mq})) & r_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix} \quad (3.57)$$

$$+ \begin{bmatrix} L_{ls} + g_{mq}(i_{mq}) & 0 & g_{mq}(i_{mq}) & 0 \\ 0 & L_{ls} + g_{md}(i_{md}) & 0 & g_{md}(i_{md}) \\ g_{mq}(i_{mq}) & 0 & L_{ls} + g_{mq}(i_{mq}) & 0 \\ 0 & g_{md}(i_{md}) & 0 & L_{lr} + L_{md}(i_{md}) \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix},$$

en forma compacta,

$$v_{qd} = \mathbf{R}_{qd}(i_{mqd}) \mathbf{i}_{qd} + \mathbf{L}_{qd}(i_{mqd}) p \mathbf{i}_{qd}, \quad (3.58)$$

donde $\mathbf{R}_{qd}(i_{mqd})$ es la matriz de resistencias modificada, que incluye las resistencias del estator y rotor y el voltaje inducido debido a la velocidad del rotor. Esta matriz depende del valor de la corriente de magnetización. $\mathbf{L}_{qd}(i_{mqd})$ es la matriz de inductancias del estator y del rotor, depende de la corriente de magnetización,

$$\mathbf{R}_{qd}(i_{mqd}) = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 & 0 \\ 0 & -\omega_r L_{md}(i_{md}) & r_r & -\omega_r (L_{lr} + L_{md}(i_{md})) \\ \omega_r L_{mq}(i_{mq}) & 0 & \omega_r (L_{lr} + L_{mq}(i_{mq})) & r_r \end{bmatrix}, \quad (3.59)$$

$$\mathbf{L}_{qd}(i_{mqd}) = \begin{bmatrix} L_{ls} + g_{mq}(i_{mq}) & 0 & g_{mq}(i_{mq}) & 0 \\ 0 & L_{ls} + g_{md}(i_{md}) & 0 & g_{md}(i_{md}) \\ g_{mq}(i_{mq}) & 0 & L_{ls} + g_{mq}(i_{mq}) & 0 \\ 0 & g_{md}(i_{md}) & 0 & L_{lr} + L_{md}(i_{md}) \end{bmatrix}. \quad (3.60)$$

Capítulo 4

4 MODELADO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN EN EL DOMINIO ARMÓNICO

En este capítulo se desarrolla el modelo del motor de inducción trifásico en el dominio armónico. Las ecuaciones del modelo en el dominio en el tiempo, descritas en el Capítulo 3 se transforman al dominio de la frecuencia.

4.1 Modelado del motor de inducción en el dominio armónico dinámico (DAD)

El modelado en el dominio armónico dinámico (DAD) se utiliza para obtener la respuesta transitoria en el dominio armónico. A continuación se describe esta técnica para los modelos en el sistema de referencia abc y dq cuando se incluye la saturación magnética y cuando ésta se desprecia.

4.1.1 Modelo en el sistema de referencia ABC sin incluir saturación magnética

El modelado en DAD para el motor de inducción en coordenadas ABC se plantea a partir de las ecuaciones de las dinámicas de las corrientes en el tiempo (4.1), éstas se obtienen de las ecuaciones del motor de inducción (3.22),

$$p\mathbf{i}_{abc} = \mathbf{L}_{abc}^{-1} (\mathbf{v}_{abc} - \mathbf{R}_{abc}\mathbf{i}_{abc} - p\mathbf{L}_{abc}\mathbf{i}_{abc}). \quad (4.1)$$

El modelo en el dominio armónico dinámico DAD del motor de inducción en ABC es,

$$\mathbf{i}_{abc_h} = \mathbf{L}_{abc_h}^{-1} \mathbf{V}_{abc_h} - \left(\mathbf{S} + \mathbf{L}_{abc_h}^{-1} (\mathbf{R}_{abc_h} + p\mathbf{L}_{abc_h}) \right) \mathbf{I}_{abc_h}, \quad (4.2)$$

donde \mathbf{L}_{abc_h} es la matriz expandida que contiene a las inductancias propias y mutuas del motor de inducción, $p\mathbf{Lsr}_{abc}$ es la matriz con las derivadas de la matriz \mathbf{L}_{abc_h} , \mathbf{R}_{abc_h} es la matriz expandida de resistencias de estator y del rotor, \mathbf{V}_{abc_h} es el vector con el contenido armónico del voltaje de estator y rotor. Por simplicidad de notación se define H como el tamaño de los vectores en el dominio armónico $H = 2h + 1$.

donde h es el número de armónicos a considerar en este trabajo. En su forma compacta la matriz \mathbf{R}_{abc_h} , es,

$$\mathbf{R}_{abc_h} = \begin{bmatrix} \mathbf{r}_{s_h} & \mathbf{O}_{3H \times 3H} \\ \mathbf{O}_{3H \times 3H} & \mathbf{r}_{r_h} \end{bmatrix}, \quad (4.3)$$

donde \mathbf{r}_{s_3H} y \mathbf{r}_{r_3H} son matrices diagonales de la resistencia de estator y rotor respectivamente,

$$\mathbf{r}_{s_h} = \text{diag}\{r_{s_{-3H}} \quad \dots \quad r_{s_{-1}} \quad r_{s_0} \quad r_{s_1} \quad \dots \quad r_{s_{3H}}\}, \quad (4.4)$$

$$\mathbf{r}_{r_h} = \text{diag}\{r_{r_{-3H}} \quad \dots \quad r_{r_{-1}} \quad r_{r_0} \quad r_{r_1} \quad \dots \quad r_{r_{3H}}\}, \quad (4.5)$$

mientras que $\mathbf{O}_{3H \times 3H}$ es una matriz de ceros de tamaño $3H \times 3H$

La matriz \mathbf{L}_{abc_h} está definida por,

$$\mathbf{L}_{abc_h} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{s_3H \times 3H} & \mathbf{L}_{sr_3H \times 3H} \\ \mathbf{L}_{sr_3H \times 3H}^T & \mathbf{L}_{r_3H \times 3H} \end{bmatrix}, \quad (4.6)$$

las matrices \mathbf{L}_{s_h} y \mathbf{L}_{r_h} son matrices diagonales de las inductancias propias y mutuas,

$$\mathbf{L}_{s_h} = \text{diag}\{(L_{ls} + L_m)_{-3H} \quad \dots \quad (L_{ls} + L_m)_{-1} \quad (L_{ls} + L_m)_0 \quad (L_{ls} + L_m)_1 \quad \dots \quad (L_{ls} + L_m)_{3H}\}, \quad (4.7)$$

$$\mathbf{L}_{r_h} = \text{diag}\{(L_{lr} + L_m)_{-3H} \quad \dots \quad (L_{lr} + L_m)_{-1} \quad (L_{lr} + L_m)_0 \quad (L_{lr} + L_m)_1 \quad \dots \quad (L_{lr} + L_m)_{3H}\}, \quad (4.8)$$

y donde la matriz \mathbf{L}_{sr_h} es una matriz tipo Toeplitz, que depende de la posición del rotor. $p\mathbf{L}_{abc_h}$ se define como,

$$p\mathbf{L}_{abc_h} = \begin{bmatrix} \mathbf{O}_{3H \times 3H} & p\mathbf{L}_{sr_3H \times 3H} \\ p\mathbf{L}_{sr_3H \times 3H}^T & \mathbf{O}_{3H \times 3H} \end{bmatrix}, \quad (4.9)$$

y \mathbf{S} es,

$$\mathbf{S} = \text{diag}\{\mathbf{z} \quad \mathbf{z} \quad \mathbf{z} \quad \mathbf{z} \quad \mathbf{z} \quad \mathbf{z}\}, \quad (4.10)$$

y,

$$\mathbf{z} = \text{diag}\{-j\hbar\omega_0 \quad \dots \quad -j\omega_0 \quad 0 \quad j\omega_0 \quad \dots \quad j\hbar\omega_0\}. \quad (4.11)$$

La velocidad del rotor,

$$p\omega_r = \frac{N_p}{2J}(T_e - T_L), \quad (4.12)$$

en el modelo DAD como,

$$\dot{\boldsymbol{\Omega}}_{r_h} = \left(\frac{N_p}{2J} \right) (\mathbf{T}_e - \mathbf{T}_L) - \mathbf{S} \boldsymbol{\Omega}_{r_h}, \quad (4.13)$$

donde el término $\left(\frac{N_p}{2J} \right)$ es constante, \mathbf{T}_L es e vector con el contenido armónico del par de carga del motor, mientras que \mathbf{T}_e se define,

$$\mathbf{T}_e \boldsymbol{\Psi} \left(\frac{3N_p}{4} \right) \left[\mathbf{I}_{as_h} (\boldsymbol{\Psi}_{bs_h} - \mathbf{I}_{cs_h}) + \mathbf{I}_{bs_h} (\boldsymbol{\Psi}_{cs_h} - \mathbf{I}_{as_h}) + \mathbf{I}_{cs_h} (as_h - bs_h) \right], \quad (4.14)$$

donde el término $\left(\frac{3N_p}{4} \right)$ es contante, el subíndice T_p se refiere a una matriz tipo Toeplitz, $\boldsymbol{\Psi}_{as_h}$, $\boldsymbol{\Psi}_{bs_h}$ y $\boldsymbol{\Psi}_{cs_h}$ son matrices tipo Toeplitz del flujo estator en las fases a , b y c respectivamente, mientras que \mathbf{I}_{as_h} , \mathbf{I}_{bs_h} y \mathbf{I}_{cs_h} son vectores con el contenido armónico de la corriente de estator de los eje a , b y c respectivamente.

4.1.2 Modelo en el sistema de referencia DQ sin incluir saturación magnética

Teniendo en consideración el modelo en el dominio del tiempo en el sistema de referencia dq para el motor de inducción (3.33), las dinámicas de las corrientes son:

$$p \mathbf{i}_{qd} = \mathbf{L}_{qd}^{-1} (\mathbf{v}_{qd} - \mathbf{R}_{qd} \mathbf{i}_{qd}), \quad (4.15)$$

la representación en DAD,

$$\dot{\mathbf{i}}_{qd_h} = \mathbf{L}_{qd_h}^{-1} \mathbf{V}_{qd_h} - (\mathbf{L}_{qd_h}^{-1} \mathbf{R}_{qd_h} + \mathbf{S}) \mathbf{I}_{qd_h}, \quad (4.16)$$

donde \mathbf{S} es,

$$\mathbf{S} = \text{diag} \{ \mathbf{z} \quad \mathbf{z} \quad \mathbf{z} \quad \mathbf{z} \}. \quad (4.17)$$

El vector de corrientes \mathbf{I}_{qd_h} , tiene el contenido armónico de las corrientes de estator y del rotor. \mathbf{V}_{qd_h} es un vector con el contenido armónico del voltaje de entrada del rotor y estator, \mathbf{R}_{qd_h} es la matriz expandida de las resistencias de estator y rotor y de los términos de velocidad del rotor y \mathbf{L}_{qd_h} es la matriz armónica de inductancias,

$$\mathbf{R}_{qd_h} = \begin{bmatrix} \mathbf{r}_{s_h} & \mathbf{O}_{H \times H} & \mathbf{O}_{H \times H} & \mathbf{O}_{H \times H} \\ \mathbf{O}_{H \times H} & \mathbf{r}_{s_h} & \mathbf{O}_{H \times H} & \mathbf{O}_{H \times H} \\ \mathbf{O}_{H \times H} & -\mathbf{w}_h & \mathbf{r}_{r_h} & -\mathbf{w}_h \\ \mathbf{w}_h & \mathbf{O}_{H \times H} & \mathbf{w}_h & \mathbf{r}_{r_h} \end{bmatrix}, \quad (4.18)$$

$$\mathbf{r}_{s_h} = \text{diag} \{ r_{s_{-H}} \quad \dots \quad r_{s_{-1}} \quad r_{s_0} \quad r_{s_1} \quad \dots \quad r_{s_H} \}, \quad (4.19)$$

$$\mathbf{r}_{r_h} = \text{diag} \{ r_{r_{-H}} \quad \dots \quad r_{r_{-1}} \quad r_{r_0} \quad r_{r_1} \quad \dots \quad r_{r_H} \}, \quad (4.20)$$

y \mathbf{w}_h es una matriz tipo Toeplitz,

$$\mathbf{w}_h = L_m \begin{bmatrix} \omega_{r_0} & \omega_{r_{-1}} & \dots & \omega_{r_{-h}} & & \\ \omega_{r_1} & \omega_{r_0} & & & \omega_{r_{-h}} & \\ \vdots & & & & \vdots & \\ \omega_{r_h} & & & \omega_{r_0} & \omega_{r_{-1}} & \\ & \omega_{r_h} & \dots & \omega_{r_1} & \omega_{r_0} & \end{bmatrix}. \quad (4.21)$$

La matriz \mathbf{L}_{qd_h} se puede escribir,

$$\mathbf{L}_{qd_h} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{s_h} & \mathbf{O}_{H \times H} & \mathbf{L}_{m_h} & \mathbf{O}_{H \times H} \\ \mathbf{O}_{H \times H} & \mathbf{L}_{s_h} & \mathbf{O}_{H \times H} & \mathbf{L}_{m_h} \\ \mathbf{L}_{m_h} & \mathbf{O}_{H \times H} & \mathbf{L}_{r_h} & \mathbf{O}_{H \times H} \\ \mathbf{O}_{H \times H} & \mathbf{L}_{m_h} & \mathbf{O}_{H \times H} & \mathbf{L}_{r_h} \end{bmatrix}, \quad (4.22)$$

las matrices \mathbf{L}_{s_h} y \mathbf{L}_{r_h} son matrices diagonales de la forma,

$$\mathbf{L}_{s_h} = \text{diag} \{ (L_{ls} + L_m)_{-H} \quad \dots \quad (L_{ls} + L_m)_{-1} \quad (L_{ls} + L_m)_0 \quad (L_{ls} + L_m)_1 \quad \dots \quad (L_{ls} + L_m)_H \}, \quad (4.23)$$

$$\mathbf{L}_{r_h} = \text{diag} \{ (L_{lr} + L_m)_{-H} \quad \dots \quad (L_{lr} + L_m)_{-1} \quad (L_{lr} + L_m)_0 \quad (L_{lr} + L_m)_1 \quad \dots \quad (L_{lr} + L_m)_H \}, \quad (4.24)$$

$$\mathbf{L}_{m_h} = \text{diag} \{ L_{m_{-H}} \quad \dots \quad L_{m_{-1}} \quad L_{m_0} \quad L_{m_1} \quad \dots \quad L_{m_H} \}. \quad (4.25)$$

La ecuación de la dinámica de la velocidad del rotor es la misma que en el modelo ABC (4.13). El par electromagnético es,

$$\mathbf{T}_e = \left(\frac{3N_p}{4} \right) (\Psi_{ds_h} \mathbf{I}_{qs_h} - \Psi_{qs_h} \mathbf{I}_{ds_h}), \quad (4.26)$$

donde el término $\left(\frac{3N_p}{4}\right)$ es contante, Ψ_{ds_h} y Ψ_{qs_h} son matrices tipo Toeplitz del flujo estator en los ejes d y q respectivamente, mientras que \mathbf{I}_{qs_h} y \mathbf{I}_{ds_h} son vectores con el contenido armónico de la corriente de estator de los ejes q y d respectivamente.

4.1.3 Modelo en el sistema de referencia DQ incluyendo saturación magnética

Cuando se incluye el efecto de la saturación magnética, las dinámicas de las corrientes en el dominio del tiempo se pueden obtener a partir de la ecuación de voltajes (3.58),

$$p\mathbf{i}_{qd} = \mathbf{L}_{dq}^{-1}(\mathbf{i}_{mqd})\left(\mathbf{v}_{qd} - \mathbf{R}_{qd}(\mathbf{i}_{mqd})\mathbf{i}_{qd}\right), \quad (4.27)$$

la ecuación en el dominio armónico dinámico DAD se expresa como

$$\dot{\mathbf{i}}_{qd_h} = \mathbf{L}_{dq_h}^{-1}(\mathbf{i}_{mqd_h})\left(\mathbf{V}_{qd_h} - \mathbf{R}_{qd_h}(\mathbf{i}_{mqd_h})\mathbf{I}_{qd_h}\right) - \mathbf{S}\mathbf{I}_{qd_h}, \quad (4.28)$$

donde $\mathbf{R}_{qd_h}(\mathbf{i}_{mqd_h})$ es una matriz dependiente del vector de la corriente de magnetización,

$$\mathbf{R}_{qd_h}(\mathbf{i}_{mqd_h}) = \begin{bmatrix} \mathbf{r}_{s_h} & \mathbf{O}_{H \times H} & \mathbf{O}_{H \times H} & \mathbf{O}_{H \times H} \\ \mathbf{O}_{H \times H} & \mathbf{r}_{s_h} & \mathbf{O}_{H \times H} & \mathbf{O}_{H \times H} \\ \mathbf{O}_{H \times H} & -\mathbf{w}_h \mathbf{L}_{md}(i_{md})_h & \mathbf{r}_r & -\mathbf{w}_h \mathbf{L}_{md}(i_{md})_h \\ \mathbf{w}_h \mathbf{L}_{mq}(i_{mq})_h & \mathbf{O}_{H \times H} & \mathbf{w}_h \mathbf{L}_{mq}(i_{mq})_h & \mathbf{r}_r \end{bmatrix}, \quad (4.29)$$

en donde las matrices \mathbf{r}_{s_h} y \mathbf{r}_r son matrices diagonales de orden $H \times H$ de las resistencias de estator y rotor,

$$\mathbf{r}_{s_h} = \text{diag}\{r_{s_{-H}} \quad \dots \quad r_{s_{-1}} \quad r_{s_0} \quad r_{s_1} \quad \dots \quad r_{s_H}\}, \quad (4.30)$$

$$\mathbf{r}_r = \text{diag}\{r_{r_{-H}} \quad \dots \quad r_{r_{-1}} \quad r_{r_0} \quad r_{r_1} \quad \dots \quad r_{r_H}\}, \quad (4.31)$$

mientras que $\mathbf{L}_{mq}(i_{mq})_h$, $\mathbf{L}_{md}(i_{md})_h$ y \mathbf{w}_h son matrices tipo Toeplitz,

$$\mathbf{L}_{mq}(i_{mq})_h = \begin{bmatrix} L_{mq}(i_{mq})_0 & L_{mq}(i_{mq})_{-1} & \dots & L_{mq}(i_{mq})_{-h} & 0 \\ L_{mq}(i_{mq})_1 & L_{mq}(i_{mq})_0 & & & L_{mq}(i_{mq})_{-h} \\ \vdots & & & & \vdots \\ L_{mq}(i_{mq})_h & & & L_{mq}(i_{mq})_0 & L_{mq}(i_{mq})_{-1} \\ 0 & L_{mq}(i_{mq})_h & \dots & L_{mq}(i_{mq})_1 & L_{mq}(i_{mq})_0 \end{bmatrix}, \quad (4.32)$$

$$\mathbf{L}_{md}(\mathbf{i}_{md})_h = \begin{bmatrix} L_{md}(i_{md})_0 & L_{md}(i_{md})_{-1} & \cdots & L_{md}(i_{md})_{-h} & 0 \\ L_{md}(i_{md})_1 & L_{md}(i_{md})_0 & & & L_{md}(i_{md})_{-h} \\ \vdots & & & & \vdots \\ L_{md}(i_{md})_h & & & L_{md}(i_{md})_0 & L_{md}(i_{md})_{-1} \\ 0 & L_{md}(i_{md})_h & \cdots & L_{md}(i_{md})_1 & L_{md}(i_{md})_0 \end{bmatrix}, \quad (4.33)$$

$$\mathbf{w}_h = \begin{bmatrix} \omega_{r_0} & \omega_{r_{-1}} & \cdots & \omega_{r_{-h}} \\ \omega_{r_1} & \omega_{r_0} & & \omega_{r_{-h}} \\ \vdots & & & \vdots \\ \omega_{r_h} & & \omega_{r_0} & \omega_{r_{-1}} \\ & \omega_{r_h} & \cdots & \omega_{r_1} & \omega_{r_0} \end{bmatrix}. \quad (4.34)$$

La matriz de inductancias $\mathbf{L}_{qd_h}(\mathbf{i}_{mqd})$ está definida como,

$$\mathbf{L}_{qd_h}(\mathbf{i}_{mqd}) = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{ls_h} + \mathbf{g}_{mq}(\mathbf{i}_{mq})_h & \mathbf{O}_{H \times H} & \mathbf{g}_{mq}(\mathbf{i}_{mq})_h & \mathbf{O}_{H \times H} \\ \mathbf{O}_{H \times H} & \mathbf{L}_{ls_h} + \mathbf{g}_{md}(\mathbf{i}_{md})_h & \mathbf{O}_{H \times H} & \mathbf{g}_{md}(\mathbf{i}_{md})_h \\ \mathbf{g}_{mq}(\mathbf{i}_{mq})_h & \mathbf{O}_{H \times H} & \mathbf{L}_{lr_h} + \mathbf{g}_{mq}(\mathbf{i}_{mq})_h & \mathbf{O}_{H \times H} \\ \mathbf{O}_{H \times H} & \mathbf{g}_{md}(\mathbf{i}_{md})_h & \mathbf{O}_{H \times H} & \mathbf{L}_{lr_h} + \mathbf{g}_{md}(\mathbf{i}_{md})_h \end{bmatrix}, \quad (4.35)$$

donde,

$$\mathbf{L}_{ls_h} = \text{diag} \{ L_{ls_{-H}} \quad \cdots \quad L_{ls_{-1}} \quad L_{ls_0} \quad L_{ls_1} \quad \cdots \quad L_{ls_H} \}, \quad (4.36)$$

$$\mathbf{L}_{lr_h} = \text{diag} \{ L_{lr_{-H}} \quad \cdots \quad L_{lr_{-1}} \quad L_{lr_0} \quad L_{lr_1} \quad \cdots \quad L_{lr_H} \}, \quad (4.37)$$

y,

$$\mathbf{g}_{mq}(\mathbf{i}_{mq})_h = \begin{bmatrix} g_{mq}(i_{mq})_0 & g_{mq}(i_{mq})_{-1} & \cdots & g_{mq}(i_{mq})_{-h} & 0 \\ g_{mq}(i_{mq})_1 & g_{mq}(i_{mq})_0 & & & g_{mq}(i_{mq})_{-h} \\ \vdots & & & & \vdots \\ g_{mq}(i_{mq})_h & & & g_{mq}(i_{mq})_0 & g_{mq}(i_{mq})_{-1} \\ 0 & g_{mq}(i_{mq})_h & \cdots & g_{mq}(i_{mq})_1 & g_{mq}(i_{mq})_0 \end{bmatrix}, \quad (4.38)$$

$$\mathbf{g}_{md}(\mathbf{i}_{md})_h = \begin{bmatrix} g_{md}(i_{md})_0 & g_{md}(i_{md})_{-1} & \cdots & g_{md}(i_{md})_{-h} & 0 \\ g_{md}(i_{md})_1 & g_{md}(i_{md})_0 & & & g_{md}(i_{md})_{-h} \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ g_{md}(i_{md})_h & & & g_{md}(i_{md})_0 & g_{md}(i_{md})_{-1} \\ 0 & g_{md}(i_{md})_h & \cdots & g_{md}(i_{md})_1 & g_{md}(i_{md})_0 \end{bmatrix}, \quad (4.39)$$

La ecuación de la dinámica de la velocidad del rotor (4.13) y la ecuación de par electromagnético (4.26) son de la misma forma que para el caso sin saturación. Reescribiendo estas ecuaciones,

$$\dot{\boldsymbol{\Omega}}_r = \left(\frac{N_p}{2J} \right) (\mathbf{T}_e - \mathbf{T}_L) - \mathbf{S} \boldsymbol{\Omega}_r, \quad (4.40)$$

$$\mathbf{T}_e = \left(\frac{3N_p}{4} \right) (\boldsymbol{\Psi}_{ds_h} \mathbf{I}_{qs} - \boldsymbol{\Psi}_{qs_h} \mathbf{I}_{ds}), \quad (4.41)$$

donde el término $\left(\frac{3N_p}{4} \right)$ es constante, $\boldsymbol{\Psi}_{ds_h}$ y $\boldsymbol{\Psi}_{qs_h}$ son matrices tipo Toeplitz del flujo estator en los ejes d y q respectivamente, mientras que \mathbf{I}_{qs_h} y \mathbf{I}_{ds_h} son vectores con el contenido armónico de las corrientes de estator.

4.2 Modelado del motor de inducción en el dominio armónico estático (DA)

EL modelado en dominio armónico estático DA se obtiene a partir del modelado dinámico DAD, haciendo la derivada de la ecuación diferencial igual a cero.

4.2.1 Modelo en el sistema de referencia ABC sin incluir saturación magnética

El modelo en DA para el motor de inducción se obtiene haciendo cero la derivada del modelo en DAD (4.2),

$$\dot{\mathbf{i}}_{abc_h} = 0, \quad (4.42)$$

Al hacer cero la derivada de (4.2), la ecuación algebraica es,

$$\mathbf{I}_{abc_h} = \left(\mathbf{L}_{abc_h} \mathbf{S} + \mathbf{R}_{abc_h} + p \mathbf{Lsr}_{abc_h} \right)^{-1} \mathbf{V}_{abc_h}, \quad (4.43)$$

las matrices \mathbf{R}_{abc_h} , \mathbf{L}_{abc_h} y $p \mathbf{Lsr}_{abc_h}$ son definidas por las ecuaciones (4.3), (4.6) y (4.9). La ecuación del par electromagnético es la misma que para el modelo en DAD (4.14),

$$\mathbf{T}_e = \left(\frac{3N_p}{4} \right) \left(\Psi_{as_h} (\mathbf{I}_{bs} - \mathbf{I}_{cs}) + \Psi_{bs_h} (\mathbf{I}_{cs} - \mathbf{I}_{as}) + \Psi_{cs_h} (\mathbf{I}_{as} - \mathbf{I}_{bs}) \right), \quad (4.44)$$

la velocidad del rotor se obtiene de la ecuación (5.13), haciendo cero la derivada de la velocidad,

$$\dot{\boldsymbol{\Omega}}_h = 0, \quad (4.45)$$

Resulta la ecuación algebraica,

$$\boldsymbol{\Omega}_h = \mathbf{S}^{-1} \left(\frac{N_p}{2J} \right) (\mathbf{T}_e - \mathbf{T}_L). \quad (4.46)$$

4.2.2 Modelo en el sistema de referencia DQ sin incluir saturación magnética

Siguiendo el mismo procedimiento del modelo en coordenadas ABC , se hacen cero las derivadas de las variables en el dominio armónico dinámico de la ecuación (4.16) con la derivada de la corriente,

$$\dot{\mathbf{I}}_{qd_h} = 0, \quad (4.47)$$

la ecuación en estado estable armónica es,

$$\mathbf{I}_{qd_h} = \left(\mathbf{R}_{qd_h} + \mathbf{L}_{qd_h} \mathbf{S} \right)^{-1} \mathbf{V}_{qd_h}, \quad (4.48)$$

donde las matrices \mathbf{R}_{qd_h} y \mathbf{L}_{qd_h} son igual a las definidas en (4.18) y (4.22) respectivamente.

La ecuación de la dinámica de la velocidad del rotor es la misma que en el modelo ABC (4.46), mientras que el par electromagnético se obtiene de (4.26),

$$\mathbf{T}_e = \left(\frac{3N_p}{4} \right) \left(\Psi_{ds_h} \mathbf{I}_{qs_h} - \Psi_{qs_h} \mathbf{I}_{ds_h} \right), \quad (4.49)$$

4.2.3 Modelo en el sistema de referencia DQ incluyendo saturación magnética

El modelo en DA cuando se incluye la saturación magnética se obtiene del modelo en el tiempo (3.57) o (3.58) transformadas al dominio armónico y tiene la forma,

$$\mathbf{I}_{qd_h} = \left(\mathbf{L}_{dq_h} \left(\mathbf{i}_{mqd_h} \right) \mathbf{S} - \mathbf{R}_{dq_h} \left(\mathbf{i}_{mqd_h} \right) \right)^{-1} \mathbf{V}_{qd_h}, \quad (4.50)$$

donde,

$$\mathbf{R}_{qd_h}(\mathbf{i}_{m_{qd_h}}) = \begin{bmatrix} \mathbf{r}_{s_h} & \mathbf{O}_{H \times H} & \mathbf{O}_{H \times H} & \mathbf{O}_{H \times H} \\ \mathbf{O}_{H \times H} & \mathbf{r}_{s_h} & \mathbf{O}_{H \times H} & \mathbf{O}_{H \times H} \\ \mathbf{O}_{H \times H} & -\mathbf{w}_h \mathbf{L}_{md}(\mathbf{i}_{md})_h & \mathbf{r}_{r_h} & -\mathbf{w}_h \mathbf{L}_{md}(\mathbf{i}_{md})_h \\ \mathbf{w}_h \mathbf{L}_{mq}(\mathbf{i}_{mq})_h & \mathbf{O}_{H \times H} & \mathbf{w}_h \mathbf{L}_{mq}(\mathbf{i}_{mq})_h & \mathbf{r}_{r_h} \end{bmatrix}, \quad (4.51)$$

en donde las matrices \mathbf{r}_{s_h} y \mathbf{r}_{r_h} son matrices diagonales de orden $H \times H$ de las resistencias de estator y rotor,

$$\mathbf{r}_{s_h} = \text{diag}\{r_{s_{-H}} \quad \dots \quad r_{s_{-1}} \quad r_{s_0} \quad r_{s_1} \quad \dots \quad r_{s_H}\}, \quad (4.52)$$

$$\mathbf{r}_{r_h} = \text{diag}\{r_{r_{-H}} \quad \dots \quad r_{r_{-1}} \quad r_{r_0} \quad r_{r_1} \quad \dots \quad r_{r_H}\}, \quad (4.53)$$

mientras que $\mathbf{L}_{mq}(\mathbf{i}_{mq})_h$, $\mathbf{L}_{md}(\mathbf{i}_{md})_h$ y \mathbf{w}_h son matrices tipo Toeplitz,

$$\mathbf{L}_{mq}(\mathbf{i}_{mq})_h = \begin{bmatrix} L_{mq}(\mathbf{i}_{mq})_0 & L_{mq}(\mathbf{i}_{mq})_{-1} & \dots & L_{mq}(\mathbf{i}_{mq})_{-h} & 0 \\ L_{mq}(\mathbf{i}_{mq})_1 & L_{mq}(\mathbf{i}_{mq})_0 & & & L_{mq}(\mathbf{i}_{mq})_{-h} \\ \vdots & & & & \vdots \\ L_{mq}(\mathbf{i}_{mq})_h & & & L_{mq}(\mathbf{i}_{mq})_0 & L_{mq}(\mathbf{i}_{mq})_{-1} \\ 0 & L_{mq}(\mathbf{i}_{mq})_h & \dots & L_{mq}(\mathbf{i}_{mq})_1 & L_{mq}(\mathbf{i}_{mq})_0 \end{bmatrix}, \quad (4.54)$$

$$\mathbf{L}_{md}(\mathbf{i}_{md})_h = \begin{bmatrix} L_{md}(\mathbf{i}_{md})_0 & L_{md}(\mathbf{i}_{md})_{-1} & \dots & L_{md}(\mathbf{i}_{md})_{-h} & 0 \\ L_{md}(\mathbf{i}_{md})_1 & L_{md}(\mathbf{i}_{md})_0 & & & L_{md}(\mathbf{i}_{md})_{-h} \\ \vdots & & & & \vdots \\ L_{md}(\mathbf{i}_{md})_h & & & L_{md}(\mathbf{i}_{md})_0 & L_{md}(\mathbf{i}_{md})_{-1} \\ 0 & L_{md}(\mathbf{i}_{md})_h & \dots & L_{md}(\mathbf{i}_{md})_1 & L_{md}(\mathbf{i}_{md})_0 \end{bmatrix}, \quad (4.55)$$

$$\mathbf{w}_h = \begin{bmatrix} \omega_{r_0} & \omega_{r_{-1}} & \dots & \omega_{r_{-h}} \\ \omega_{r_1} & \omega_{r_0} & & \omega_{r_{-h}} \\ \vdots & & & \vdots \\ \omega_{r_h} & & \omega_{r_0} & \omega_{r_{-1}} \\ & \omega_{r_h} & \dots & \omega_{r_1} & \omega_{r_0} \end{bmatrix}. \quad (4.56)$$

La matriz de inductancias $\mathbf{L}_{qd_h}(\mathbf{i}_{mqd})$ está definida como,

$$\mathbf{L}_{qd_h}(\mathbf{i}_{mqd}) = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{ls_h} + \mathbf{g}_{mq}(\mathbf{i}_{mq})_h & \mathbf{O}_{H \times H} & \mathbf{g}_{mq}(\mathbf{i}_{mq})_h & \mathbf{O}_{H \times H} \\ \mathbf{O}_{H \times H} & \mathbf{L}_{ls_h} + \mathbf{g}_{md}(\mathbf{i}_{md})_h & \mathbf{O}_{H \times H} & \mathbf{g}_{md}(\mathbf{i}_{md})_h \\ \mathbf{g}_{mq}(\mathbf{i}_{mq})_h & \mathbf{O}_{H \times H} & \mathbf{L}_{lr_h} + \mathbf{g}_{mq}(\mathbf{i}_{mq})_h & \mathbf{O}_{H \times H} \\ \mathbf{O}_{H \times H} & \mathbf{g}_{md}(\mathbf{i}_{md})_h & \mathbf{O}_{H \times H} & \mathbf{L}_{lr_h} + \mathbf{g}_{md}(\mathbf{i}_{md})_h \end{bmatrix}, \quad (4.57)$$

donde,

$$\mathbf{L}_{ls_h} = \text{diag}\{L_{ls_{-H}} \dots L_{ls_{-1}} L_{ls_0} L_{ls_1} \dots L_{ls_H}\}, \quad (4.58)$$

$$\mathbf{L}_{lr_h} = \text{diag}\{L_{lr_{-H}} \dots L_{lr_{-1}} L_{lr_0} L_{lr_1} \dots L_{lr_H}\}, \quad (4.59)$$

y,

$$\mathbf{g}_{mq}(\mathbf{i}_{mq})_h = \begin{bmatrix} g_{mq}(i_{mq})_0 & g_{mq}(i_{mq})_{-1} & \dots & g_{mq}(i_{mq})_{-h} & 0 \\ g_{mq}(i_{mq})_1 & g_{mq}(i_{mq})_0 & & & g_{mq}(i_{mq})_{-h} \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ g_{mq}(i_{mq})_h & & & g_{mq}(i_{mq})_0 & g_{mq}(i_{mq})_{-1} \\ 0 & g_{mq}(i_{mq})_h & \dots & g_{mq}(i_{mq})_1 & g_{mq}(i_{mq})_0 \end{bmatrix}, \quad (4.60)$$

$$\mathbf{g}_{md}(\mathbf{i}_{md})_h = \begin{bmatrix} g_{md}(i_{md})_0 & g_{md}(i_{md})_{-1} & \dots & g_{md}(i_{md})_{-h} & 0 \\ g_{md}(i_{md})_1 & g_{md}(i_{md})_0 & & & g_{md}(i_{md})_{-h} \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ g_{md}(i_{md})_h & & & g_{md}(i_{md})_0 & g_{md}(i_{md})_{-1} \\ 0 & g_{md}(i_{md})_h & \dots & g_{md}(i_{md})_1 & g_{md}(i_{md})_0 \end{bmatrix}, \quad (4.61)$$

La ecuación de la dinámica de la velocidad del rotor y la ecuación de par electromagnético tienen la misma forma que para el caso sin saturación. Reescribiendo estas ecuaciones,

$$\boldsymbol{\Omega}_{r_h} = \mathbf{S}^{-1} \left(\frac{N_p}{2J} \right) (\mathbf{T}_e - \mathbf{T}_L), \quad (4.62)$$

$$\mathbf{T}_e = \left(\frac{3N_p}{4} \right) (\boldsymbol{\Psi}_{ds_h} \mathbf{I}_{qs} - \boldsymbol{\Psi}_{qs_h} \mathbf{I}_{ds}). \quad (4.63)$$

Capítulo 5

5 OPERACIÓN EN VACÍO Y ROTOR BLOQUEADO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN

Para la determinación experimental de los parámetros de los motores eléctricos, comúnmente se utilizan las pruebas de operación en vacío y de rotor bloqueado. De la prueba en vacío, generalmente se determina la reactancia y la corriente de magnetización. Cuando se asume saturación lineal, reactancia constante, la corriente del rotor es cero y la corriente del estator es igual a la corriente de magnetización. Como se mostrará más adelante la saturación magnética arroja algunos resultados que no pueden ser observados cuando se desprecia la saturación y que pueden complicar la determinación real de los parámetros eléctricos debida a la presencia de componentes armónicos. La lectura de la potencia activa y de las corrientes del estator incluyen los efectos de los armónicos y no existe un valor único de reactancia de magnetización.

En la prueba a rotor bloqueado la corriente de magnetización es de un valor pequeño comparada con la del rotor. De esta manera la corriente del estator se supone igual a la del rotor. En este caso el motor opera en la parte lineal de la curva de saturación y la saturación no tiene influencia. En esta prueba juegan un papel importante las reactancias de dispersión del estator y del rotor.

Cuando el motor tiene carga acoplada de valor igual o menor de los valores nominales (de diseño), se puede decir que opera entre la operación en vacío y la operación de rotor bloqueado.

5.1 Operación en vacío en el dominio del tiempo

El régimen de operación en vacío del motor de inducción en estado estable, corresponde cuando la velocidad del rotor se hace que gire a la velocidad de sincronismo $\omega_r = \omega_s = 2\pi f$. Esto se logra con la ayuda de otra máquina acoplada al mismo eje del motor.

Cuando se desprecian los efectos de la saturación magnética, inductancias constantes, la corriente del rotor es igual a cero y la corriente de magnetización es igual a la del estator. No existe dinámica de las variables mecánicas, velocidad del rotor constante y par de carga igual a cero.

El voltaje equivalente de magnetización es prácticamente igual al voltaje aplicado en las terminales del motor, ya que la caída por efecto de la resistencia y de la reactancia de dispersión en el estator es pequeña. Esto significa que la corriente de magnetización de la prueba en vacío es de valor muy próximo a la corriente de magnetización nominal. Como las máquinas normalmente se diseñan para que operen en la parte no lineal de la curva de

saturación, se deberán generar componentes armónicos de valor muy cercano al de la condición nominal.

De esta prueba se obtendrán de valor muy aproximado las componentes armónicas cuando el motor se alimenta con el voltaje nominal. Es claro que cuando se desprecia la saturación, magnetización lineal, no aparecerán componentes armónicos. La energía de entrada es casi totalmente reactiva, útil para crear el campo magnético giratorio en el entrehierro (excitar el motor).

5.1.1 Operación en vacío cuando se desprecia la saturación magnética

Las ecuaciones de comportamiento eléctrico para la operación en vacío en el sistema de referencia dq , se obtienen de la ecuación (3.33) haciendo la velocidad del rotor igual a la de sincronismo $\omega_r = \omega_e = 2\pi f$ y son:

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} v_{qs} \\ v_{ds} \\ v_{qr} \\ v_{dr} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 & 0 \\ 0 & -\omega_e L_m & r_r & -\omega_e (L_{lr} + L_m) \\ \omega_e L_m & 0 & \omega_e (L_{lr} + L_m) & r_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix} + \\
 &+ \begin{bmatrix} L_{ls} + L_m & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_{ls} + L_m & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_{lr} + L_m & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_{lr} + L_m \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix}, \tag{5.1}
 \end{aligned}$$

en forma compacta,

$$\mathbf{v}_{qd} = \mathbf{R}_{qd} \mathbf{i}_{qd} + \mathbf{L}_{qd} p \mathbf{i}_{qd}, \tag{5.2}$$

donde,

$$\mathbf{R}_{qd} = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 & 0 \\ 0 & -\omega_e L_m & r_r & -\omega_e (L_{lr} + L_m) \\ \omega_e L_m & 0 & \omega_e (L_{lr} + L_m) & r_r \end{bmatrix}, \tag{5.3}$$

$$\mathbf{L}_{qd} = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_m & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_{ls} + L_m & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_{lr} + L_m & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_{lr} + L_m \end{bmatrix}. \tag{5.4}$$

En estado estable, para frecuencia fundamental y despreciando los efectos de la saturación se tiene que el operador $p = j\omega_e$ y $V_d = jV_q$, $I_d = jI_q$, sustituyendo en (5.2) resulta,

$$\begin{bmatrix} V_{qs} \\ V_{ds} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s + j\omega_e L_s & 0 \\ 0 & r_s + j\omega_e L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{qs} \\ I_{ds} \end{bmatrix}, \quad (5.5)$$

como $V_{qs} = V_a$, $I_{qs} = I_a$, $Z_s = r_s + j\omega_e L_s$,

$$\begin{bmatrix} V_{qs} \\ V_{ds} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_s & 0 \\ 0 & Z_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{qs} \\ I_{ds} \end{bmatrix}, \quad (5.6)$$

$$\mathbf{V}_s = \mathbf{Z}_s \mathbf{I}_s. \quad (5.7)$$

Esto significa que las corrientes del estator están desacopladas.

5.1.2 Operación en vacío cuando se incluye la saturación magnética.

Las ecuaciones de voltajes para el modelo en vacío se obtienen de la ecuación (3.57) haciendo $\omega_r = \omega_e = 2\pi f$ y tiene la forma,

$$\mathbf{v}_{qd} = \mathbf{R}_{qd}(\mathbf{i}_{qd}) \mathbf{i}_{qd} + \mathbf{L}_{dq}(\mathbf{i}_{qd}) p \mathbf{i}_{qd}, \quad (5.8)$$

donde,

$$\mathbf{R}_{qd}(\mathbf{i}_{qd}) = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 & 0 \\ 0 & -\omega_e L_{md}(i_{md}) & r_r & -\omega_e (L_{lr} + L_{md}(i_{md})) \\ \omega_e L_{mq}(i_{mq}) & 0 & \omega_e (L_{lr} + L_{mq}(i_{mq})) & r_r \end{bmatrix}, \quad (5.9)$$

$$\mathbf{L}_{dq}(\mathbf{i}_{qd}) = \begin{bmatrix} L_{ls} + g_{mq}(i_{mq}) & 0 & g_{mq}(i_{mq}) & 0 \\ 0 & L_{ls} + g_{md}(i_{md}) & 0 & g_{md}(i_{md}) \\ g_{mq}(i_{mq}) & 0 & L_{ls} + g_{mq}(i_{mq}) & 0 \\ 0 & g_{md}(i_{md}) & 0 & L_{lr} + L_{md}(i_{md}) \end{bmatrix}. \quad (5.10)$$

5.2 Operación a rotor bloqueado en dominio del tiempo

La operación a rotor bloqueado se obtiene cuando se impide que el rotor del motor gire, $\omega_r = 0$. La corriente del motor se incrementa considerablemente si éste es alimentado con su voltaje nominal, provocando daños a los devanados del motor. Por esta razón el voltaje de alimentación es de un valor tal que circulen las corrientes nominales en el estator.

5.2.1 Operación a rotor bloqueado cuando se desprecia la saturación magnética

Las ecuaciones de equilibrio para esta condición de operación es la expresada por (3.33), haciendo cero la velocidad del rotor $\omega_r = 0$, y tiene la forma,

$$\mathbf{v}_{qd} = \mathbf{R}_{qd} \mathbf{i}_{qd} + \mathbf{L}_{dq}(\mathbf{i}_{qd}) p \mathbf{i}_{qd}, \quad (5.11)$$

Donde las matriz \mathbf{R}_{qd} y \mathbf{L}_{dq} son,

$$\mathbf{R}_{qd} = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_r \end{bmatrix}, \quad \mathbf{L}_{dq} = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_{mq} & 0 & L_{mq} & 0 \\ 0 & L_{ls} + L_{md} & 0 & L_{md} \\ L_{mq} & 0 & L_{lr} + L_{mq} & 0 \\ 0 & L_{md} & 0 & L_{lr} + L_{md} \end{bmatrix}. \quad (5.12)$$

5.2.2 Operación a rotor bloqueado considerando saturación

Con esta condición los voltajes de rotor (3.55) y (3.56) se pueden reescribir como,

$$v_{qr} = r_r i_{qr} + (L_{lr} + g_{mq}(i_{mq})) p i_{qr} + g_{mq}(i_{mq}) p i_{qs}, \quad (5.13)$$

$$v_{dr} = r_r i_{dr} + (L_{lr} + g_{md}(i_{md})) p i_{dr} + g_{md}(i_{md}) p i_{ds}. \quad (5.14)$$

Por lo tanto, las ecuaciones de voltaje a rotor bloqueado para el caso no lineal son,

$$\mathbf{v}_{qd} = \mathbf{R}_{qd} \mathbf{i}_{qd} + \mathbf{L}_{dq}(\mathbf{i}_{qd}) p \mathbf{i}_{qd}, \quad (5.15)$$

donde,

$$\mathbf{R}_{qd} = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_r \end{bmatrix}, \quad (5.16)$$

$$\mathbf{L}_{dq} = \begin{bmatrix} L_{ls} + g_{mq}(i_{mq}) & 0 & g_{mq}(i_{mq}) & 0 \\ 0 & L_{ls} + g_{md}(i_{md}) & 0 & g_{md}(i_{md}) \\ g_{mq}(i_{mq}) & 0 & L_{lr} + g_{mq}(i_{mq}) & 0 \\ 0 & g_{md}(i_{md}) & 0 & L_{lr} + g_{md}(i_{md}) \end{bmatrix}. \quad (5.17)$$

5.3 Operación en vacío y rotor bloqueado en el dominio armónico

Las ecuaciones en el dominio del tiempo, descritas anteriormente de (5.1) a (5.17), se transforman al dominio armónico estático y se describen a continuación.

5.3.1 Operación en vacío cuando se desprecia la saturación magnética

Las corrientes del estator en el dominio armónico en estado estable se obtienen de la ecuación en tiempo (5.2) expresado en el dominio armónico y resulta

$$\mathbf{I}_{qds_h} = \left(\mathbf{L}_{qds_h} \mathbf{S} + \mathbf{R}_{qds_h} \right)^{-1} \mathbf{V}_{qds_h}, \quad (5.18)$$

donde \mathbf{I}_{qds_h} y \mathbf{V}_{qds_h} son los vectores con el contenido armónico de las corrientes y voltajes del estator, \mathbf{L}_{qds_h} y \mathbf{R}_{qds_h} son matrices con las inductancias propias y resistencias del estator respectivamente y \mathbf{S} es la matriz de diferenciación,

$$\mathbf{R}_{qds_h} = \begin{bmatrix} \mathbf{r}_{s_h} & \mathbf{O}_{HxH} & \mathbf{O}_{HxH} & \mathbf{O}_{HxH} \\ \mathbf{O}_{HxH} & \mathbf{r}_{s_h} & \mathbf{O}_{HxH} & \mathbf{O}_{HxH} \\ \mathbf{O}_{HxH} & -\mathbf{w}_{e_h} \mathbf{L}_{m_h} & \mathbf{r}_{r_h} & -\mathbf{w}_{e_h} \mathbf{L}_{r_h} \\ \mathbf{w}_{e_h} \mathbf{L}_{m_h} & \mathbf{O}_{HxH} & \mathbf{w}_{e_h} \mathbf{L}_{r_h} & \mathbf{r}_{r_h} \end{bmatrix}, \quad (5.19)$$

y,

$$\mathbf{r}_{s_h} = \text{diag} \left\{ r_{s_{-H}} \quad \dots \quad r_{s_{-1}} \quad r_{s_0} \quad r_{s_1} \quad \dots \quad r_{s_H} \right\}, \quad (5.20)$$

$$\mathbf{r}_{r_h} = \text{diag} \left\{ r_{r_{-H}} \quad \dots \quad r_{r_{-1}} \quad r_{r_0} \quad r_{r_1} \quad \dots \quad r_{r_H} \right\}, \quad (5.21)$$

$$\mathbf{w}_{e_h} = \text{diag} \left\{ \omega_{e_{-H}} \quad \dots \quad \omega_{e_{-1}} \quad \omega_{e_0} \quad \omega_{e_1} \quad \dots \quad \omega_{e_H} \right\}. \quad (5.22)$$

La matriz de inductancias se define,

$$\mathbf{L}_{qds_h} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{s_h} & \mathbf{O}_{HxH} & \mathbf{L}_{m_h} & \mathbf{O}_{HxH} \\ \mathbf{O}_{HxH} & \mathbf{L}_{s_h} & \mathbf{O}_{HxH} & \mathbf{L}_{m_h} \\ \mathbf{L}_{m_h} & \mathbf{O}_{HxH} & \mathbf{L}_{r_h} & \mathbf{O}_{HxH} \\ \mathbf{O}_{HxH} & \mathbf{L}_{m_h} & \mathbf{O}_{HxH} & \mathbf{L}_{r_h} \end{bmatrix}, \quad (5.23)$$

donde,

$$\mathbf{L}_{s_h} = \text{diag} \left\{ (L_{ls} + L_m)_{-H} \quad \dots \quad (L_{ls} + L_m)_{-1} \quad (L_{ls} + L_m)_0 \quad (L_{ls} + L_m)_1 \quad \dots \quad (L_{ls} + L_m)_H \right\}, \quad (5.24)$$

$$\mathbf{L}_{r_h} = \text{diag} \left\{ (L_{lr} + L_m)_{-H} \quad \dots \quad (L_{lr} + L_m)_{-1} \quad (L_{lr} + L_m)_0 \quad (L_{lr} + L_m)_1 \quad \dots \quad (L_{lr} + L_m)_H \right\}, \quad (5.25)$$

$$\mathbf{L}_{m_h} = \text{diag}\{L_{m_{-H}} \quad \dots \quad L_{m_{-1}} \quad L_{m_0} \quad L_{m_1} \quad \dots \quad L_{m_H}\}. \quad (5.26)$$

y \mathbf{S} es,

$$\mathbf{S} = \text{diag}\{\mathbf{z} \quad \mathbf{z} \quad \mathbf{z} \quad \mathbf{z}\}. \quad (5.27)$$

5.3.2 Operación a rotor bloqueado cuando se desprecia la saturación magnética

La ecuación algebraica en DA se obtiene de la ecuación en el dominio del tiempo (5.11) transformada al dominio armónico, la siguiente ecuación algebraica,

$$\mathbf{I}_{qd_h} = (\mathbf{L}_{qd_h} \mathbf{S} + \mathbf{R}_{qd_h})^{-1} \mathbf{V}_{qd_h}, \quad (5.28)$$

donde \mathbf{R}_{qd_h} es una matriz diagonal con valores de las resistencias de rotor y estator, mientras que \mathbf{L}_{qd_h} es la matriz que contiene las inductancias propias y mutuas,

$$\mathbf{R}_{qd_h} = \begin{bmatrix} \mathbf{r}_{s_h} & \mathbf{O}_{2H \times 2H} \\ \mathbf{O}_{2H \times 2H} & \mathbf{r}_h \end{bmatrix}, \quad (5.29)$$

donde,

$$\mathbf{r}_{s_h} = \text{diag}\{r_{s_{-2H}} \quad \dots \quad r_{s_{-1}} \quad r_{s_0} \quad r_{s_1} \quad \dots \quad r_{s_{2H}}\}, \quad (5.30)$$

$$\mathbf{r}_h = \text{diag}\{r_{r_{-2H}} \quad \dots \quad r_{r_{-1}} \quad r_{r_0} \quad r_{r_1} \quad \dots \quad r_{r_{2H}}\}, \quad (5.31)$$

La matriz de inductancias \mathbf{L}_{qd_h} es,

$$\mathbf{L}_{qd_h} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{s_h} & \mathbf{O}_{H \times H} & \mathbf{L}_{m_h} & \mathbf{O}_{H \times H} \\ \mathbf{O}_{H \times H} & \mathbf{L}_{s_h} & \mathbf{O}_{H \times H} & \mathbf{L}_{m_h} \\ \mathbf{L}_{m_h} & \mathbf{O}_{H \times H} & \mathbf{L}_{r_h} & \mathbf{O}_{H \times H} \\ \mathbf{O}_{H \times H} & \mathbf{L}_{m_h} & \mathbf{O}_{H \times H} & \mathbf{L}_{r_h} \end{bmatrix}, \quad (5.32)$$

donde las matrices \mathbf{L}_{s_h} , \mathbf{L}_{r_h} y \mathbf{L}_{m_h} son diagonales,

$$\mathbf{L}_{s_h} = \text{diag}\{(L_{ls} + L_m)_{-H} \quad \dots \quad (L_{ls} + L_m)_{-1} \quad (L_{ls} + L_m)_0 \quad (L_{ls} + L_m)_1 \quad \dots \quad (L_{ls} + L_m)_H\}, \quad (5.33)$$

$$\mathbf{L}_{r_h} = \text{diag}\{(L_{lr} + L_m)_{-H} \quad \dots \quad (L_{lr} + L_m)_{-1} \quad (L_{lr} + L_m)_0 \quad (L_{lr} + L_m)_1 \quad \dots \quad (L_{lr} + L_m)_H\}, \quad (5.34)$$

$$\mathbf{L}_{m_h} = \text{diag}\{L_{m_{-H}} \quad \dots \quad L_{m_{-1}} \quad L_{m_0} \quad L_{m_1} \quad \dots \quad L_{m_H}\}. \quad (5.35)$$

5.3.3 Operación en vacío considerando saturación

El modelo en DA cuando se incluye la saturación magnética se obtiene del modelo en el tiempo (5.8) transformada al dominio armónico y tiene la forma,

$$\mathbf{I}_{qd_h} = \left(\mathbf{L}_{dq_h}(\mathbf{i}_{mq_d_h}) \mathbf{S} - \mathbf{R}_{qd_h}(\mathbf{i}_{mq_d_h}) \right)^{-1} \mathbf{V}_{qd_h}, \quad (5.36)$$

donde,

$$\mathbf{R}_{qd_h}(\mathbf{i}_{mq_d_h}) = \begin{bmatrix} \mathbf{r}_{s_h} & \mathbf{O}_{H \times H} & \mathbf{O}_{H \times H} & \mathbf{O}_{H \times H} \\ \mathbf{O}_{H \times H} & \mathbf{r}_{s_h} & \mathbf{O}_{H \times H} & \mathbf{O}_{H \times H} \\ \mathbf{O}_{H \times H} & -\mathbf{w}_{e_h} \mathbf{L}_{md}(i_{md})_h & \mathbf{r}_{r_h} & -\mathbf{w}_{e_h} \mathbf{L}_{md}(i_{md})_h \\ \mathbf{w}_{e_h} \mathbf{L}_{mq}(i_{mq})_h & \mathbf{O}_{H \times H} & \mathbf{w}_{e_h} \mathbf{L}_{mq}(i_{mq})_h & \mathbf{r}_{r_h} \end{bmatrix}, \quad (5.37)$$

en donde las matrices \mathbf{r}_{s_h} y \mathbf{r}_{r_h} son matrices diagonales de orden $H \times H$ de las resistencias de estator y rotor,

$$\mathbf{r}_{s_h} = \text{diag} \{ r_{s_{-H}} \quad \dots \quad r_{s_{-1}} \quad r_{s_0} \quad r_{s_1} \quad \dots \quad r_{s_H} \}, \quad (5.38)$$

$$\mathbf{r}_{r_h} = \text{diag} \{ r_{r_{-H}} \quad \dots \quad r_{r_{-1}} \quad r_{r_0} \quad r_{r_1} \quad \dots \quad r_{r_H} \}, \quad (5.39)$$

mientras que $\mathbf{L}_{mq}(i_{mq})_h$, $\mathbf{L}_{md}(i_{md})_h$ y \mathbf{w}_{e_h} son matrices tipo Toeplitz,

$$\mathbf{L}_{mq}(i_{mq})_h = \begin{bmatrix} L_{mq}(i_{mq})_0 & L_{mq}(i_{mq})_{-1} & \dots & L_{mq}(i_{mq})_{-h} & 0 \\ L_{mq}(i_{mq})_1 & L_{mq}(i_{mq})_0 & & & L_{mq}(i_{mq})_{-h} \\ \vdots & & & & \vdots \\ L_{mq}(i_{mq})_h & & & L_{mq}(i_{mq})_0 & L_{mq}(i_{mq})_{-1} \\ 0 & L_{mq}(i_{mq})_h & \dots & L_{mq}(i_{mq})_1 & L_{mq}(i_{mq})_0 \end{bmatrix}, \quad (5.40)$$

$$\mathbf{L}_{md}(i_{md})_h = \begin{bmatrix} L_{md}(i_{md})_0 & L_{md}(i_{md})_{-1} & \dots & L_{md}(i_{md})_{-h} & 0 \\ L_{md}(i_{md})_1 & L_{md}(i_{md})_0 & & & L_{md}(i_{md})_{-h} \\ \vdots & & & & \vdots \\ L_{md}(i_{md})_h & & & L_{md}(i_{md})_0 & L_{md}(i_{md})_{-1} \\ 0 & L_{md}(i_{md})_h & \dots & L_{md}(i_{md})_1 & L_{md}(i_{md})_0 \end{bmatrix}, \quad (5.41)$$

$$\mathbf{w}_{e_h} = \begin{bmatrix} \omega_{e_0} & \omega_{e_{-1}} & \cdots & \omega_{e_{-h}} \\ \omega_{e_1} & \omega_{e_0} & & \omega_{e_{-h}} \\ \vdots & & & \vdots \\ \omega_{e_h} & & \omega_{e_0} & \omega_{e_{-1}} \\ & \omega_{e_h} & \cdots & \omega_{e_1} & \omega_{e_0} \end{bmatrix}. \quad (5.42)$$

La matriz de inductancias $\mathbf{L}_{q_d h}(\mathbf{i}_{m_{qd}})$ está definida como,

$$\mathbf{L}_{q_d h}(\mathbf{i}_{m_{qd}}) = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{l_s h} + \mathbf{g}_{m_q}(\mathbf{i}_{m_q})_h & \mathbf{O}_{H \times H} & \mathbf{g}_{m_q}(\mathbf{i}_{m_q})_h & \mathbf{O}_{H \times H} \\ \mathbf{O}_{H \times H} & \mathbf{L}_{l_s h} + \mathbf{g}_{m_d}(\mathbf{i}_{m_d})_h & \mathbf{O}_{H \times H} & \mathbf{g}_{m_d}(\mathbf{i}_{m_d})_h \\ \mathbf{g}_{m_q}(\mathbf{i}_{m_q})_h & \mathbf{O}_{H \times H} & \mathbf{L}_{l_r h} + \mathbf{g}_{m_q}(\mathbf{i}_{m_q})_h & \mathbf{O}_{H \times H} \\ \mathbf{O}_{H \times H} & \mathbf{g}_{m_d}(\mathbf{i}_{m_d})_h & \mathbf{O}_{H \times H} & \mathbf{L}_{l_r h} + \mathbf{g}_{m_d}(\mathbf{i}_{m_d})_h \end{bmatrix}, \quad (5.43)$$

donde,

$$\mathbf{L}_{l_s h} = \text{diag}\{L_{l_s -H} \quad \cdots \quad L_{l_s -1} \quad L_{l_s 0} \quad L_{l_s 1} \quad \cdots \quad L_{l_s H}\}, \quad (5.44)$$

$$\mathbf{L}_{l_r h} = \text{diag}\{L_{l_r -H} \quad \cdots \quad L_{l_r -1} \quad L_{l_r 0} \quad L_{l_r 1} \quad \cdots \quad L_{l_r H}\}, \quad (5.45)$$

y,

$$\mathbf{g}_{m_q}(\mathbf{i}_{m_q})_h = \begin{bmatrix} g_{m_q}(i_{m_q})_0 & g_{m_q}(i_{m_q})_{-1} & \cdots & g_{m_q}(i_{m_q})_{-h} & 0 \\ g_{m_q}(i_{m_q})_1 & g_{m_q}(i_{m_q})_0 & & & g_{m_q}(i_{m_q})_{-h} \\ \vdots & & & & \vdots \\ g_{m_q}(i_{m_q})_h & & g_{m_q}(i_{m_q})_0 & g_{m_q}(i_{m_q})_{-1} & \\ 0 & g_{m_q}(i_{m_q})_h & \cdots & g_{m_q}(i_{m_q})_1 & g_{m_q}(i_{m_q})_0 \end{bmatrix}, \quad (5.46)$$

$$\mathbf{g}_{m_d}(\mathbf{i}_{m_d})_h = \begin{bmatrix} g_{m_d}(i_{m_d})_0 & g_{m_d}(i_{m_d})_{-1} & \cdots & g_{m_d}(i_{m_d})_{-h} & 0 \\ g_{m_d}(i_{m_d})_1 & g_{m_d}(i_{m_d})_0 & & & g_{m_d}(i_{m_d})_{-h} \\ \vdots & & & & \vdots \\ g_{m_d}(i_{m_d})_h & & g_{m_d}(i_{m_d})_0 & g_{m_d}(i_{m_d})_{-1} & \\ 0 & g_{m_d}(i_{m_d})_h & \cdots & g_{m_d}(i_{m_d})_1 & g_{m_d}(i_{m_d})_0 \end{bmatrix}. \quad (5.47)$$

La ecuación de la dinámica de la velocidad del rotor y la ecuación de par electromagnético tienen la misma forma que para el caso sin saturación. Reescribiendo estas ecuaciones,

$$\dot{\Omega}_r = \left(\frac{N_p}{2J} \right) (\mathbf{T}_e - \mathbf{T}_L) - \mathbf{S} \Omega_r, \quad (5.48)$$

$$\mathbf{T}_e = \left(\frac{3P}{4} \right) (\Psi_{ds_h} \mathbf{I}_{qs} - \Psi_{qs_h} \mathbf{I}_{ds}). \quad (5.49)$$

5.3.4 Operación a rotor bloqueado considerando saturación

El modelo de DA se obtiene a partir del modelo en el tiempo (5.15) transformándola al dominio armónico, teniendo en consideración que la velocidad del rotor es igual a cero,

$$\mathbf{I}_{qd_h} = \left(\mathbf{L}_{qd_h} \left(\mathbf{i}_{m_{qd_h}} \right) \mathbf{S} - \mathbf{R}_{qd_h} \right)^{-1} \mathbf{V}_{qd_h}, \quad (5.50)$$

donde \mathbf{R}_{qd_h} es la misma que para el caso cuando se desprecia la saturación magnética (5.29), mientras que \mathbf{L}_{qd_h} es la misma matriz de la operación en vacío con saturación magnética (5.43).

Capítulo 6

6 RESULTADOS

En este capítulo se muestran los resultados y análisis de la operación del motor de inducción cuando se incluye y cuando se desprecia la saturación. Para esto se desarrollaron e implementaron programas en el dominio del tiempo y en el dominio armónico en Código de Matlab. Se consideran los siguientes casos de estudio:

- i. Operación del motor en vacío $\omega_r = \omega_s$, estado estable
- ii. Operación del motor a rotor bloqueado $\omega_r = 0$, estado estable
 - Voltaje nominal
 - Voltaje de cortocircuito
- iii. Operación sin carga $T_L = 0$
 - Arranque
 - Estado estable
- iv. Operación con carga nominal $T_L = 1.7896 \text{ N} \cdot \text{m}$
 - Arranque
 - Estado estable

En todos los casos de estudio el motor se alimenta con el voltaje nominal, con excepción de la operación a rotor bloqueado.

Se analiza el comportamiento del motor cuando se incluye y no se incluye el efecto de saturación magnética.

Se utilizan las técnicas en el dominio del tiempo y en el dominio armónico estático y dinámico.

Se muestran los resultados en estado estable cuando se utilizan los modelos en el dominio del tiempo y en el dominio armónico en donde se muestran los armónicos y sus efectos en las variables más importantes. Los resultados se muestran en gráficas en función del tiempo y los armónicos en estado estable, en forma tabular.

Los resultados en el dominio armónico se convierten al dominio del tiempo aplicando la transformada inversa de Fourier, para de esta forma verificar los resultados con la comparación con la técnica en el dominio del tiempo.

En el estudio en dominio armónico se analiza hasta la séptima armónica $h = 7$, ya que se asume que armónicas mayores a ésta no tienen relevancia para la reconstrucción de señales en dominio del tiempo DT.

Se considera un motor de inducción trifásico balanceado de 3 hp, con voltaje nominal línea a línea de 415V, 50 Hz, 4 polos y velocidad nominal de 1250 rpm. Los parámetros se indican en el apéndice B.

6.1 Voltajes de entrada

Los voltajes de entrada del estator utilizados en las simulaciones se asumen senoidales puras (sin armónicos), en coordenadas en ABC son,

$$\begin{aligned} v_{as} &= V_m \cos(\omega_s t) \\ v_{bs} &= V_m \cos\left(\omega_s t - \frac{2\pi}{3}\right), \\ v_{cs} &= V_m \cos\left(\omega_s t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (6.1)$$

donde V_m es el voltaje pico de la señal y ω_s es la frecuencia fundamental del sistema. Los voltajes de rotor son cero,

$$v_{ar} = v_{br} = v_{cr} = 0 \quad (6.2)$$

Estos voltajes se representan en su serie de Fourier en el análisis en DA y tienen la forma como se indica por los siguientes vectores,

$$\begin{aligned} V_{\omega_s} &= \frac{1}{2} V_m [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \\ V_{3\omega_s} &= \frac{1}{2} V_m \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e^{-i\frac{2\pi}{3}} & 0 & e^{i\frac{2\pi}{3}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \\ V_{5\omega_s} &= \frac{1}{2} V_m \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e^{i\frac{2\pi}{3}} & 0 & e^{-i\frac{2\pi}{3}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \end{aligned} \quad (6.3)$$

Los vectores de las variables en el dominio armónico: corrientes, voltajes, flujos, pares y velocidad son vectores de dimensión $2h+1=15$.

Los voltajes del rotor son de valor cero,

$$V_{ar_s} = V_{br_s} = V_{cr_s} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \quad (6.4)$$

En la Figura 6.1 se muestran las señales de voltaje del estator en el dominio del tiempo, en donde se puede observar el desplazamiento de 120° entre fases, que corresponde a voltajes trifásicos balanceados.

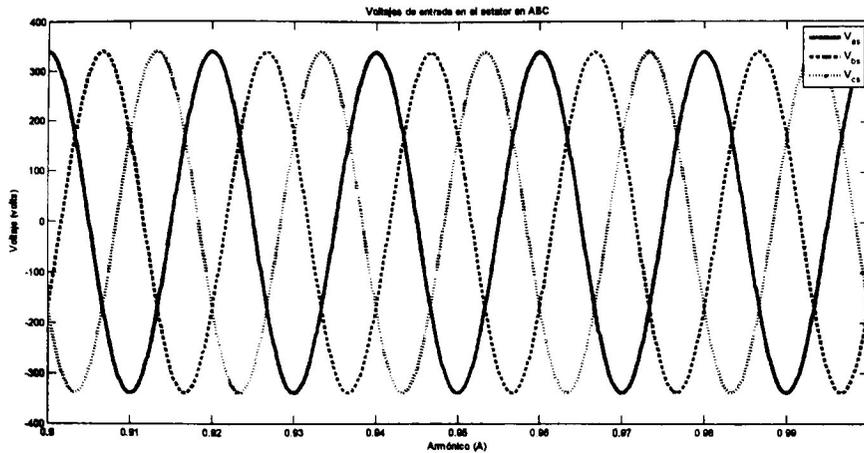


Figura 6.1 Voltajes de estator en coordenadas ABC

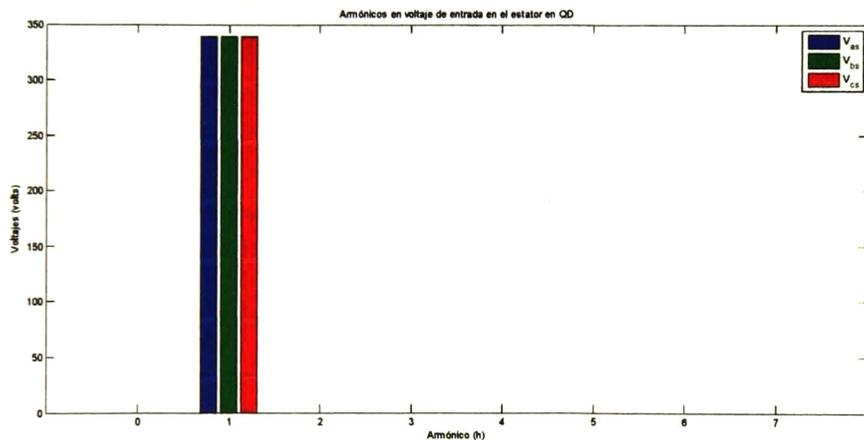


Figura 6.2 Contenido armónico de los voltajes de estator de entrada en ABC

En la Figura 6.2 se muestra el contenido armónico de las señales de voltaje de entrada, en donde se observa sólo la componente fundamental.

Los voltajes de estator en qd se obtienen de la transformación de los voltajes en ABC utilizando la transformada de Park [17],

$$\begin{aligned} v_{qs} &= V_m \cos(\omega_s t) \\ v_{ds} &= -V_m \sin(\omega_s t) \end{aligned} \quad (6.5)$$

La representación armónica de estos voltajes (6.5) se expresa vectorialmente como,

$$V_{qs_h} = \frac{1}{2} V_m [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

$$V_{ds_h} = -\frac{1}{j2} V_m [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ -1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$$
(6.6)

Las gráficas de voltaje de estator en la referencia 'qd' se muestran en la Figura 6.3. Se observa que el voltaje en el eje 'q' es igual al voltaje de la fase 'A', mientras que el voltaje 'd' se encuentra 90° grados adelantado con respecto a 'q'.

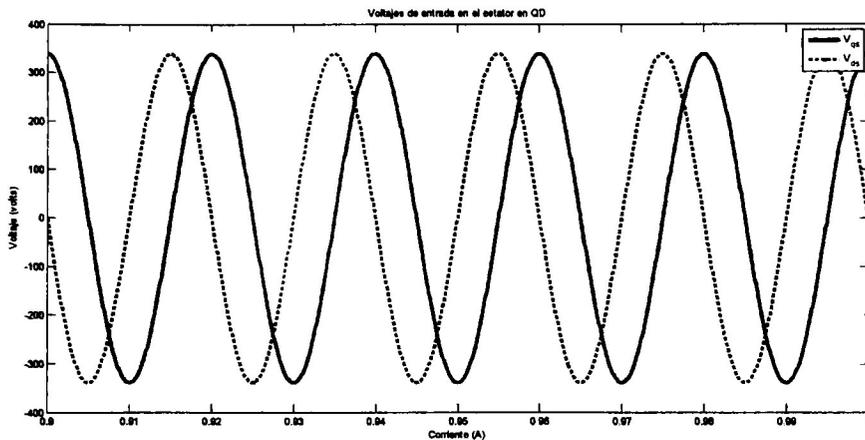


Figura 6.3 Voltajes en el estator en referencia qd

El contenido armónico de las señales de estator en referencia 'qd' se muestra en la Figura 6.4.

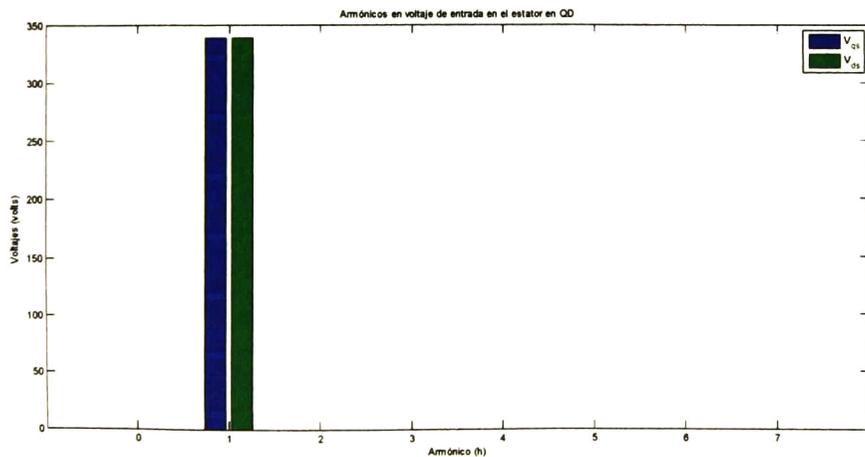


Figura 6.4 Contenido armónico de los voltajes de estator en referencia qd

6.2 Operación en vacío

6.2.1 Caso cuando se desprecia la saturación magnética

En la Figura 6.5 se muestran las corrientes de estator del motor de inducción en estado estable para operación en vacío cuando no se considera saturación, en el dominio del tiempo y en el dominio armónico. Las señales son iguales y no se aprecia deformación en las señales (senoidales puras) sin contaminación armónica con valor pico de 2.844 A.

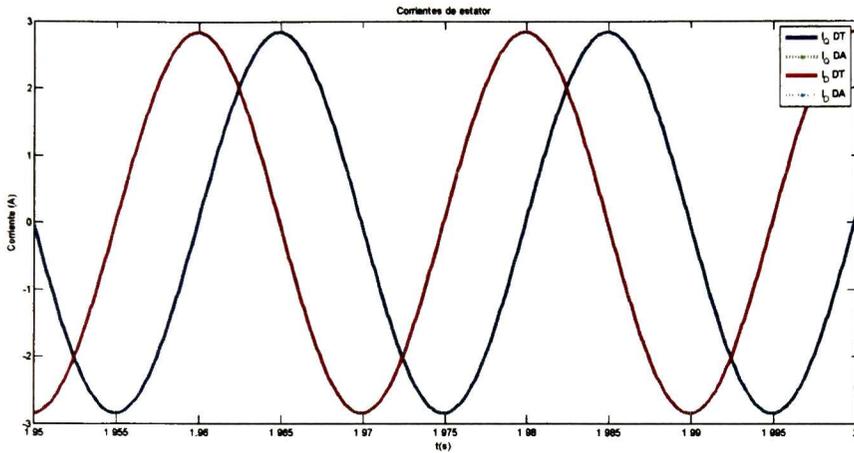


Figura 6.5 Corrientes del estator NS, operación en vacío

Las corrientes del rotor son cero (Figura 6.6); cuando el rotor tiene la velocidad sincrónica se comporta como circuito abierto.

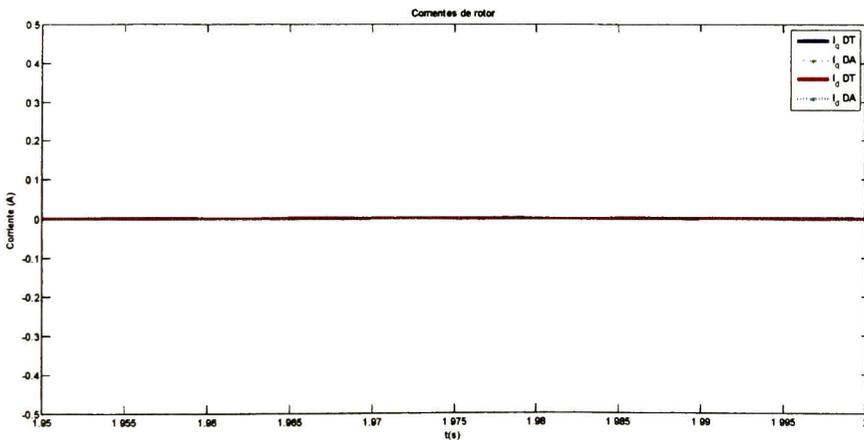


Figura 6.6 Corrientes en rotor NS, operación en vacío

Los enlaces de flujo en el estator se muestran en la Figura 6.7 y en la Figura 6.8 para el rotor. Se aprecian señales senoidales sin deformación con valor pico de 1.078 Wb para los enlaces de flujo de estator y 1.034 Wb para los enlaces de flujo del rotor.

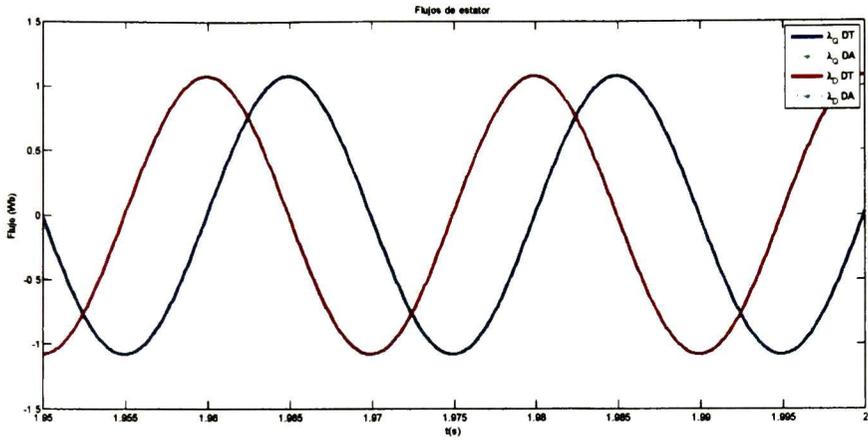


Figura 6.7 Flujos de estator NS, operación en vacío

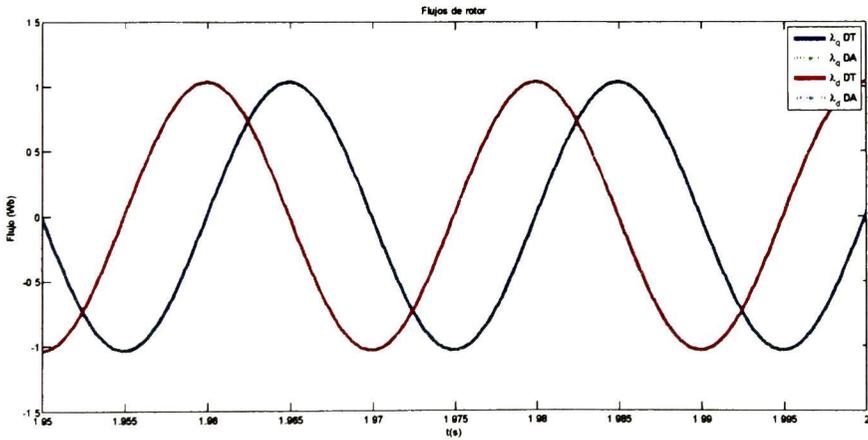


Figura 6.8 Flujos de rotor NS, operación en vacío

El par electromagnético (Figura 6.9) es cero,

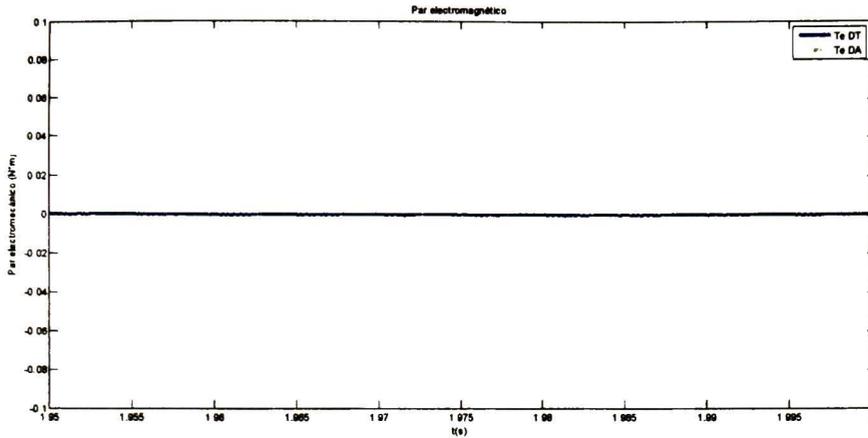


Figura 6.9 Par electromagnético para NS, operación en vacío

En la Tabla 6.1 y en la Figura 6.10 se muestra el error entre las variables en el dominio del tiempo DT y en el dominio armónico DA. Éstas son prácticamente cero. Las pequeñas diferencias son debidas a los errores de redondeo en las transformaciones del dominio armónico al dominio del tiempo.

Tabla 6.1. Diferencia entre las señales del DT y DA para el caso NS, operación en vacío

	i_{qs} (A)	i_{ds} (A)	i_{qr} (A)	i_{dr} (A)	λ_{qs} (Wb)	λ_{ds} (Wb)	λ_{qr} (Wb)	λ_{dr} (Wb)	T_e (N·m)
Diferencia	0.0004	0.0003	5e-6	5e-6	4e-8	4e-8	1.1e-7	5e-8	1.5e-5

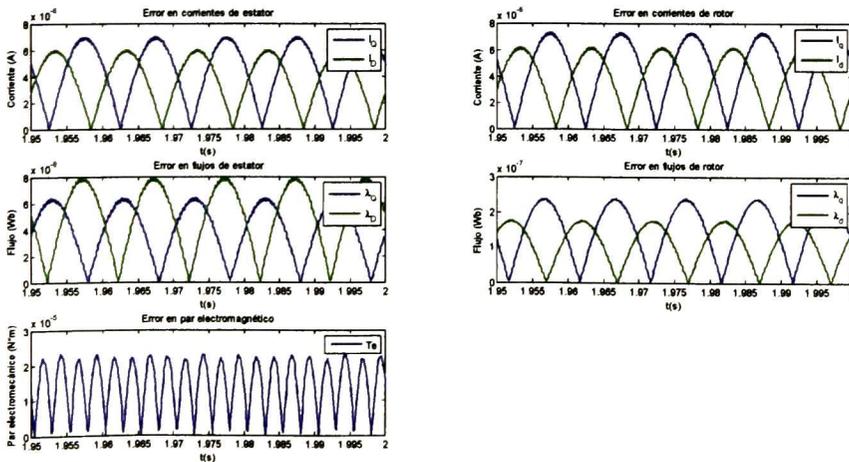


Figura 6.10 Diferencia entre el DT y DA NS, operación en vacío

6.2.2 Resultados incluyendo saturación magnética.

En la Figura 6.11 se muestran las corrientes del estator cuando se incluye la saturación magnética. Se observa deformación en los valores picos positivos respecto de los negativos, hay además, una pequeña componente de corriente directa (offset) que desplazó la referencia a un valor diferente de cero. El valor pico positivo de las corrientes es de 3.193 A mientras que el valor pico negativo es de -2.881 A.

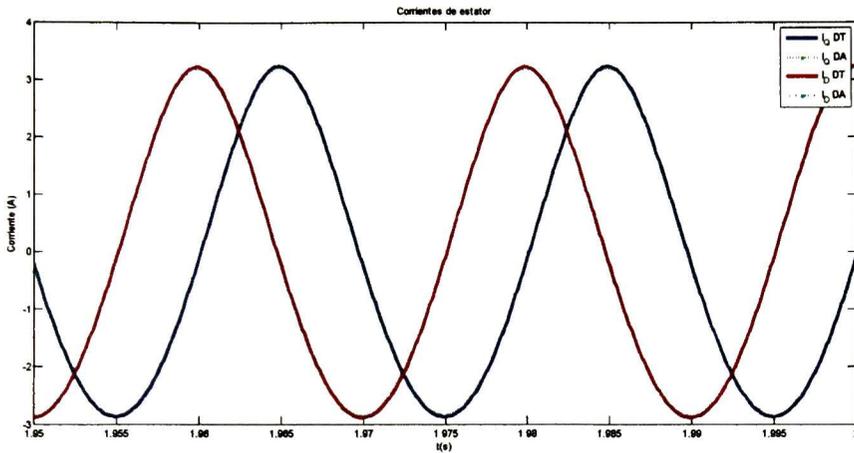


Figura 6.11 Corrientes de estator CS, operación en vacío

Las corrientes de rotor (Figura 6.12), tienen un valor máximo de .5 A y mínimo de .1584 A.

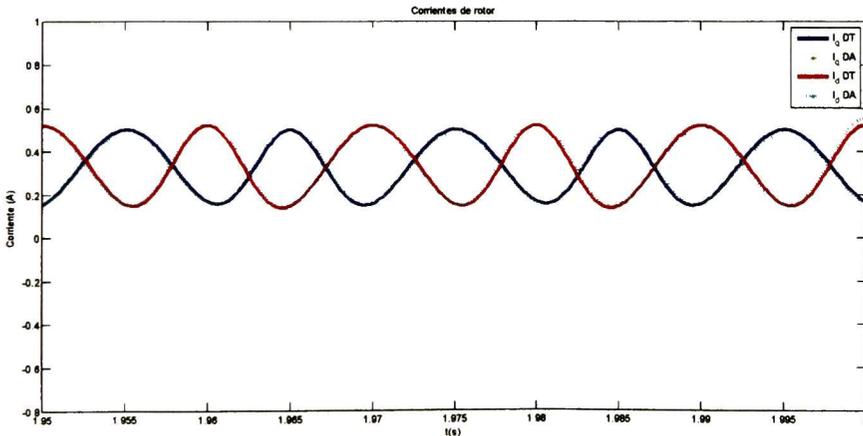


Figura 6.12 Corrientes de rotor CS, operación en vacío

En la Figura 6.13 se muestra una comparación de las corrientes de estator, rotor y de magnetización.

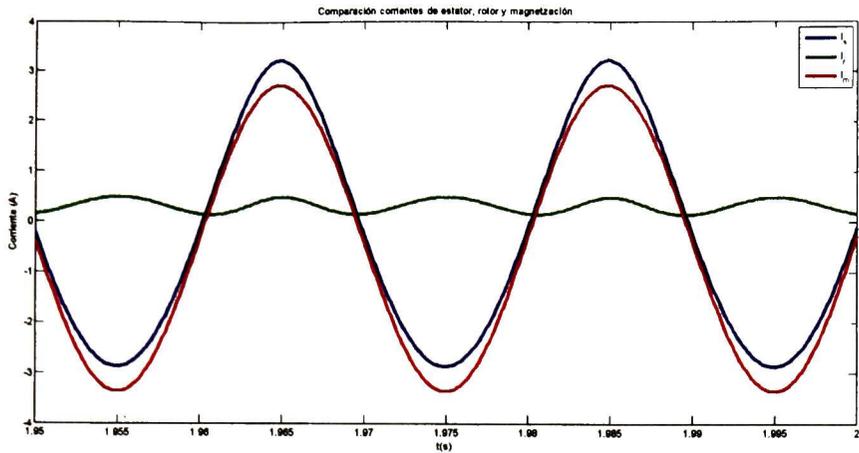


Figura 6.13 Corrientes de estator, rotor y magnetización CS, operación en vacío

Los enlaces de flujo de estator (Figura 6.14) y del rotor (Figura 6.15), se ven afectados por un valor de valor constante que mueve la referencia cero de las variables. Los valores picos de los enlaces de flujo del estator son de -1.082 Wb y 1.074 mientras que para los enlaces de flujo del rotor son de -1.033 y 1.033 Wb.

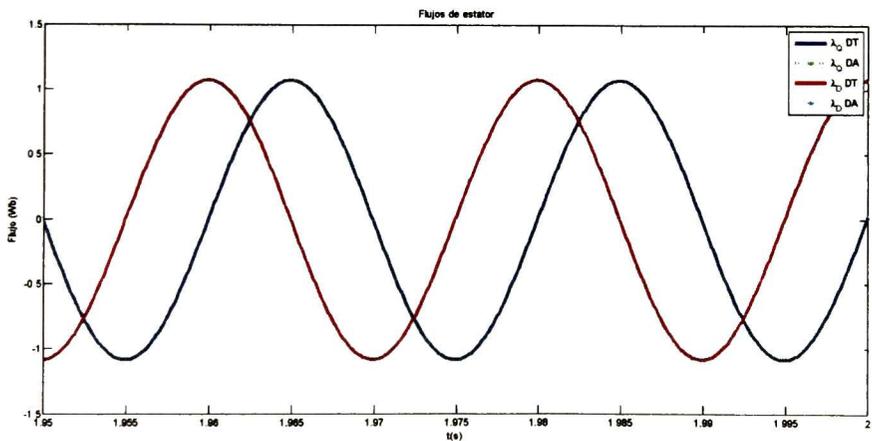


Figura 6.14 Enlaces de flujo del estator CS, operación en vacío

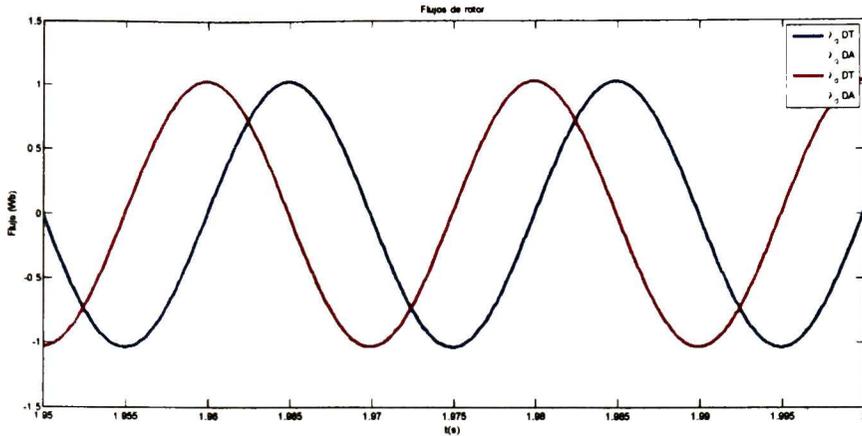


Figura 6.15 Enlaces de flujo de rotor CS, operación en vacío

La corriente y el enlace flujo de magnetización se muestran en la Figura 6.16 y Figura 6.17, en la corriente de magnetización se puede apreciar la presencia de armónicos ya que la curva no es puramente senoidal, ésta tiene valor máximo de 3.73 A y mínimo de -2.366 A, mientras que el enlace de flujo de magnetización es senoidal, con una pequeña componente de directa presente; el valor máximo de esta señal es de 1.022Wb y -1.038 Wb el mínimo.

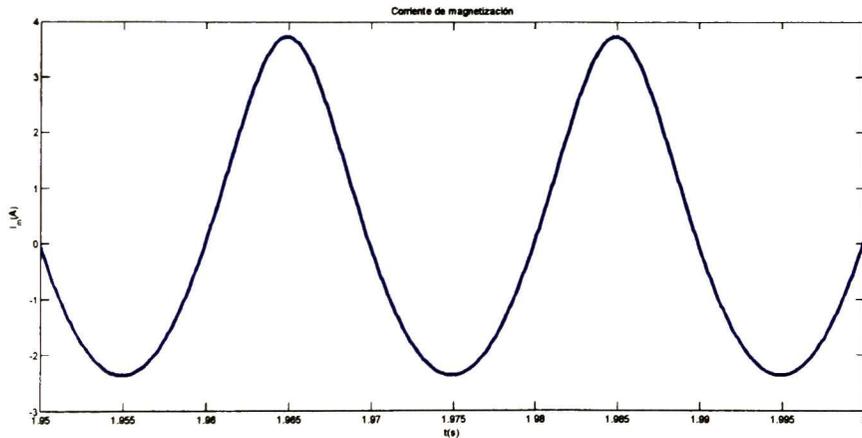


Figura 6.16 Corriente de magnetización CS, operación en vacío

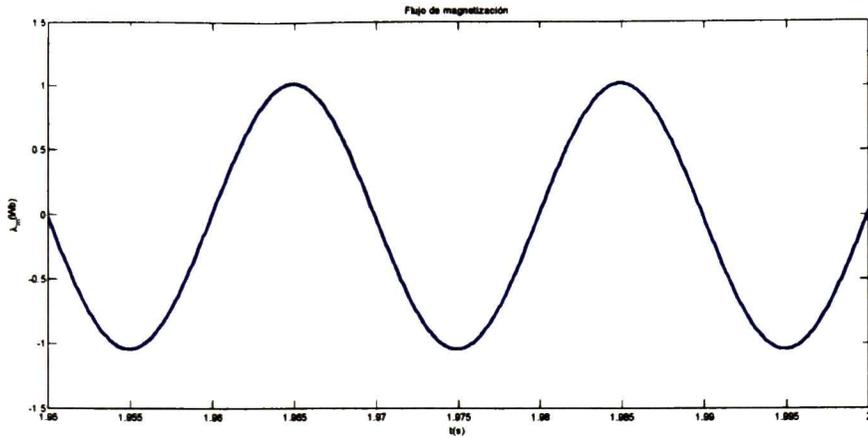


Figura 6.17 Enlace de flujo de magnetización CS, operación en vacío

La curva de magnetización en operación en vacío es generada a partir de las corrientes y enlaces de flujo de magnetización de la simulación en vacío, Figura 6.18.

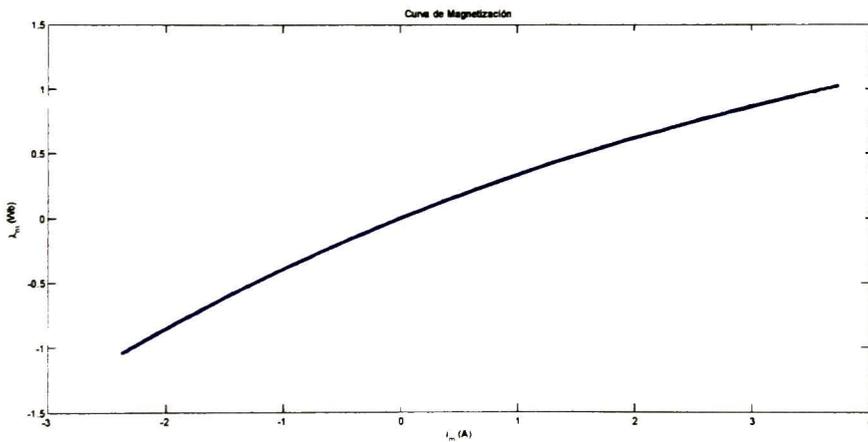


Figura 6.18 Curva de magnetización, operación en vacío

El par electromagnético Figura 6.19 refleja el efecto de la saturación magnética. Se aprecia una deformación en la señal aunque su valor medio sea de valor cero. Se observan componentes armónicos y valor pico que fluctúan entre -0.622 a 0.6076 N*m.

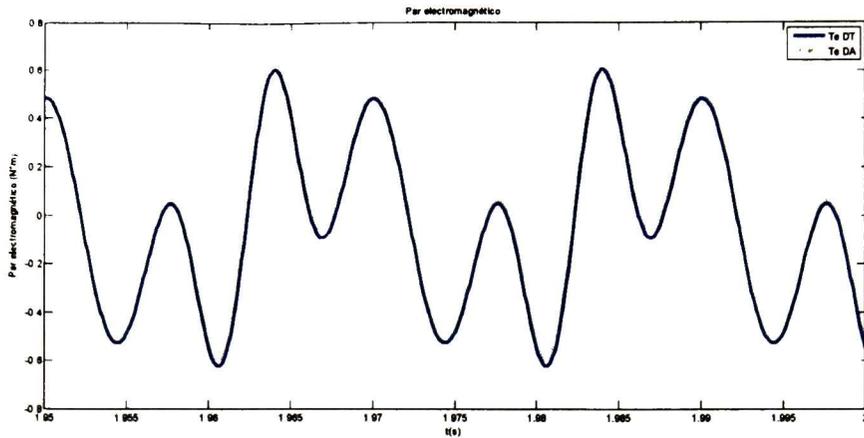


Figura 6.19 Par electromagnético CS, operación en vacío

En la Tabla 6.2 se muestra el error entre las señales en DT y DA, del motor de inducción en operación en vacío incluyendo la saturación magnética, para cada una de las variables de interés.

Tabla 6.2. Diferencia entre las señales del DT y DA para el caso CS, operación en vacío

	i_{qs} (A)	i_{ds} (A)	i_{qr} (A)	i_{dr} (A)	λ_{qs} (Wb)	λ_{ds} (Wb)	λ_{qr} (Wb)	λ_{dr} (Wb)	T_e (N·m)
Diferencia	0.0055	0.0308	0.0067	0.0324	0.0004	1.0442	0.0006	1.0442	0.0237

En la Figura 6.20 se muestran las diferencias indicados en la Tabla 6.2 en forma gráfica.

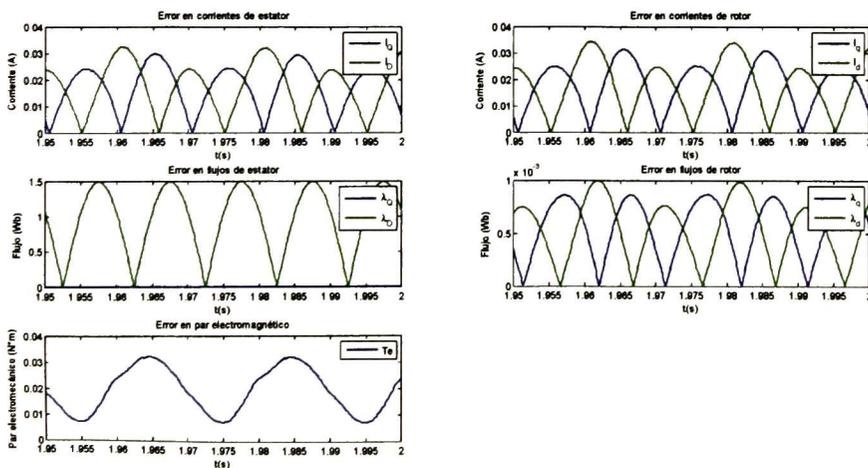


Figura 6.20 Diferencias entre el DT y DA CS, operación en vacío

En la Tabla 6.3 se muestran, en forma resumida los valores picos y medios de las variables indicadas.

Tabla 6.3. Comparación de los valores máximos, mínimos y medios de las variables para el caso SS y CS

Dominio del Tiempo						
	Sin saturación			Saturada		
	Valor pico máx	Valor pico min	Valor medio	Valor pico máx	Valor pico min	Valor medio
$I_{qs}(A)$	2.844	-2.844	0	3.193	-2.881	0.312
$I_{ds}(A)$	2.844	-2.844	0	3.193	-2.881	0.312
$I_{qr}(A)$	0	0	0	0.5	0.1584	0.3292
$I_{dr}(A)$	0	0	0	0.5	0.1584	0.3292
$I_m(A)$	--	--	--	3.73	-2.366	0.682
$\lambda_{qs}(Wb)$	1.078	-1.078	0	1.074	-1.082	4e-3
$\lambda_{ds}(Wb)$	1.078	-1.078	0	1.074	-1.082	4e-3
$\lambda_{qr}(Wb)$	1.034	-1.034	0	1.033	-1.033	0
$\lambda_{dr}(Wb)$	1.034	-1.034	0	1.033	-1.033	0
$\lambda_m(Wb)$	--	--	--	1.022	-1.038	-8e-3
$T_e(Nm)$	0	0	0	0.6076	-0.622	0.027
$\omega_r(rpm)$	--	--	--	--	--	--

En esta tabla podemos observar que para el caso sin saturación el valor medio de todas las variables es cero y las variables tienen forma de senoidal pura. Mientras que con saturación el valor máximo es diferente al valor mínimo y tienen un valor medio diferente de cero.

6.2.3 Contenido armónico entre el caso de magnetización sin saturación y con saturación magnética

A continuación se muestran los contenidos armónicos, de las señales más importantes, cuando se considera y no la saturación magnética. El contenido armónico de las corrientes de estator se muestra a continuación.

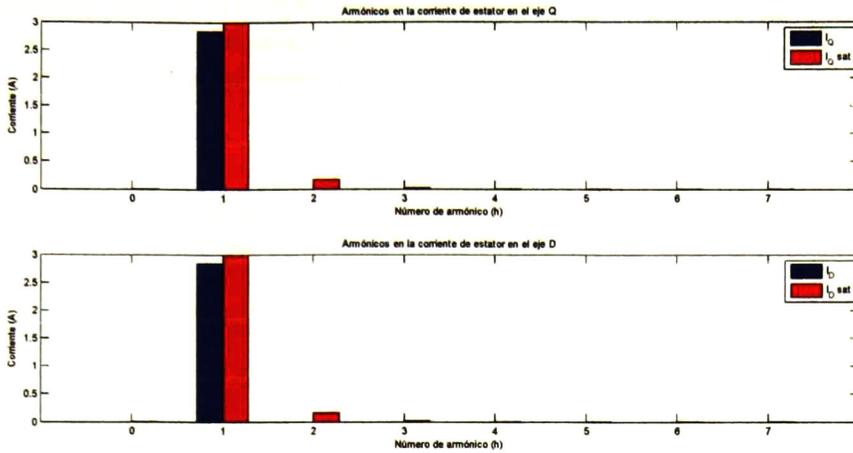


Figura 6.21 Comparación del contenido armónico de las corrientes de estator cuando se incluye y se desprecia la saturación, operación en vacío

En la Figura 6.21 se puede observar que la magnitud del primer armónico para la señal sin saturación (azul) es un poco menor en comparación con la que sí incluye saturación (rojo). Además, para el caso con saturación (aunque de valor pequeño) aparecen la segunda y la tercera armónica.

En la Figura 6.22 se observa el contenido armónico de las corrientes de rotor donde para el caso sin saturación no existen armónicos ya que la corriente es cero, mientras que para el caso con saturación existe la componente de directa, así como la segunda, tercer y cuarta armónica.

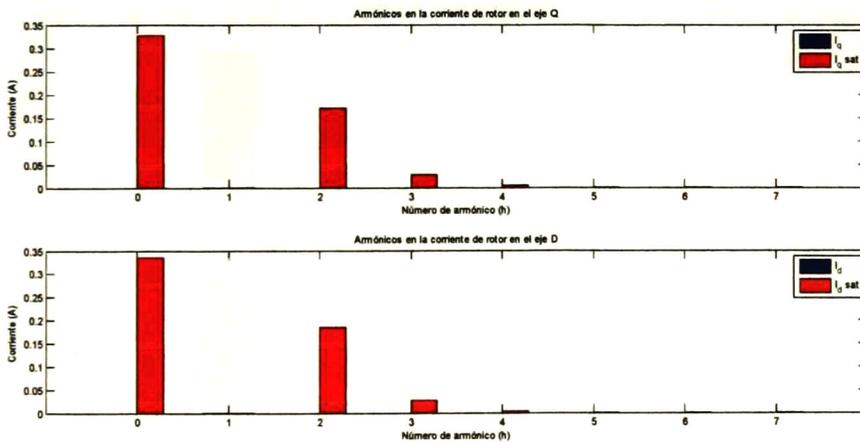


Figura 6.22 Comparación del contenido armónico de las corrientes de rotor cuando se incluye y se desprecia la saturación, operación en vacío

El contenido armónico de la corriente de magnetización se muestra en la Figura 6.23 donde se puede apreciar que la presencia de componentes armónicos que van decreciendo en magnitud según el orden del armónico. Es notoria la mayor magnitud de la componente fundamental.

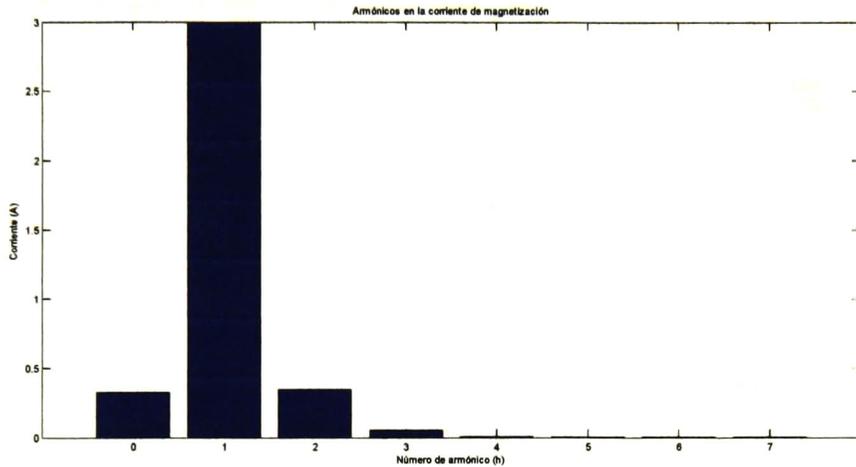


Figura 6.23 Contenido armónico de la corriente de magnetización para el caso con saturación

En los enlaces de flujo de estator (Figura 6.24) y del rotor (Figura 6.25), el valor de la fundamental es la misma para los casos con saturación y sin saturación. Se aprecia que los enlaces de flujo no contienen armónicos, mientras que las corrientes presentan componentes armónicos.

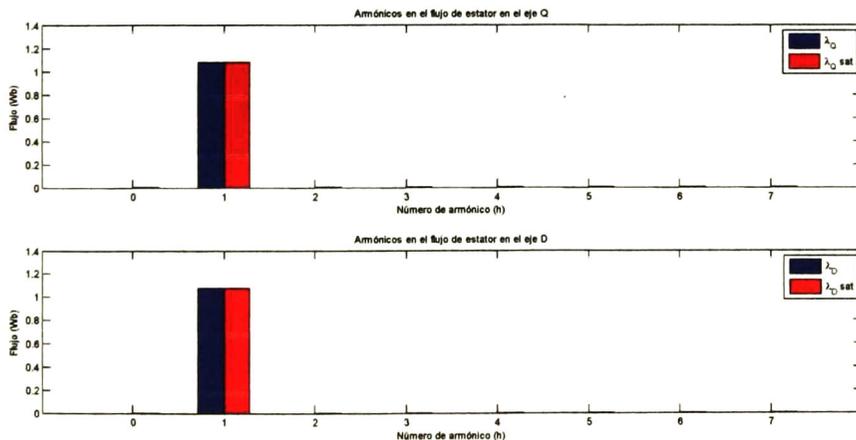


Figura 6.24 Comparación del contenido armónico de los flujos de estator cuando se incluye y no se incluye la saturación, operación en vacío

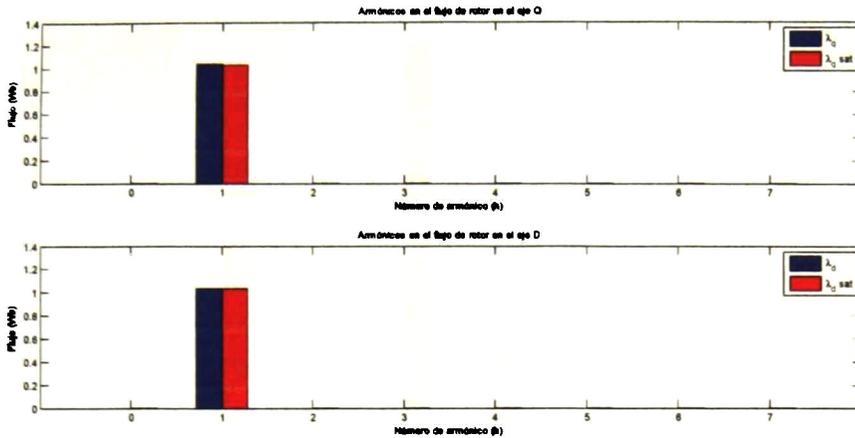


Figura 6.25 Comparación del contenido armónico de los flujos de rotor cuando se incluye y se desprecia la saturación, operación en vacío

El enlace de flujo de magnetización oscila a la frecuencia fundamental, y contiene una pequeña componente de directa, así como de la segunda a la quinta armónica.

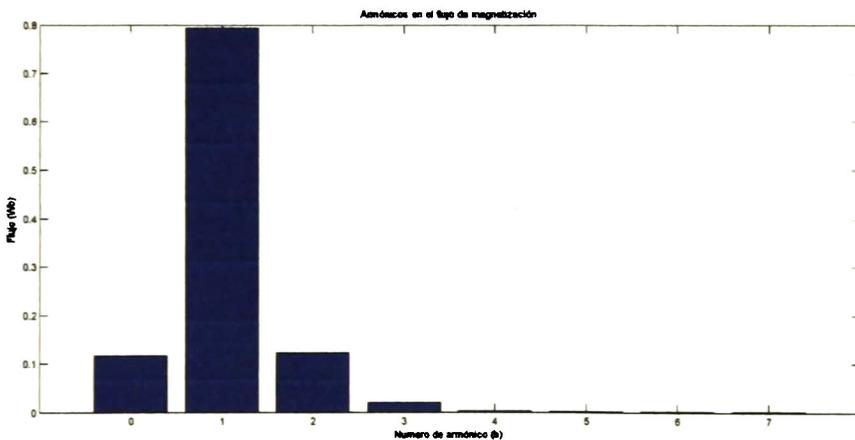


Figura 6.26 Contenido armónico del enlace de flujo de magnetización par el caso con saturación

El par electromagnético cuando no se incluye saturación es cero. Cuando se considera la saturación el par medio es prácticamente cero (Figura 6.27), pero aparecen componentes armónicas, aunque de diferente magnitud, además de la fundamental.

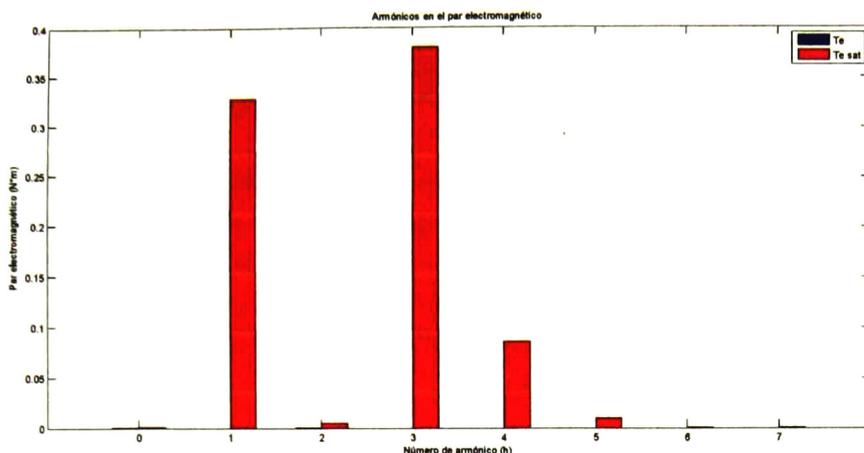


Figura 6.27 Comparación del contenido armónico en el par electromagnético cuando se incluye y se desprecia la saturación, operación en vacío

En la tabla siguiente se muestran los contenidos armónicos de las variables para el caso sin saturación y cuando se incluye la saturación; en ella podemos observar que en el caso sin saturación sólo está presente la frecuencia fundamental mientras que al incluir la saturación, en las corrientes de estator y el par electromagnético aparecen componentes armónicas, además de una componente de corriente directa.

Tabla 6.4. Componentes armónicas para el caso sin saturación y con saturación .

Dominio Armónico																
	Sin saturación							Saturada								
	Armónico							Armónico								
	0	1	2	3	4	5	6	7	0	1	2	3	4	5	6	7
$I_{qs} (A)$	-	2.84	-	-	-	-	-	-	-	2.995	0.177	0.027	0.004	0.0005	-	-
$I_{ds} (A)$	-	2.84	-	-	-	-	-	-	-	2.995	0.177	0.027	0.004	0.0005	-	-
$I_{qr} (A)$	-	-	-	-	-	-	-	-	0.3283	0.0009	0.1707	0.0277	0.0042	0.0005	-	-
$I_{dr} (A)$	-	-	-	-	-	-	-	-	0.3283	0.0009	0.1707	0.0277	0.0042	0.0005	-	-
$I_m (A)$	-	-	-	-	-	-	-	-	0.3284	2.9967	0.3479	.0547	.0084	.0009	0	.0001
$\lambda_{qs} (Wb)$	-	1.08	-	-	-	-	-	-	0.0063	1.078	0.0009	0.0001	-	-	-	-
$\lambda_{ds} (Wb)$	-	1.08	-	-	-	-	-	-	0.0063	1.078	0.0009	0.0001	-	-	-	-
$\lambda_{qr} (Wb)$	-	1.03	-	-	-	-	-	-	0.0013	1.0318	0.0005	-	-	-	-	-
$\lambda_{dr} (Wb)$	-	1.03	-	-	-	-	-	-	0.0013	1.0318	0.0005	-	-	-	-	-
$\lambda_m (Wb)$	-	-	-	-	-	-	-	-	0.1162	0.7944	.123	.0198	.003	.0003	-	-

$T_e(Nm)$	--	--	--	--	--	--	--	--	.0014	0.3279	0.0054	0.3794	0.0862	0.0096	--	--
$\omega_r(rpm)$	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

6.3 Operación a rotor bloqueado a voltaje nominal

6.3.1 Caso cuando se desprecia la saturación magnética

Las simulaciones para el caso sin saturación a rotor bloqueado cuando se alimenta a voltaje nominal, 415 V, se presentan a continuación. Se puede observar que las corrientes de estator (Figura 6.28) y rotor (Figura 6.29) son senoidales puras con amplitudes de 32.29 A y 30.96 A respectivamente.

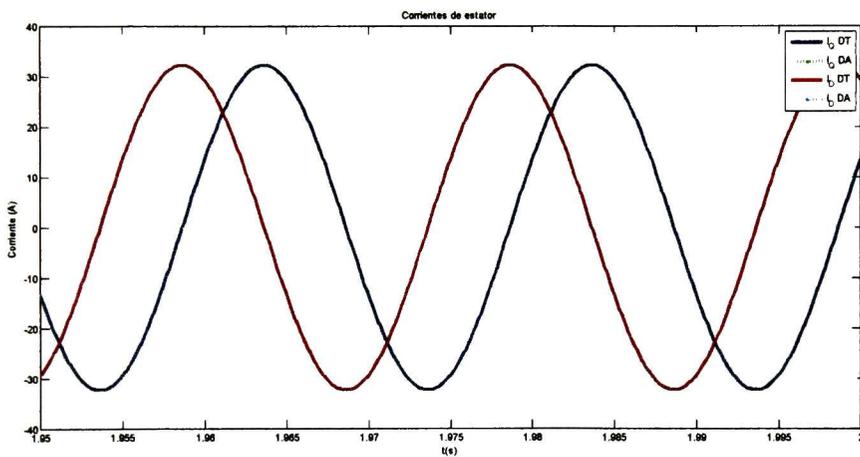


Figura 6.28. Corrientes de estator NS del motor de inducción, rotor bloqueado a voltaje nominal

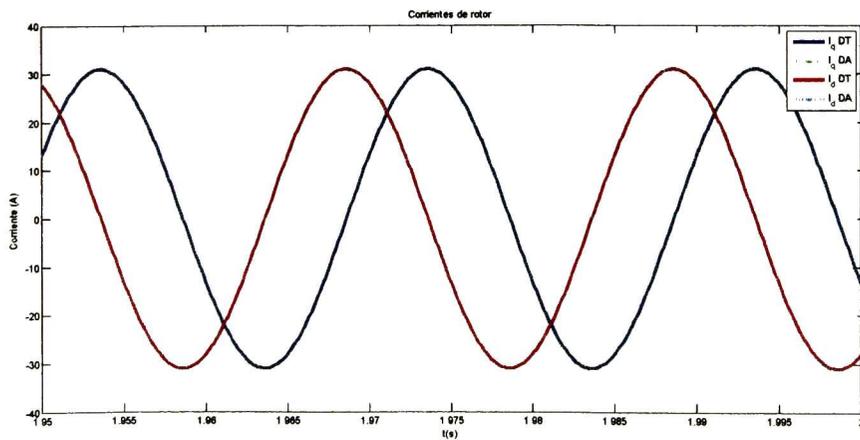


Figura 6.29 Corrientes de rotor NS, rotor bloqueado a voltaje nominal

Los flujos de estator (Figura 6.30) tienen un valor pico de .9839 Wb, mientras que los flujos de rotor (Figura 6.31) disminuyen de valor, con valores pico de 0.1152 Wb.

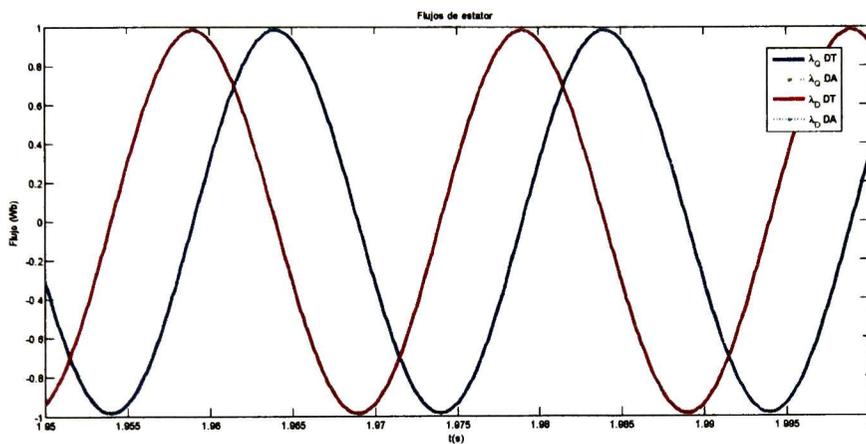


Figura 6.30 Enlaces de flujo del estator NS, rotor bloqueado a voltaje nominal

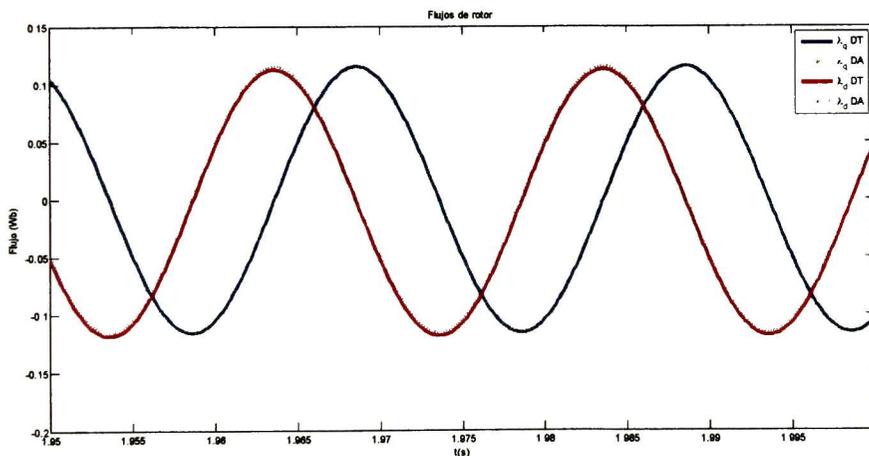


Figura 6.31 Enlaces de flujo del rotor NS, rotor bloqueado a voltaje nominal

El par electromagnético Figura 6.32, es de valor constante de 10.72 N*m.

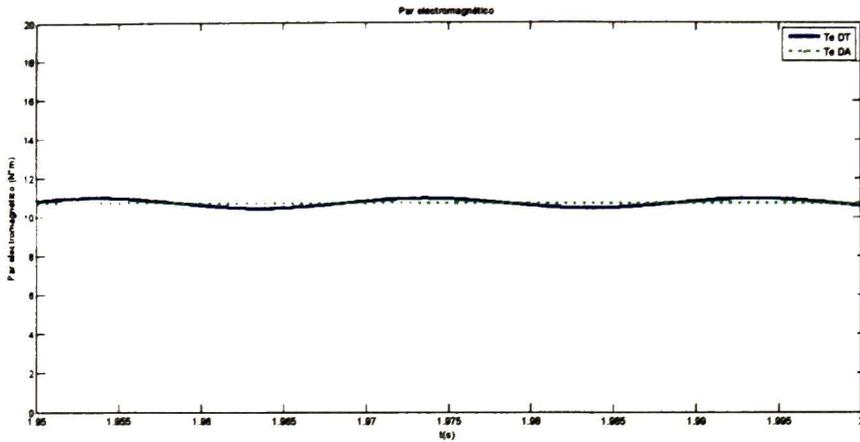


Figura 6.32 Par electromagnético NS, rotor bloqueado a voltaje nominal

En la Tabla 6.5 se muestran las diferencias entre los valores en el DT y DA para operación a rotor bloqueado cuando no se incluye saturación, mientras que en la Figura 6.33 se muestran las diferencias en función del tiempo.

Tabla 6.5. Diferencia entre las señales del DT y DA para el caso NS, rotor bloqueado a voltaje nominal

	i_{qs} (A)	i_{ds} (A)	i_{qr} (A)	i_{dr} (A)	λ_{qs} (Wb)	λ_{ds} (Wb)	λ_{qr} (Wb)	λ_{dr} (Wb)	T_e (N·m)
Diferencia	0.0016	0.0004	0.0015	0.0066	0	0.0026	0	0.26	0.105

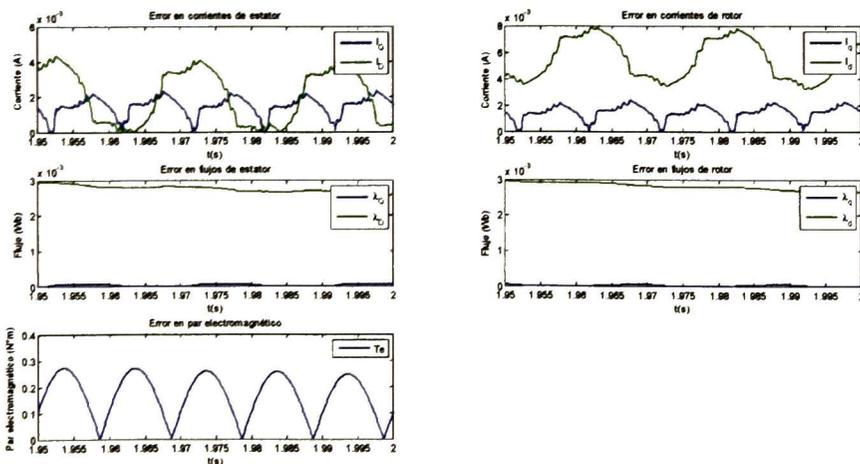


Figura 6.33 Diferencias entre el DT y DA NS, rotor bloqueado a voltaje nominal

6.3.2 Resultados incluyendo saturación magnética

Cuando se incluye saturación en operación a rotor bloqueado se utilizan las ecuaciones (5.15) para el DT y (5.50) en DA. Las corrientes de estator (Figura 6.34), tienen una amplitud que va desde -32.27 A a 32.34 A, mientras que en las corrientes de rotor (Figura 6.35), el valor pico de las señales es el mismo que para el caso sin saturación (30.98 A) y no se observa gran contenido de armónicos.

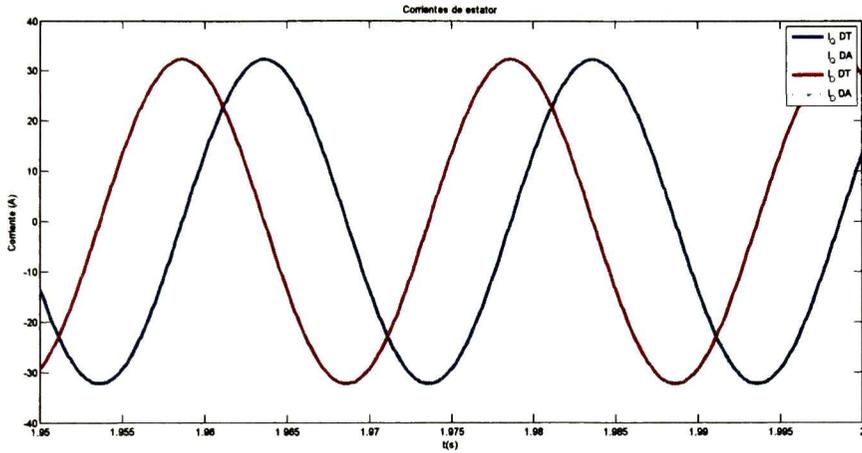


Figura 6.34 Corrientes del estator CS, rotor bloqueado a voltaje nominal

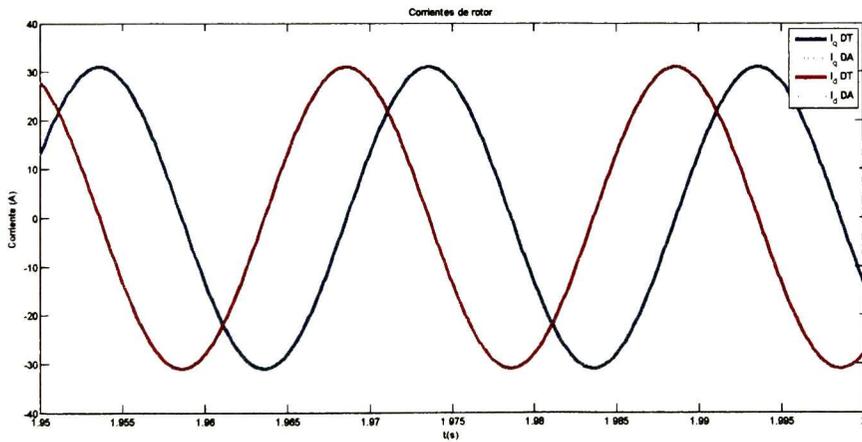


Figura 6.35 Corrientes de rotor CS, rotor bloqueado a voltaje nominal

Los enlaces de flujo de estator (Figura 6.36) y del rotor (Figura 6.37), al igual que las corrientes no muestran influencia de componentes armónicos. Se aprecia una componente de directa de 0.05 A en el estator y el rotor.

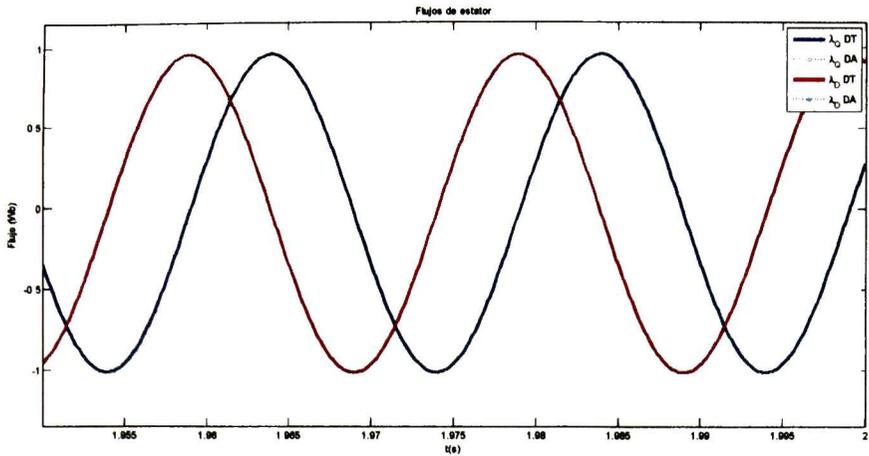


Figura 6.36 Flujos de estator CS, rotor bloqueado a voltaje nominal

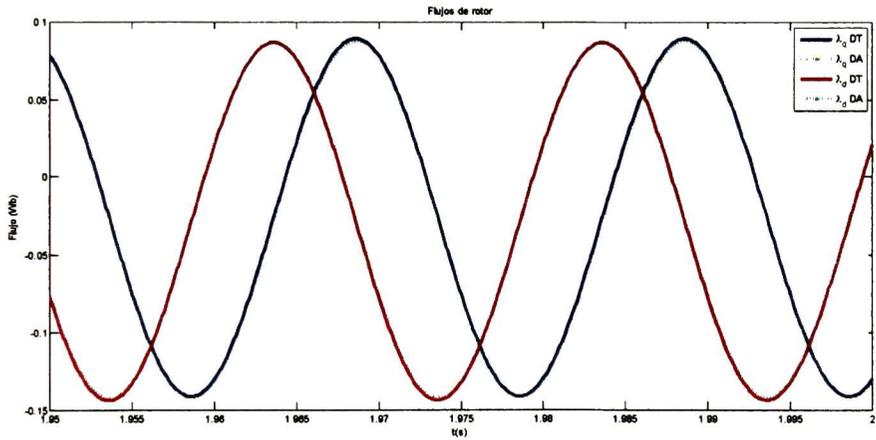


Figura 6.37 Enlaces de flujos de rotor CS, rotor bloqueado a voltaje nominal

En la Figura 6.38 se muestra la corriente de magnetización para la operación en rotor bloqueado alimentado con voltaje nominal, en la cual podemos ver que el valor máximo de la corriente es de 1.45 A mientras que el valor mínimo es de -1.298 A.

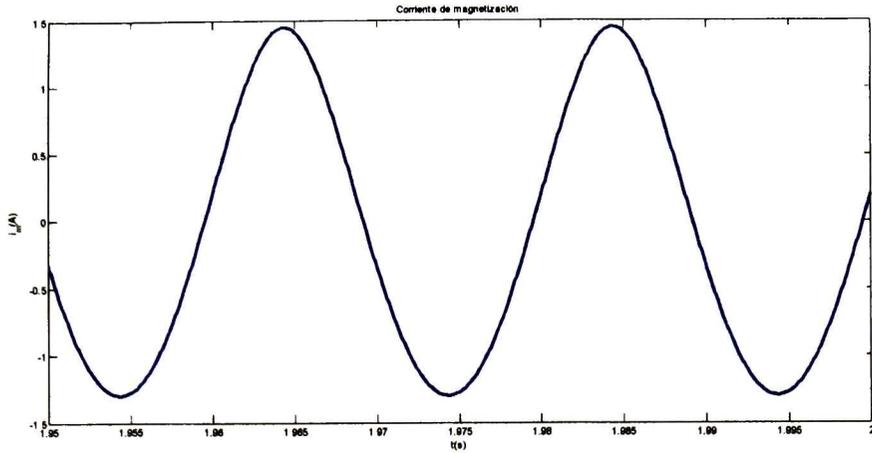


Figura 6.38 Corriente de magnetización CS, a rotor bloqueado a voltaje nominal

En la siguiente figura se muestran los flujos de magnetización, con un valor máximo de 0.4621 Wb y un valor mínimo de -0.5163 Wb.

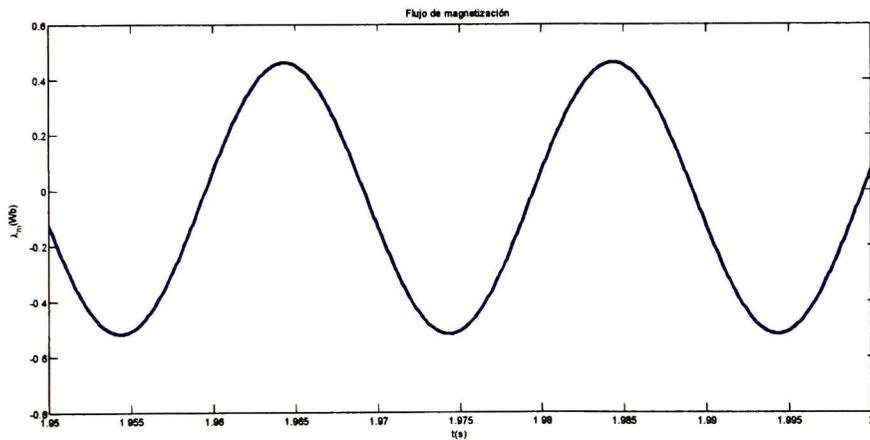


Figura 6.39 Enlace de flujo de magnetización CS, rotor bloqueado a voltaje nominal

La Figura 6.40 muestra la curva de saturación para la operación en rotor bloqueado a voltaje nominal, ésta es prácticamente sin saturación y no tiene influencia la saturación.

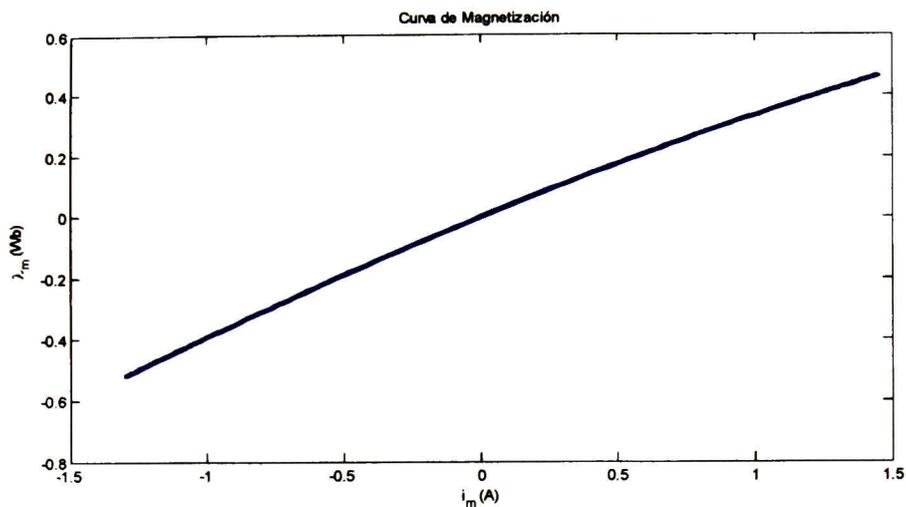


Figura 6.40 Curva de magnetización en operación a rotor bloqueado a voltaje nominal

El par electromagnético (Figura 6.41), tiene una componente armónica montada sobre una componente de directa de 10.72 N*m, de igual valor al del caso sin saturación.

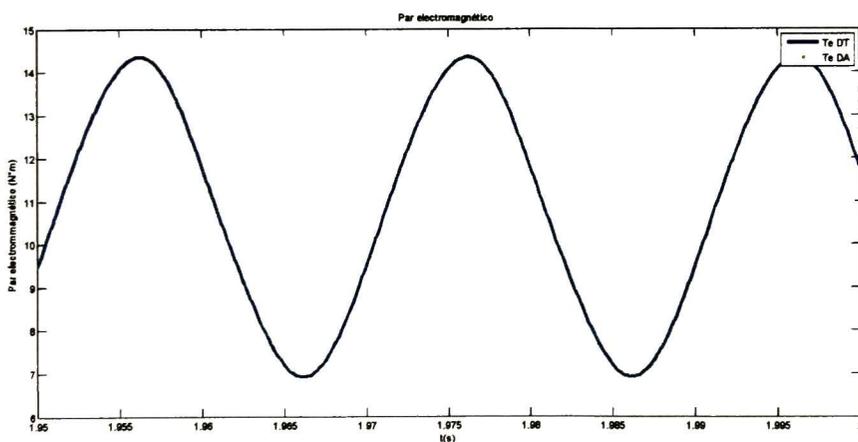


Figura 6.41 Par electromagnético CS, rotor bloqueado a voltaje nominal

En la Figura 6.42 y Tabla 6.6 se muestran las diferencias entre las señales en DT y DA.

Tabla 6.6. Diferencia entre las señales del DT y DA para el caso NS, rotor bloqueado a voltaje nominal

	i_{qs} (A)	i_{ds} (A)	i_{qr} (A)	i_{dr} (A)	λ_{qs} (Wb)	λ_{ds} (Wb)	λ_{qr} (Wb)	λ_{dr} (Wb)	T_e (N·m)
Diferencia	0.0005	0.0019	0.0039	0.0003	0.0012	0.0005	0.0013	0.0005	0.0879

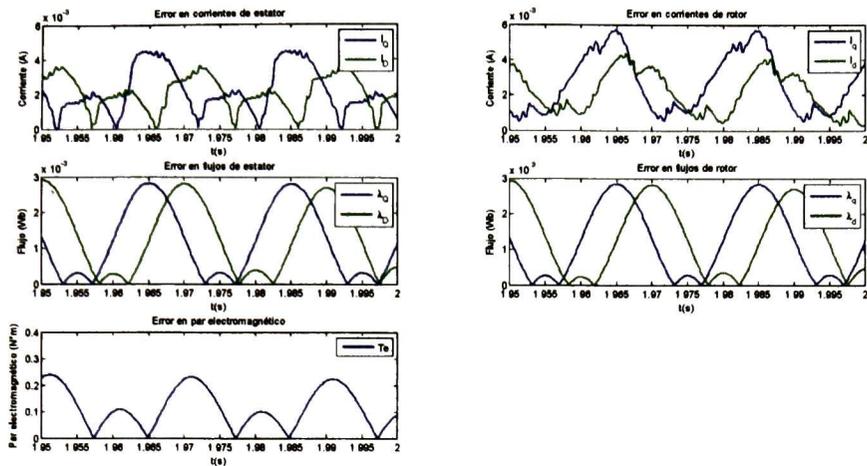


Figura 6.42 Diferencias entre el DT y DA CS, rotor bloqueado a voltaje nominal

En la Tabla 6.7 se muestran los valores máximos, mínimos y medios de las variables para el motor de inducción en operación a rotor bloqueado. Cuando no se incluye saturación las señales son senoidales puras con valor medio cero. Cuando se incluye la saturación magnética las variables presentan un valor medio de pequeña magnitud y las señales son prácticamente senoidales.

Tabla 6.7. Valores máximos, mínimos y medios de las variables para el caso NS y CS

Dominio del Tiempo						
	Sin saturación			Saturada		
	Valor pico máx	Valor pico min	Valor medio	Valor pico máx	Valor pico min	Valor medio
$I_{qs} (A)$	32.29	-32.29	0	32.34	-32.27	-0.025
$I_{ds} (A)$	32.29	-32.29	0	32.34	-32.27	-0.025
$I_{qr} (A)$	30.96	-30.96	0	30.98	-30.98	0
$I_{dr} (A)$	30.96	-30.96	0	30.98	-30.98	0
$I_m (A)$	--	--	--	1.45	-1.298	0.076
$\lambda_{qs} (Wb)$	.9839	-.9839	0	0.955	-1.01	-0.0275
$\lambda_{ds} (Wb)$	.9839	-.9839	0	0.955	-1.01	-0.0275
$\lambda_{qr} (Wb)$	.1152	-.1152	0	0.087	-0.1418	-0.0274
$\lambda_{dr} (Wb)$	.1152	-.1152	0	0.087	-0.1418	-0.0374
$\lambda_m (Wb)$	--	--	--	0.4621	-.5163	-0.0271

$Te(Nm)$	10.72			14.41	6.936	10.673
$\omega_r (rpm)$	--	--	--	--	--	--

6.3.3 Contenido armónico entre el caso sin saturación y con saturación magnética

El contenido armónico en estado estable de la corriente de estator (Figura 6.43) y de las corrientes de rotor (Figura 6.44) es cero.

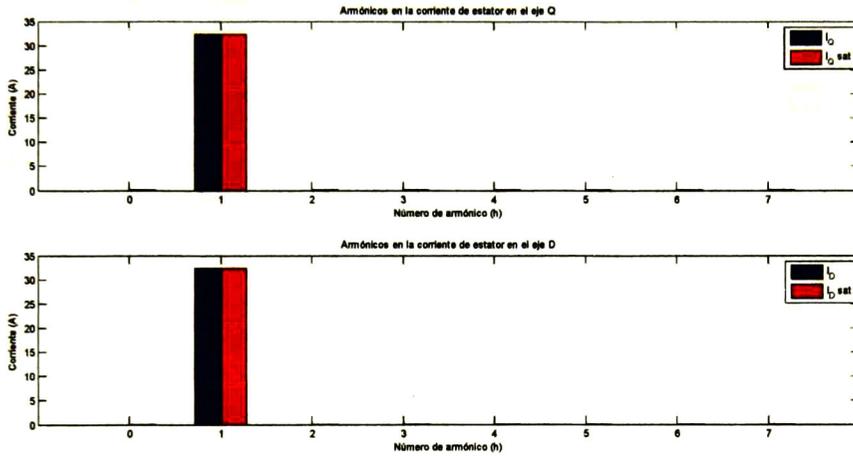


Figura 6.43 Comparación del contenido armónico de las corrientes de estator cuando se incluye y se desprecia la saturación del motor de inducción a rotor bloqueado

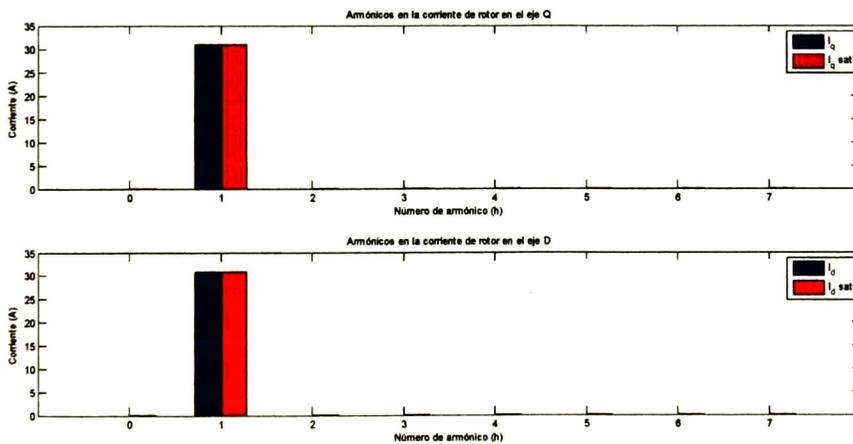


Figura 6.44 Contenido armónico de las corrientes de rotor cuando se incluye y se desprecia la saturación del motor de inducción a rotor bloqueado

En los enlaces de flujo de estator (Figura 6.43) y del rotor (Figura 6.44), cuando se incluye saturación existe una pequeña componente de directa, además, de la componente fundamental, esto hace que se mueva la referencia de la señal.

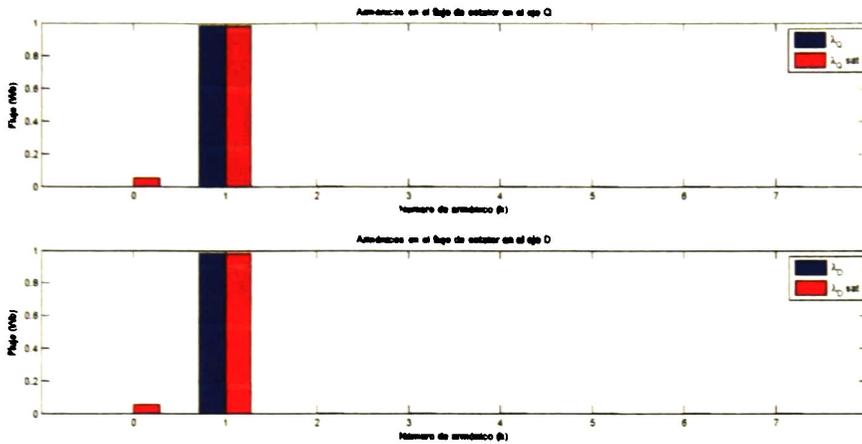


Figura 6.45 Comparación del contenido armónico de los enlaces de flujo del estator cuando se incluye y se desprecia la saturación del motor de inducción a rotor bloqueado

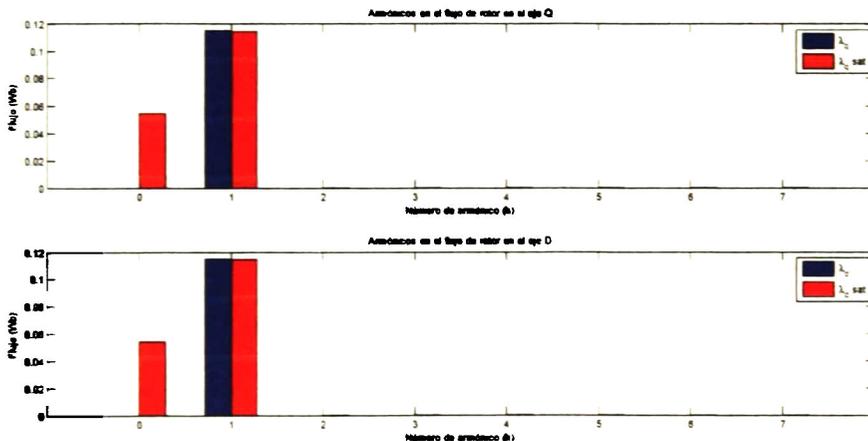


Figura 6.46 Comparación contenido armónico de los enlaces de flujo del rotor cuando se incluye y se desprecia la saturación del motor de inducción a rotor bloqueado

En la Figura 6.47 y Figura 6.48 se muestran las componentes armónicas de la corriente de magnetización y del enlace de flujo de magnetización. Se puede observar la presencia de la frecuencia fundamental y de pequeñas componentes de la segunda y tercera armónicas, mientras que en el enlace de flujo una pequeña componente de directa.

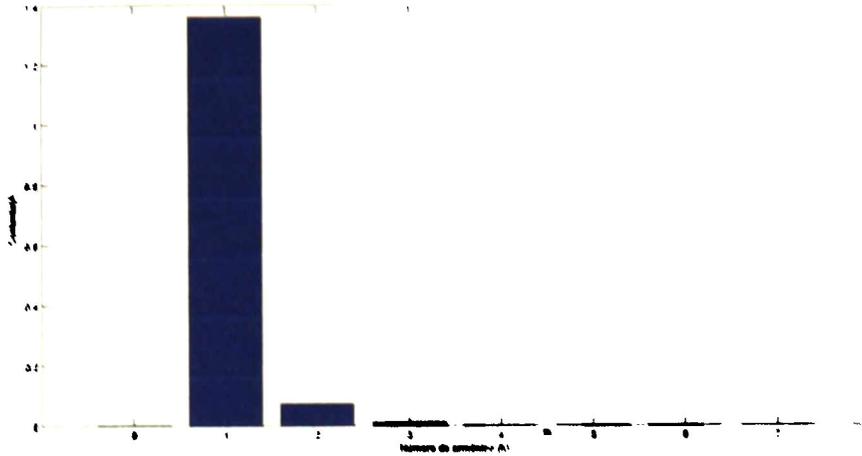


Figura 6.47 Contenido armónico de la corriente de magnetización en operación a rotor bloqueado a voltaje nominal

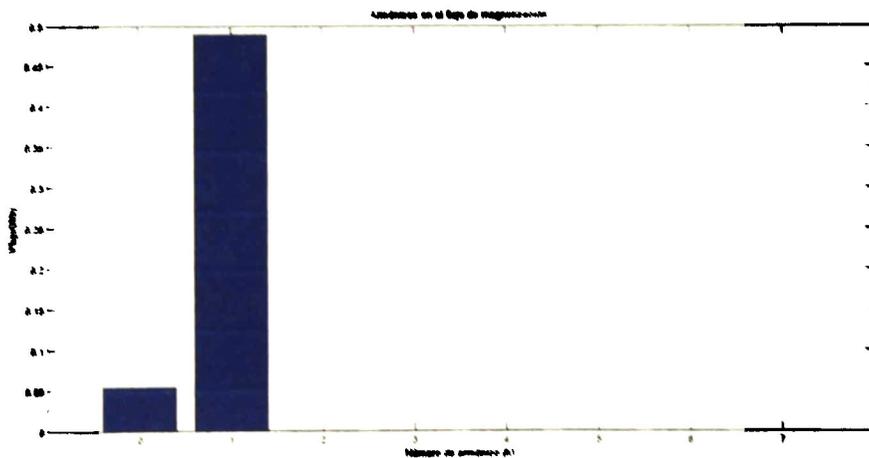


Figura 6.48 Contenido armónico del enlace de flujo de magnetización en operación a rotor bloqueado a voltaje nominal

El contenido armónico del par electromagnético se muestra en la Figura 6.49; se aprecia que cuando se desprecia la saturación solo existe una componente de directa igual al valor del par electromagnético. Cuando se incluye saturación el par electromagnético es sinusoidal y oscila alrededor de la misma componente de directa, de valor igual al caso sin saturación.

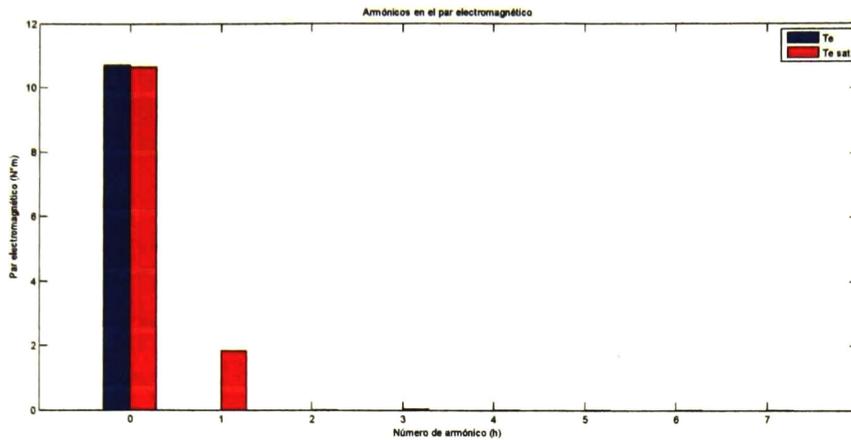


Figura 6.49 Comparación del contenido armónico del par electromagnético cuando se incluye y se desprecia la saturación del motor de inducción a rotor bloqueado

En la Tabla 6.8 se muestra el contenido armónico del motor de inducción en operación en operación a rotor bloqueado y voltaje nominal. En el caso de magnetización lineal, las señales son senoidales puras a la frecuencia fundamental exceptuando al par electromagnético, que contiene una componente de directa. Cuando se incluye la saturación las señales continúan de forma senoidal pura. Esto indica que los efectos de magnetización no lineal no tienen influencia sobre la operación del motor a rotor bloqueado, es decir opera en la parte lineal de la curva de saturación magnética.

Tabla 6.8. Componentes armónicas para el caso sin saturación y no lineal

Dominio Armónico																
	Sin saturación								Saturada							
	Armónico								Armónico							
	0	1	2	3	4	5	6	7	0	1	2	3	4	5	6	7
$I_{qs} (A)$	--	32.3	--	--	--	--	--	--	2e-4	32.3	--	--	--	--	--	--
$I_{ds} (A)$	--	32.3	--	--	--	--	--	--	2e-4	32.3	--	--	--	--	--	--
$I_{qr} (A)$	--	31	--	--	--	--	--	--	9e-5	31	--	--	--	--	--	--
$I_{dr} (A)$	--	31	--	--	--	--	--	--	9e-5	31	--	--	--	--	--	--
$I_m (A)$	--	--	--	--	--	--	--	--	0	1.3634	0.05	.0105	0	0	0	0
$\lambda_{qs} (Wb)$	--	0.984	--	--	--	--	--	--	0.05	0.984	--	--	--	--	--	--
$\lambda_{ds} (Wb)$	--	0.984	--	--	--	--	--	--	0.05	0.984	--	--	--	--	--	--
$\lambda_{qr} (Wb)$	--	0.1115	--	--	--	--	--	--	0.05	0.1115	--	--	--	--	--	--
$\lambda_{dr} (Wb)$	--	0.1115	--	--	--	--	--	--	0.05	0.1115	--	--	--	--	--	--

λ_m (Wb)	-	-	-	-	-	-	-	-	0.543	4974	0.006	.0001	0	0	0	0
T_e (Nm)	10.7	-	-	-	-	-	-	-	10.6	1.83	2 e-3	0.038	7 e-3	5e-4	2.6 e-6	3.47 e-5
ω_r (rpm)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

6.4 Operación a rotor bloqueado a corriente nominal

6.4.1 Caso cuando se desprecia la saturación magnética

En esta prueba el voltaje de alimentación es de valor tal que la corriente del estator es igual a la corriente nominal. El voltaje de alimentación (de corto circuito) es de 36.539 V.

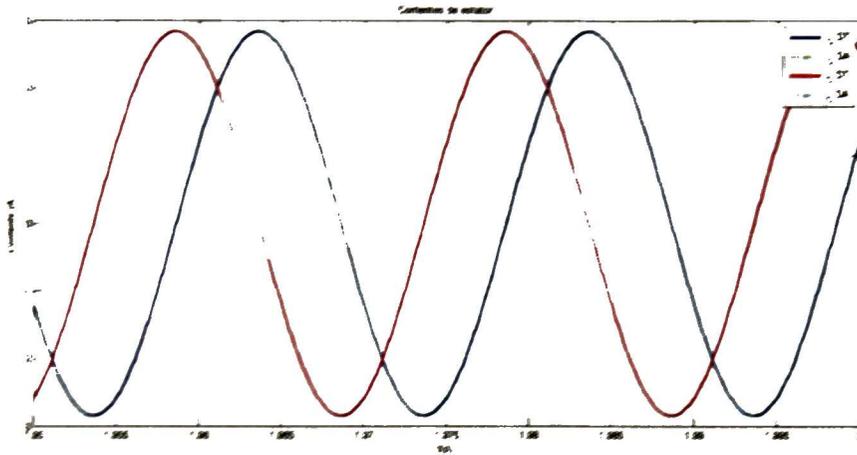


Figura 6.50 Corrientes de estator NS, rotor bloqueado con corriente nominal

En la Figura 6.50 se observa que las corrientes de estator para el caso sin saturación son senoidales puras, con un valor de 2.843 A pico. En las corrientes del rotor (Figura 6.51), se observa que son de valor ligeramente menor a las corrientes de estator, la amplitud de estas señales es de 2.721 A pico. Esto hace que las corrientes de magnetización sean de valor pequeño.

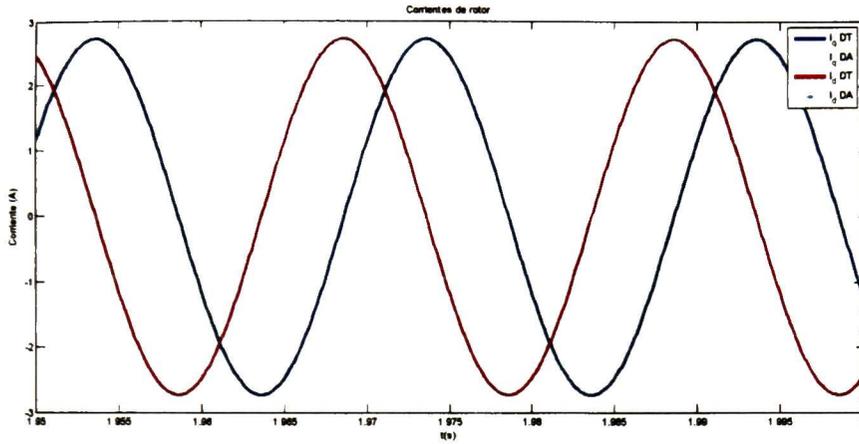


Figura 6.51 Corrientes de rotor NS. operación a rotor bloqueado a corriente nominal

Los enlaces de flujo de estator (Figura 6.52) y los del rotor (Figura 6.53), son pequeños de amplitud de 0.08663 Wb pico, mientras los enlaces de flujo de rotor son de amplitud de 0.01015 Wb pico.

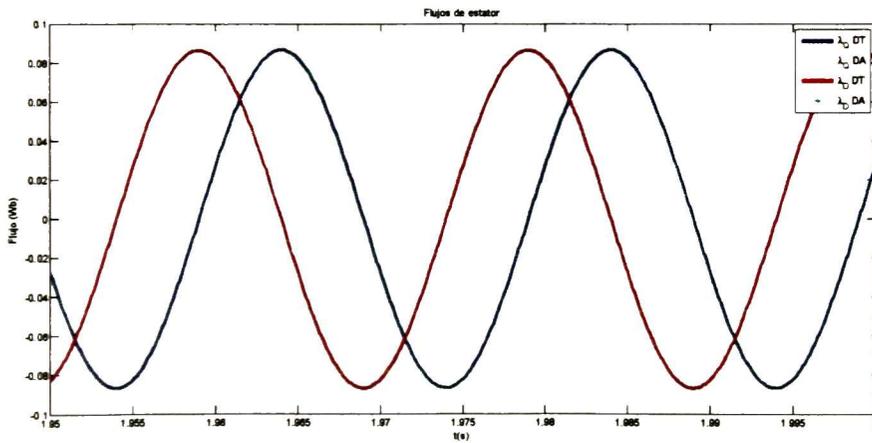


Figura 6.52 Enlaces de flujo de estator NS. rotor bloqueado a corriente nominal

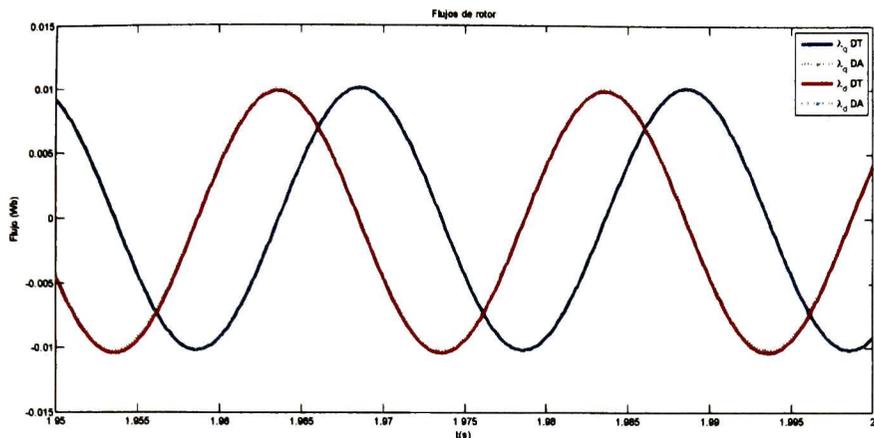


Figura 6.53 Enlaces de flujo de rotor NS, rotor bloqueado a corriente nominal

El par electromagnético (Figura 6.54) es de valor 0.083 N*m,

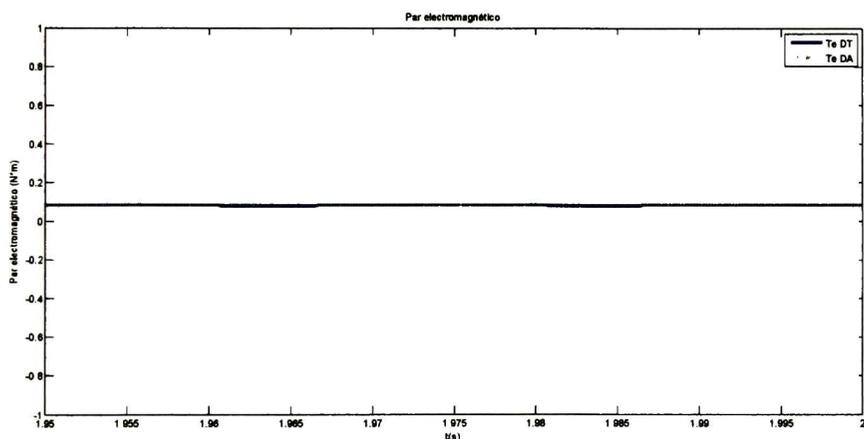


Figura 6.54 Par electromagnético NS, rotor bloqueado a corriente nominal

En la Tabla 6.9 así como en la Figura 6.55 se muestran las diferencias entre las señales de DT y DA para el motor de inducción a rotor bloqueado para el caso de magnetización lineal.

Tabla 6.9 Diferencias entre las señales del DT y DA para el caso NS, rotor bloqueado con corriente nominal

	i_{qs} (A)	i_{ds} (A)	i_{qr} (A)	i_{dr} (A)	λ_{qs} (Wb)	λ_{ds} (Wb)	λ_{qr} (Wb)	λ_{dr} (Wb)	T_e (N·m)
Diferencia	0.14e-3	0.03e-3	0.13e-3	0.58e-3	0.4e-3	0.22e-3	.4e-6	0.23e-3	0.81e-3

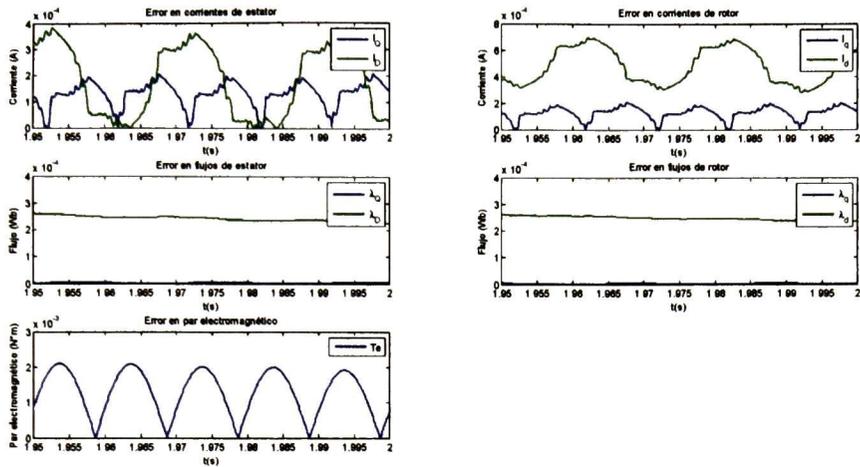


Figura 6.55 Diferencias entre el DT y DA CS, rotor bloqueado con corriente nominal

6.4.2 Resultados incluyendo saturación magnética

El voltaje de entrada del motor de inducción para que entregue la corriente nominal cuando se tiene saturación magnética es de 50.526 V. Las corrientes del estator se muestran en la Figura 6.56, son senoidales con valor pico de 3.93 A.

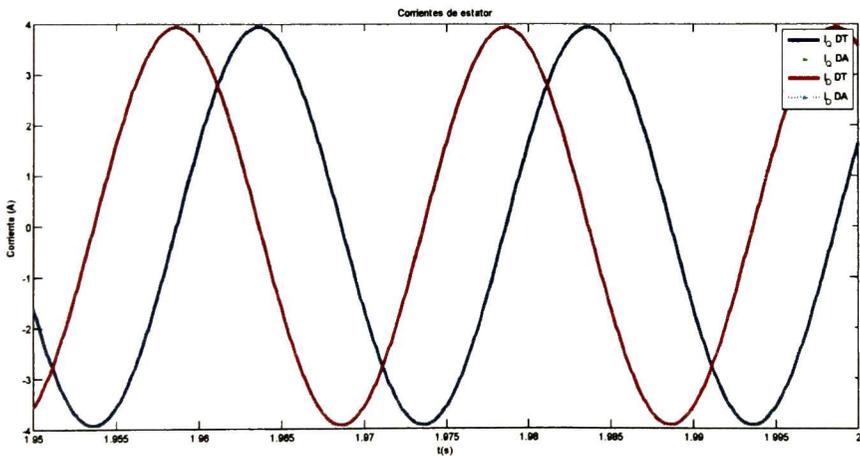


Figura 6.56 Corrientes de estator CS, rotor bloqueado a corriente nominal

Las corrientes de rotor (Figura 6.57), son un poco un poco menores que las del estator, con una amplitud de 3.772 A pico.

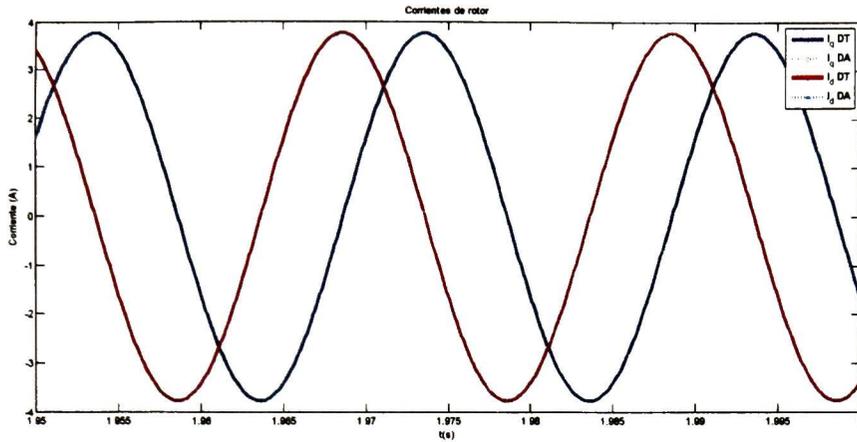


Figura 6.57 Corrientes del rotor CS, rotor bloqueado a corriente nominal

Los enlaces de flujo de estator (Figura 6.58) y del rotor (Figura 6.59), tienen valor pico positivo de 0.1192 Wb y valor pico negativo de -0.11999 Wb para los enlaces de flujo de estator, mientras los enlaces de flujo de rotor varían entre .01356 Wb y -0.01456 Wb, esto indica para ambos casos que se tiene una pequeña componente de directa la cual mueve la referencia a un valor diferente de cero.

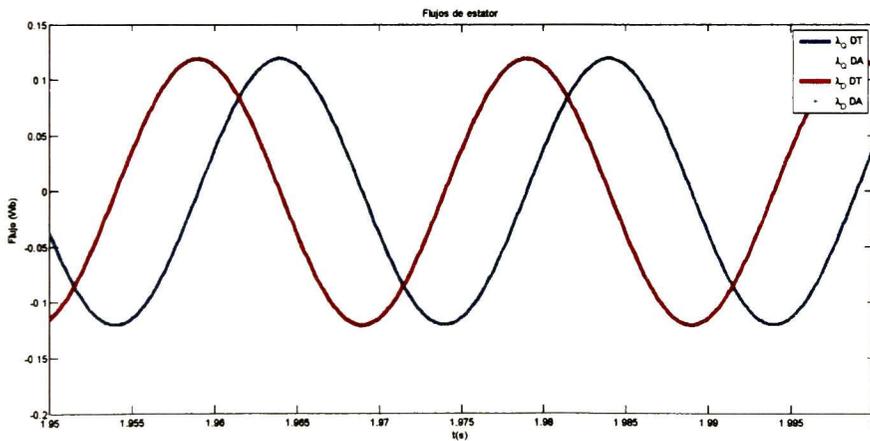


Figura 6.58 Enlaces de flujo de estator CS, rotor bloqueado a corriente nominal

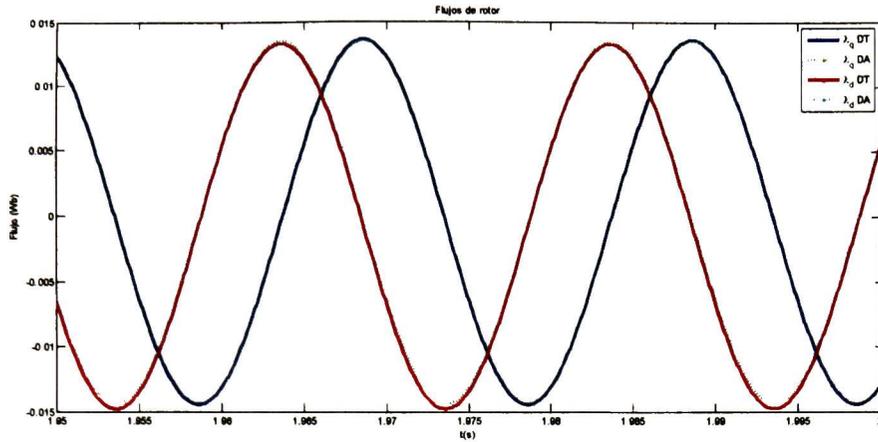


Figura 6.59 Enlaces de flujo de rotor CS, rotor bloqueado a corriente nominal

La corriente y el enlace de flujo de magnetización se muestran en las Figura 6.60 y Figura 6.61 respectivamente, estas señales son senoidales de amplitud pequeña, donde las corrientes tienen valor pico de 0.1652 A, mientras que el enlace de flujo tiene valor pico de 0.06 Wb.

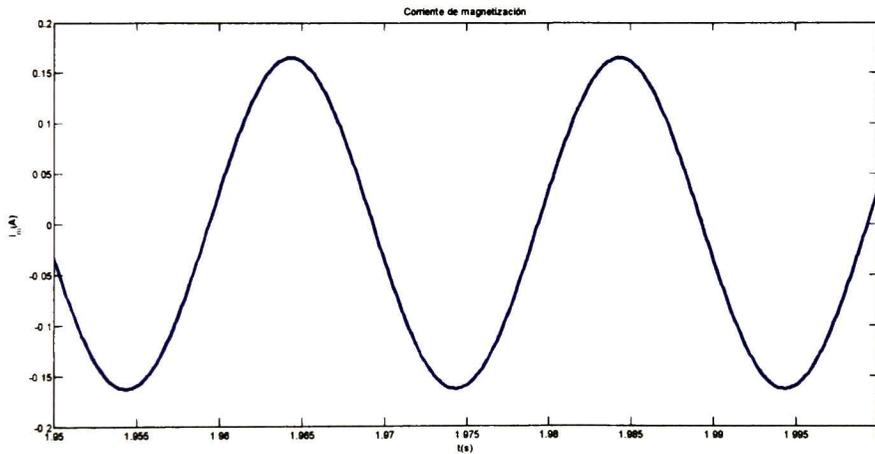


Figura 6.60 Corriente de magnetización CS, rotor bloqueado a corriente nominal

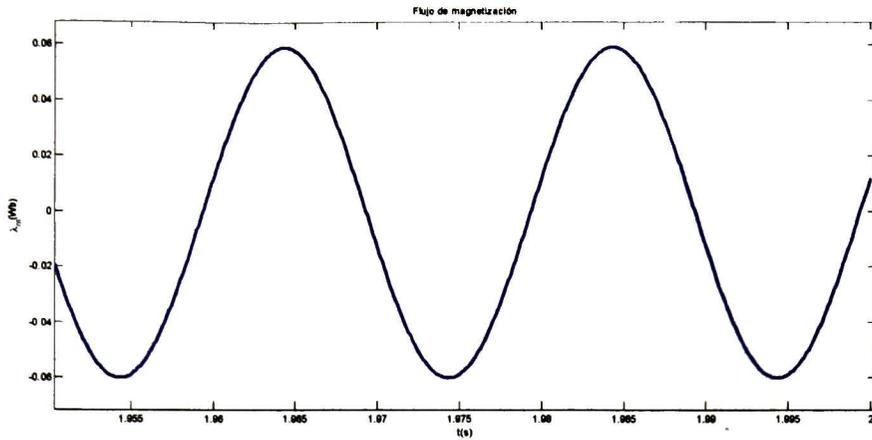


Figura 6.61 Enlace de flujo de magnetización CS, rotor bloqueado a corriente nominal

En la Figura 6.62 se muestra la curva de magnetización que se genera de las corrientes y enlaces de flujo simuladas en este prueba.

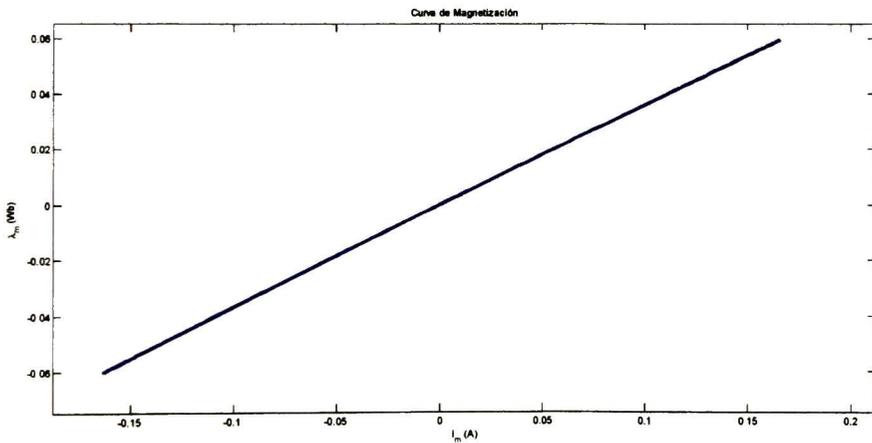


Figura 6.62 Curva de magnetización a rotor bloqueado a corriente nominal

En la Figura 6.63 se muestra el par electromagnético, tiene una amplitud de 0.013 N*m.

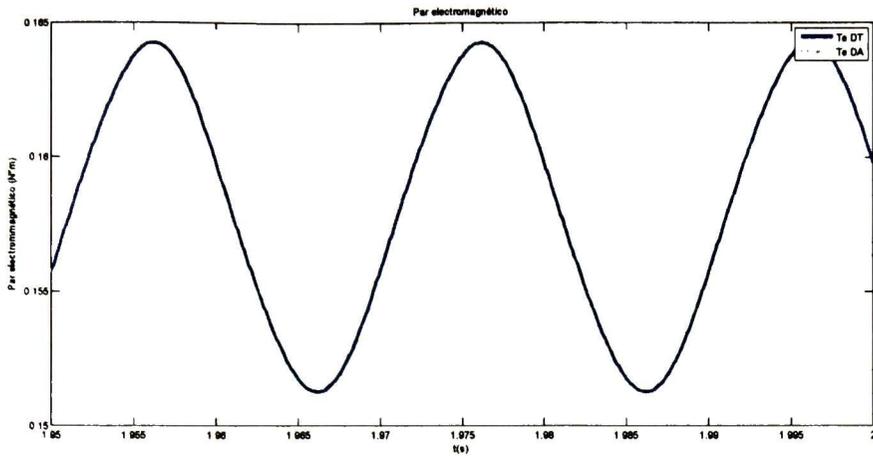


Figura 6.63 Par electromagnético CS, rotor bloqueado a corriente nominal

En la Tabla 6.10 y en la Figura 6.64 se muestran las diferencias entre el DT y DA para el caso con saturación del motor a rotor bloqueado con corriente nominal.

Tabla 6.10. Diferencias entre las señales del DT y DA para el caso CS, rotor bloqueado con corriente nominal

	i_{qs} (A)	i_{ds} (A)	i_{qr} (A)	i_{dr} (A)	λ_{qs} (Wb)	λ_{ds} (Wb)	λ_{qr} (Wb)	λ_{dr} (Wb)	T_e (N*m)
Diferencia	0.17e-3	0.12e-3	0.18e-3	0.38e-3	0.12e-5	0.09e-3	.67e-5	0.09e-3	0.53e-3

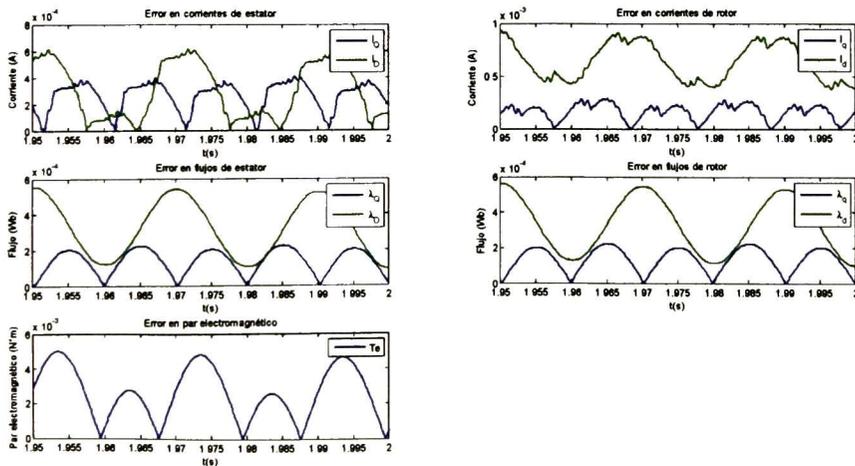


Figura 6.64 Diferencias entre el DT y DA CS, rotor bloqueado con corriente nominal

En la Tabla 6.11 se muestran los valores máximos, mínimos y medios de las señales del motor de inducción, para el caso de magnetización lineal y con saturación. Se observa que el valor absoluto de las señales son iguales y de mayor valor cuando se incluye saturación, exceptuando en el par electromagnético donde en el caso de magnetización lineal es constante 0.083 N*m, mientras que cuando está saturada tiene un valor medio de .0065.

Tabla 6.11. Comparación de los valores máximos, mínimos y medios de las variables para el caso NS y CS

Dominio del Tiempo						
	Sin saturación			Saturada		
	Valor pico +	Valor pico -	Valor medio	Valor pico +	Valor pico -	Valor medio
$I_{qs} (A)$	2.843	-2.843	0	3.93	-3.93	0
$I_{ds} (A)$	2.843	-2.843	0	3.93	-3.93	0
$I_{qr} (A)$	2.721	-2.721	0	3.772	-3.772	0
$I_{dr} (A)$	2.721	-2.721	0	3.772	-3.772	0
$I_m (A)$	--	--	0	0.1652	-0.1652	0
$\lambda_{qs} (Wb)$	0.0866	-0.0866	0	0.1192	-0.1192	0
$\lambda_{ds} (Wb)$	0.0866	-0.0866	0	0.1192	-0.1192	0
$\lambda_{qr} (Wb)$	0.01015	-0.01015	0	.01356	-0.01356	0
$\lambda_{dr} (Wb)$	0.01015	-0.01015	0	.01356	-0.01356	0
$\lambda_m (Wb)$	--	--	--	0.06	-0.06	0
$Te (Nm)$	0.083			.1643	.1513	0.0065
$\omega_r (rpm)$	--	--	--	--	--	--

6.4.3 Contenido armónico entre el caso de magnetización lineal y con saturación magnética

En Figura 6.65 y Figura 6.66 se muestran los contenidos armónicos de las corrientes de estator y del rotor respectivamente, estas señales no contienen armónicos. En ellas podemos observar que la diferencia reside en que la componente armónica para el caso de magnetización lineal es menor a la saturada, con una diferencia de 1.087 A para las corrientes de estator y de 1.05 A para las del rotor.

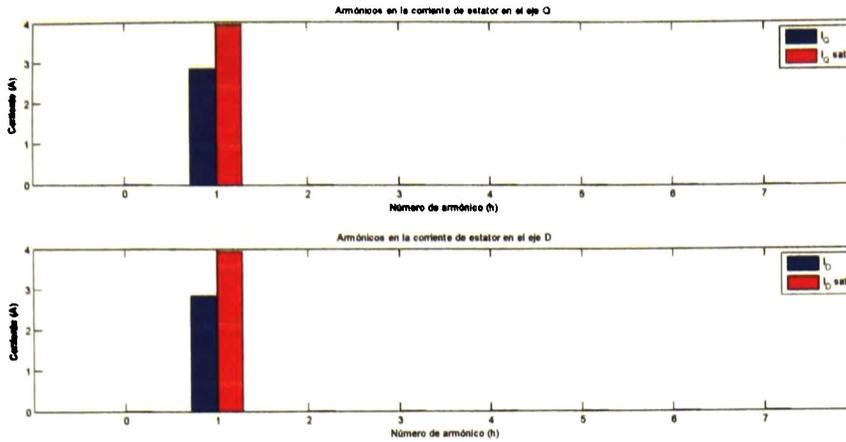


Figura 6.65 Comparación del contenido armónico de las corrientes de estator cuando se incluye y se desprecia la saturación, rotor bloqueado a corriente nominal

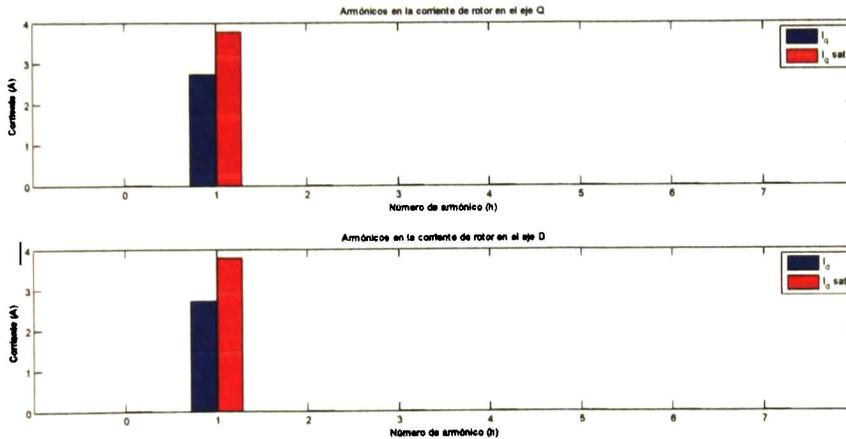


Figura 6.66 Comparación del contenido armónico de las corrientes de rotor cuando se incluye y se desprecia la saturación, rotor bloqueado a corriente nominal

En el caso de los enlaces de flujo de estator (Figura 6.67) y rotor (Figura 6.68) pasa lo mismo que con las corrientes, la componente fundamental para el caso con saturación es mayor que para el caso de magnetización lineal; de igual forma los enlaces de flujo de estator no contienen otros armónicos, mientras que los enlaces de flujo de rotor contienen una pequeña componente de directa.

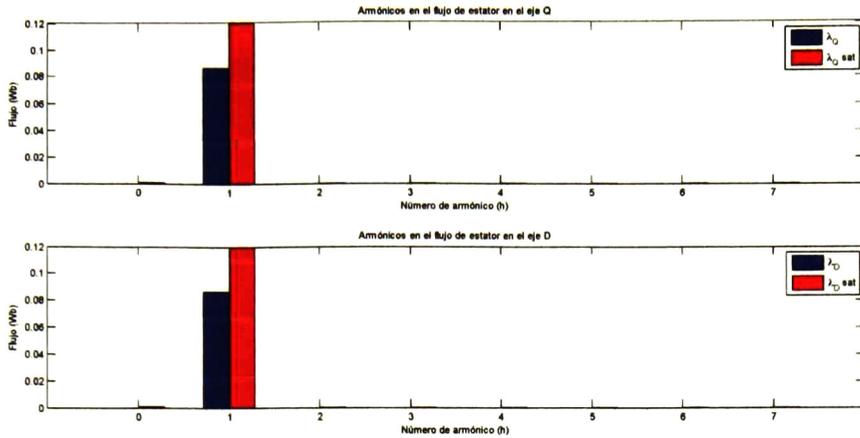


Figura 6.67 Comparación del contenido armónico de los enlaces de flujo de estator cuando se incluye y se desprecia la saturación, rotor bloqueado a corriente nominal

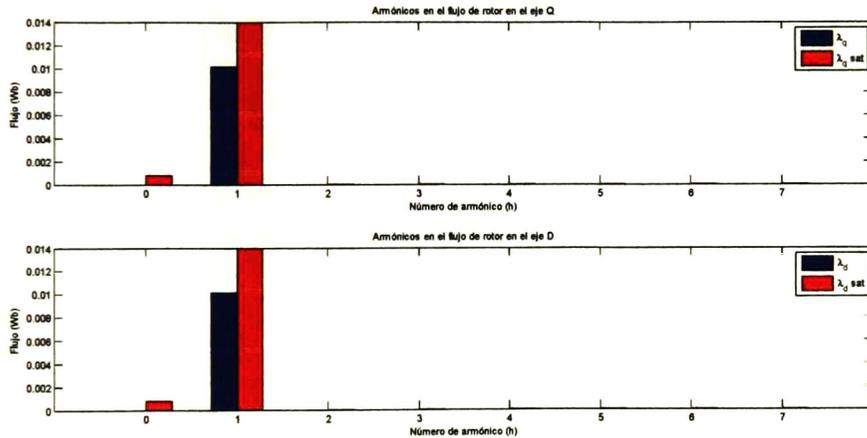


Figura 6.68 Comparación del contenido armónico de los enlaces de flujo de rotor cuando se incluye y se desprecia la saturación, rotor bloqueado a corriente nominal

El contenido armónico de la corriente de magnetización se muestra en la Figura 6.69, donde podemos apreciar muy pequeñas componentes armónicas siendo la segunda armónica la más notoria. En el enlace de flujo de magnetización no se observan componentes armónicas.

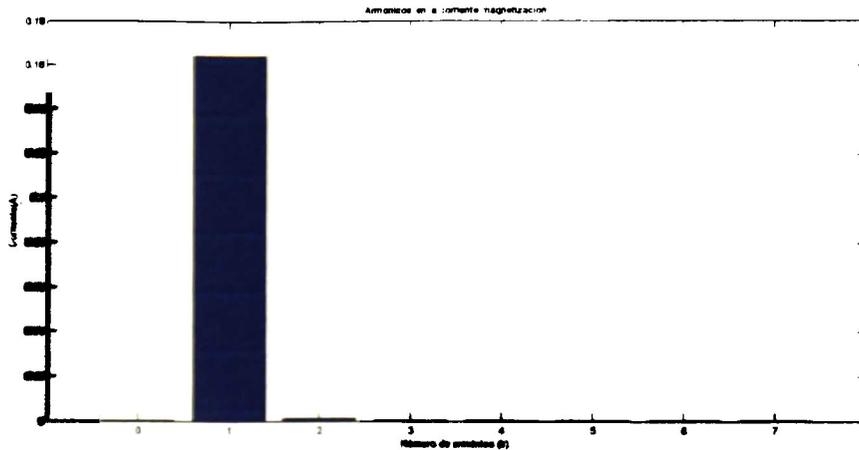


Figura 6.69 Contenido armónico de la corriente de magnetización CS a rotor bloqueado a corriente nominal

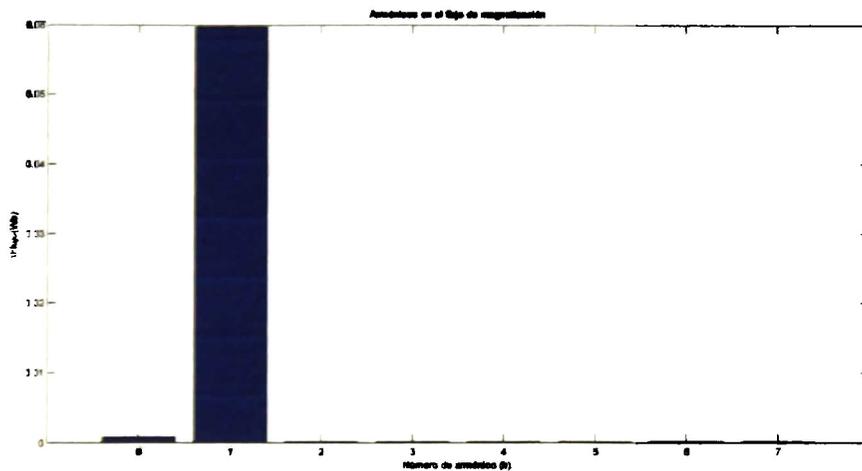


Figura 6.70 Contenido armónico del enlace de flujo de magnetización a rotor bloqueado a corriente nominal

En la Figura 6.71 se muestra el contenido armónico del par electromagnético, en la cual se puede apreciar que para ambos casos (de magnetización lineal y con saturación) aparece la componente de directa, en el caso del saturado es 1.9 veces mayor que para el caso sin saturación; además de esto se observa que cuando se tiene saturación existe una pequeña componente de la frecuencia fundamental.

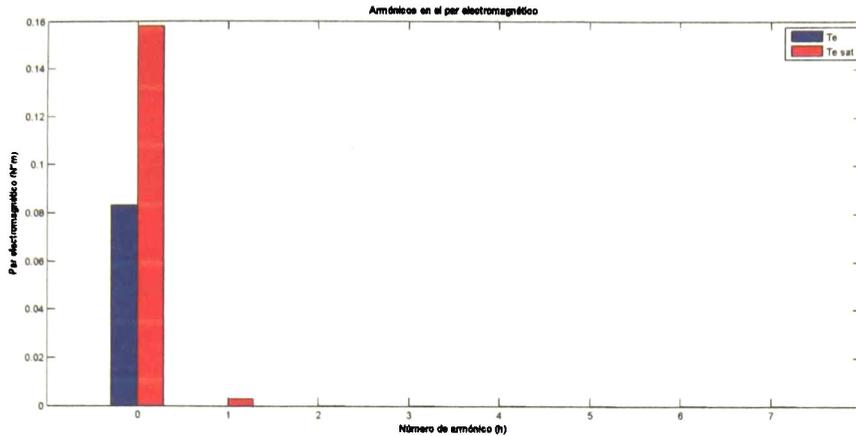


Figura 6.71 Comparación del contenido armónico del par electromagnético cuando se incluye y se desprecia la saturación, rotor bloqueado a corriente nominal

En la Tabla 6.12 se muestra el contenido armónico de las señales del motor de inducción a rotor bloqueado con corriente nominal. Se puede observar, que para el caso de magnetización lineal sólo se aparece la frecuencia fundamental exceptuando en el par en el cual sólo se tiene la componente de directa; mientras en el caso con saturación las corrientes de estator y rotor sólo muestran frecuencia fundamental, en cambio los enlaces de flujo muestran aparte de la frecuencia fundamental un pequeño valor de directa, que se podría decir que tiende a cero, del orden de $1e-4$; a su vez en el par electromagnético existe una pequeña componente de la fundamental además de la componente de directa.

Tabla 6.12. Componentes armónicas para el caso sin saturación y con saturación

Dominio Armónico																
	Magnetización lineal								Saturada							
	Armónico								Armónico							
	0	1	2	3	4	5	6	7	0	1	2	3	4	5	6	7
$I_{qs} (A)$	--	2.84	--	--	--	--	--	--	--	3.93	--	--	--	--	--	--
$I_{ds} (A)$	--	2.84	--	--	--	--	--	--	--	3.93	--	--	--	--	--	--
$I_{qr} (A)$	--	2.73	--	--	--	--	--	--	--	3.77	--	--	--	--	--	--
$I_{dr} (A)$	--	2.73	--	--	--	--	--	--	--	3.77	--	--	--	--	--	--
$I_m (A)$	--	--	--	--	--	--	--	--	0	0.162	.0011	0	0	0	0	0
$\lambda_{qs} (Wb)$	--	0.087	--	--	--	--	--	--	$7e-4$	0.12	--	--	--	--	--	--
$\lambda_{ds} (Wb)$	--	0.087	--	--	--	--	--	--	$7e-4$	0.12	--	--	--	--	--	--
$\lambda_{qr} (Wb)$	--	0.01	--	--	--	--	--	--	$7.8e-4$	0.014	--	--	--	--	--	--

$\lambda_{dr}(Wb)$	--	0.01	--	--	--	--	--	--	7.8e-4	0.014	--	--	--	--	--
$\lambda_m(Wb)$	--	--	--	--	--	--	--	--	.0008	.0597	0	0	0	0	0
$Te(Nm)$	0.083	--	--	--	--	--	--	--	0.158	0.0032	--	--	--	--	--
$\omega_r(rpm)$	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

6.5 Operación del motor de inducción sin carga

6.5.1 Caso cuando se desprecia la saturación magnética

Las simulaciones se realizaron tomando en cuenta las ecuaciones (3.33) en el dominio del tiempo y (4.48) en el dominio armónico. La operación sin carga $T_L = 0$ se hace para la condición de rotor parado hasta que se llega a la velocidad del rotor en estado estable. En esta condición no se transforma energía mecánica y la potencia de entrada sólo suministra las pérdidas en el cobre.

La velocidad del rotor se muestra en la Figura 6.72; se observa que se estabiliza en 1 seg después del arranque en el valor de 1250 rpm.

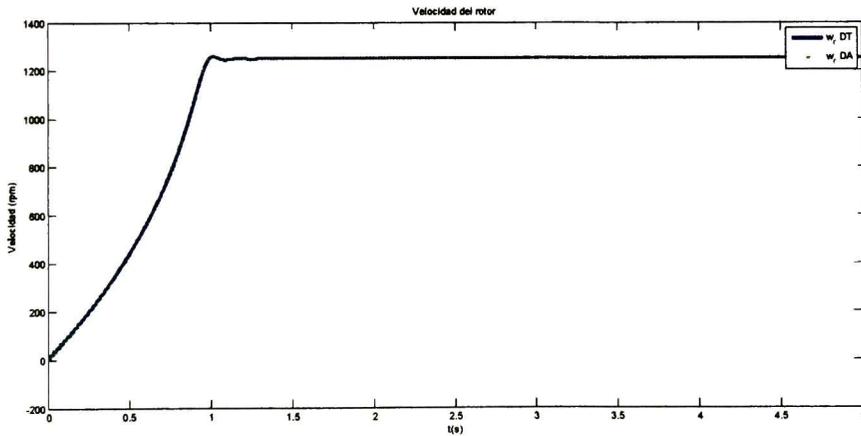


Figura 6.72 Velocidad del rotor del motor de inducción sin carga

El par electromagnético y las corrientes del estator y rotor se muestran en la Figura 6.73 a Figura 6.75 respectivamente.

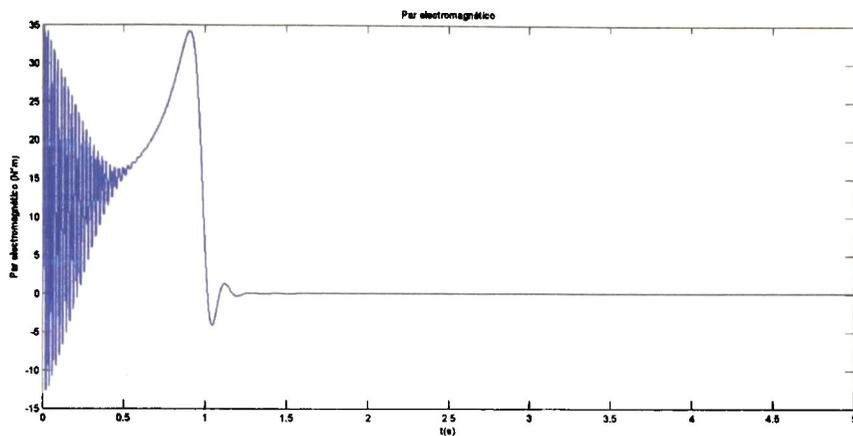


Figura 6.73 Par electromagnético NS del motor de inducción sin carga

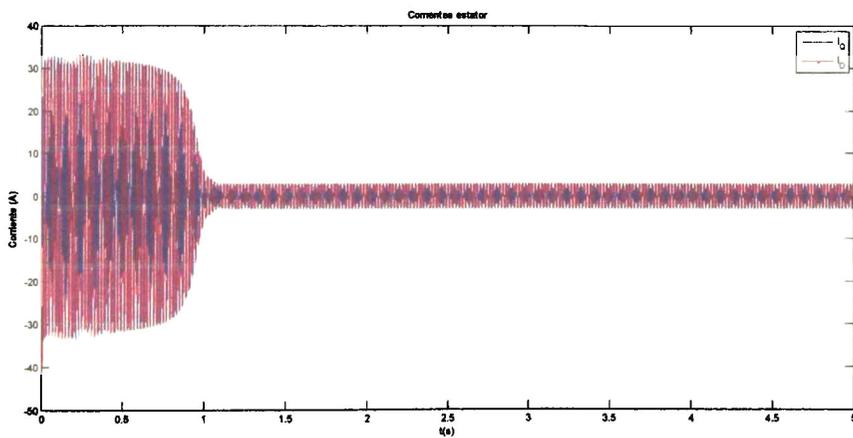


Figura 6.74 Corrientes de estator NS del motor de inducción sin carga

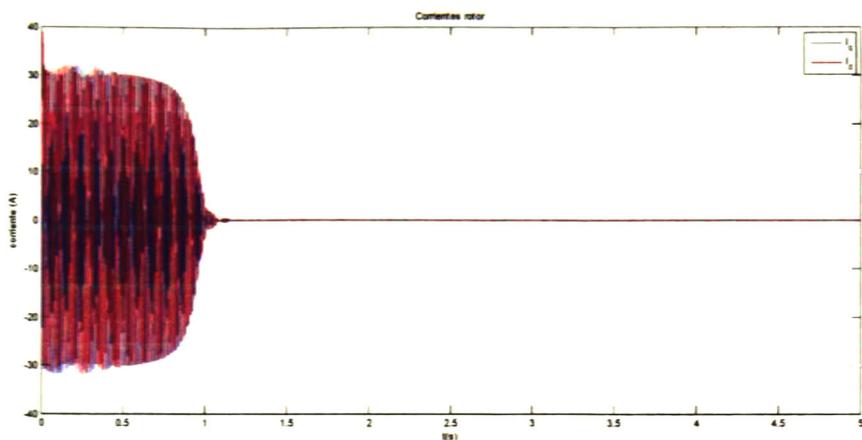


Figura 6.75 Corrientes del rotor NS del motor de inducción sin carga

Las corrientes del estator en estado estable (después de estabilizada la velocidad), se muestran en la Figura 6.76. Las señales son senoidales puras con valores pico de 2.843 A.

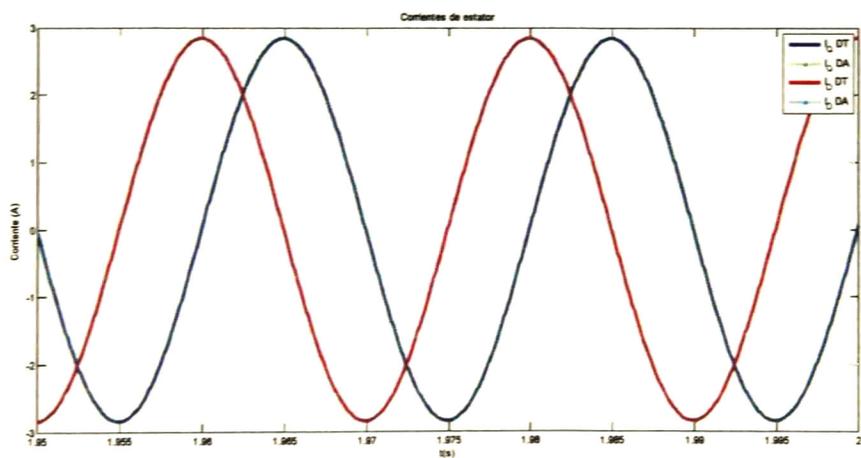


Figura 6.76 Corrientes de estator NS del motor de inducción sin carga

Las corrientes del rotor en estado estable (Figura 6.77), son muy pequeñas, senoidales sin distorsión.

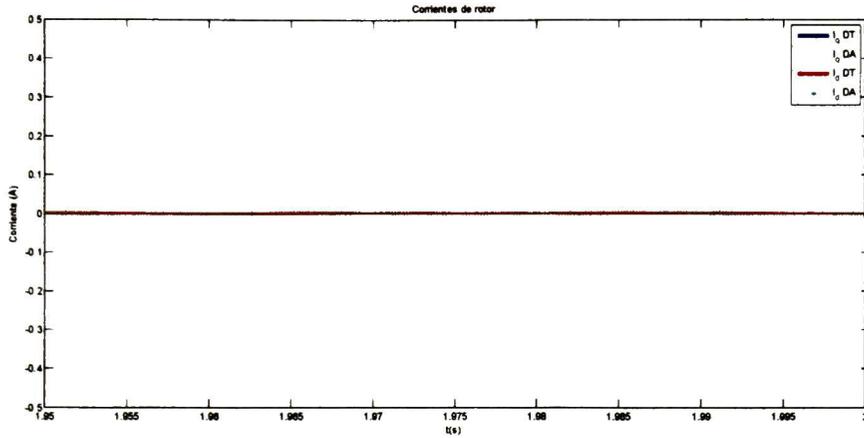


Figura 6.77 Corrientes de rotor NS del motor de inducción sin carga

Los enlaces de flujo de estator (Figura 6.78) y del rotor (Figura 6.79), son senoidales puras, de valores pico de 1.078 Wb para los enlaces de flujo del estator y 1.034 Wb para los enlaces del flujo del rotor.

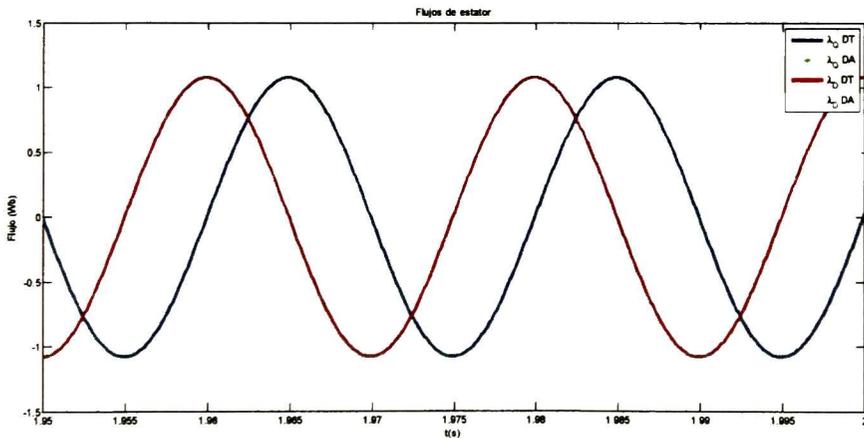


Figura 6.78 Flujos de estator NS del motor de inducción sin carga

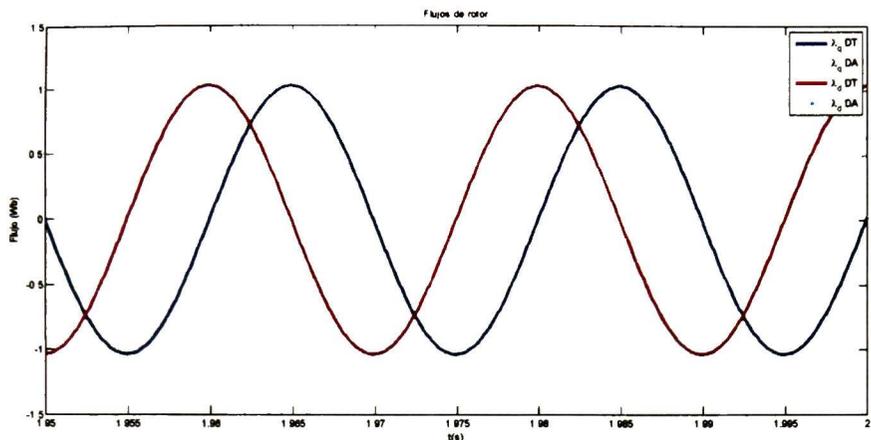


Figura 6.79 Flujos de rotor NS del motor de inducción sin carga

El par electromagnético (Figura 6.80), en estado estable es cero, ya que no realiza trabajo.

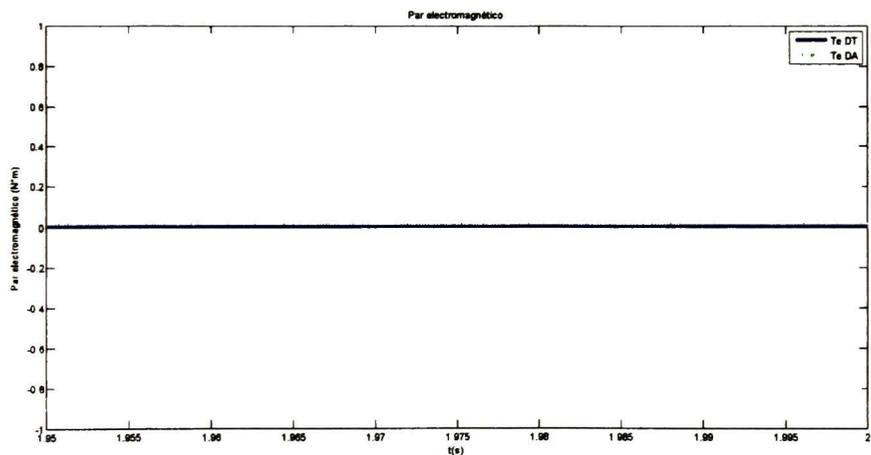


Figura 6.80 Par electromagnético NS del motor de inducción sin carga

En la Tabla 6.13 y Figura 6.81 se muestran las diferencias entre los resultados aplicando el DT y DA para este caso, en las cuales se puede apreciar que para todas las variables la diferencia es prácticamente cero.

Tabla 6.13. Diferencias entre las señales del DT y DA para el caso NS del motor de inducción sin carga

	i_{qs} (A)	i_{ds} (A)	i_{qr} (A)	i_{dr} (A)	λ_{qs} (Wb)	λ_{ds} (Wb)	λ_{qr} (Wb)	λ_{dr} (Wb)	T_e (N·m)	ω_r (rpm)
Diferencia	0.0054	0.0008	0.0056	0.0007	0	0.0001	0.0002	0.0001	0.0176	0.0308

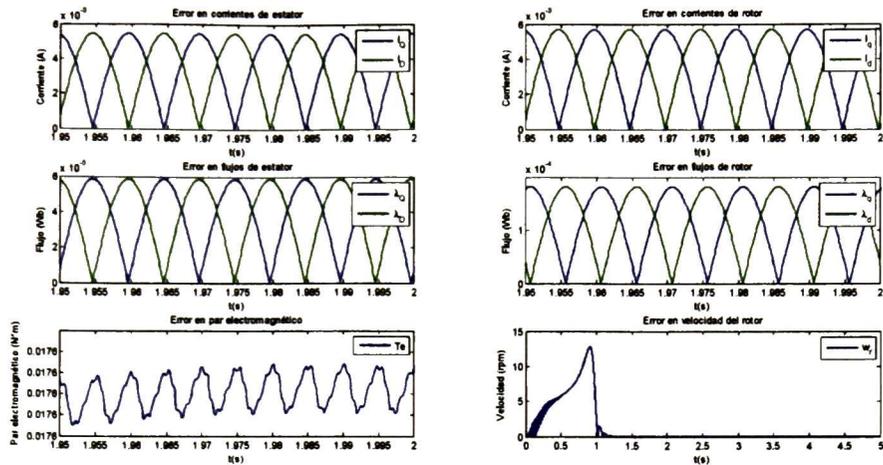


Figura 6.81 Diferencias entre el DT y DA NS del motor de inducción sin carga

6.5.2 Resultados incluyendo saturación magnética

Cuando se incluye saturación magnética se utilizan las ecuaciones (3.58) y (4.28) del DT y DA respectivamente. En la Figura 6.82 se muestra la velocidad del rotor, ésta es igual al del comportamiento del caso sin incluir saturación magnética. Se estabiliza en 1.25 al valor de 1250 rpm. En la Figura 6.83 se muestran en figuras superpuestas la velocidad entre el caso de magnetización lineal y con saturación magnética.

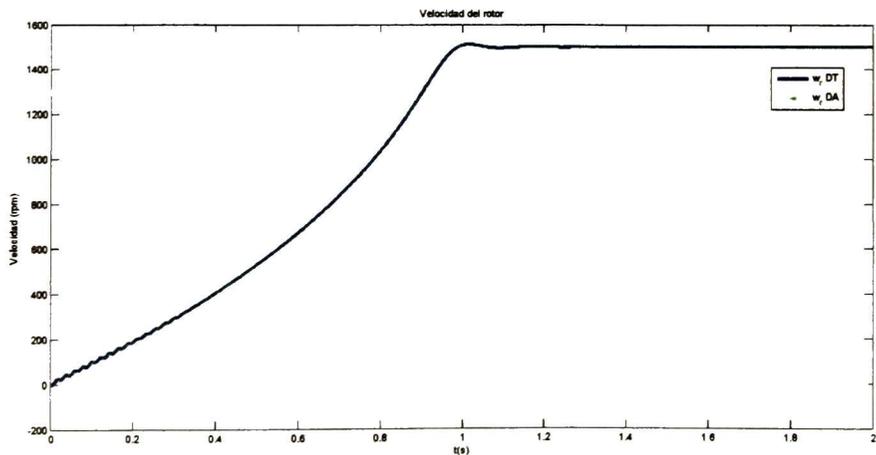


Figura 6.82 Velocidad del rotor incluyendo saturación, operación sin carga

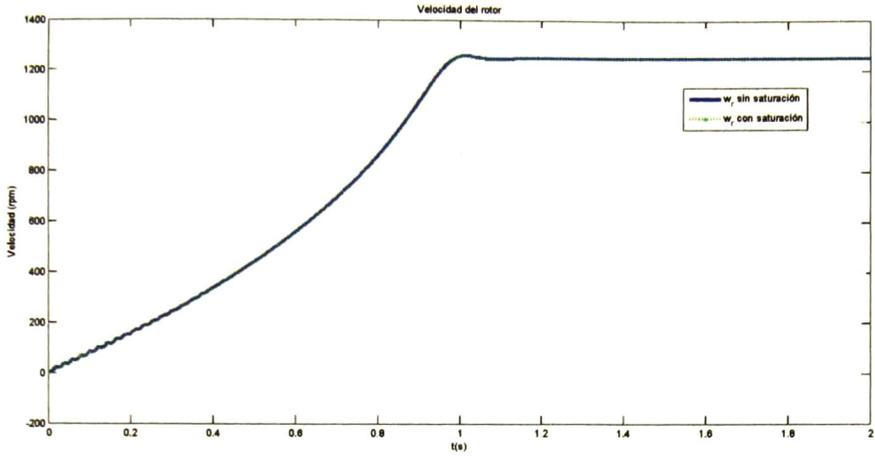


Figura 6.83 Comparación de la velocidad del rotor para el caso de magnetización lineal y con saturación del motor de inducción sin carga

El par electromagnético y las corrientes del estator y rotor se muestran en la Figura 6.84, Figura 6.85 y Figura 6.86 respectivamente.

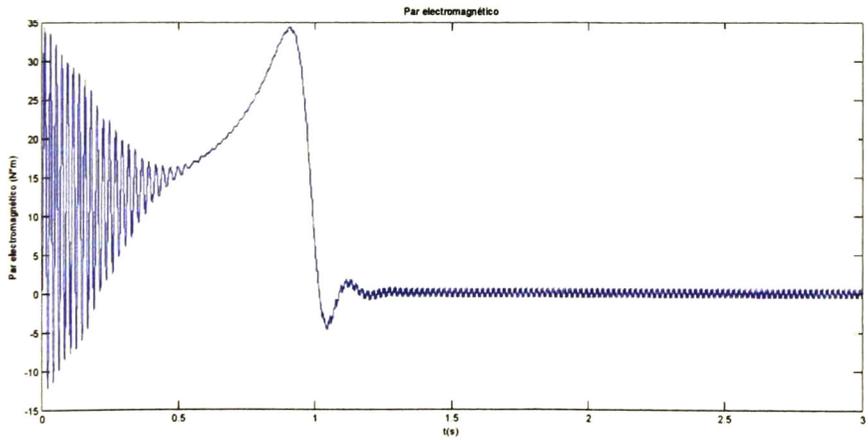


Figura 6.84 Par electromagnético CS del motor de inducción sin carga

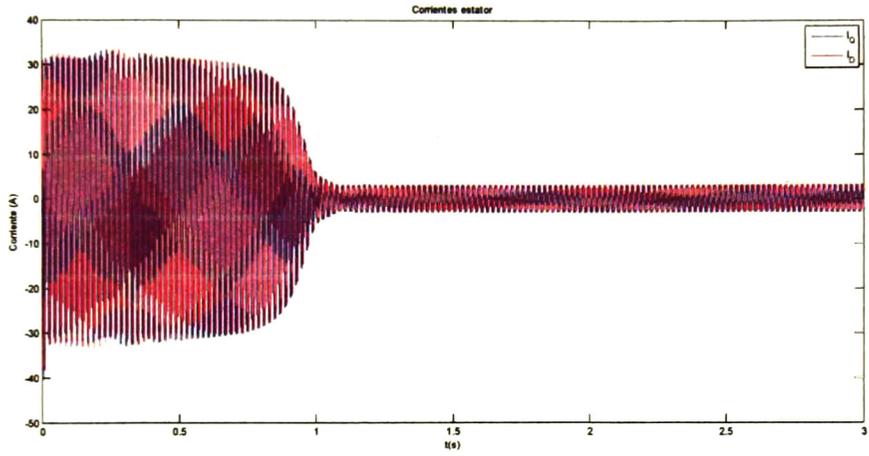


Figura 6.85 Corriente de estator del motor de inducción CS sin carga

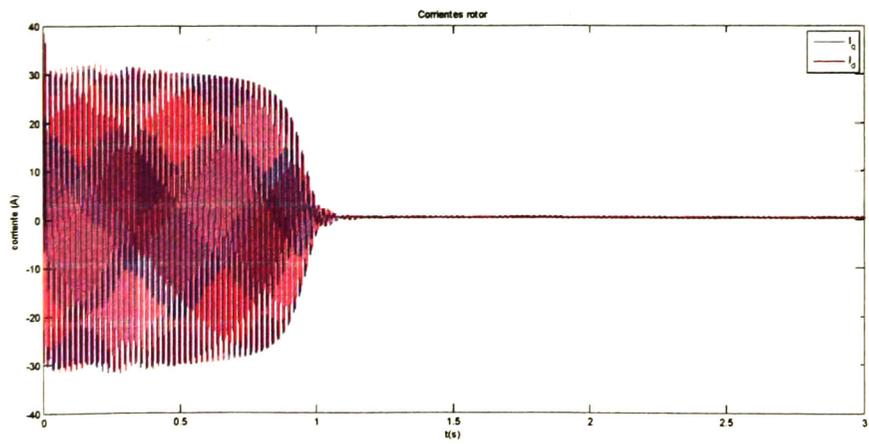


Figura 6.86 Corriente de rotor del motor de inducción CS sin carga

En las corrientes de estator en estado estable (Figura 6.87) en comparación con el caso sin saturación se aprecia la presencia de una componente de directa, los valores pico positivo son 3.193 A y su valor pico negativo -2.856 A.

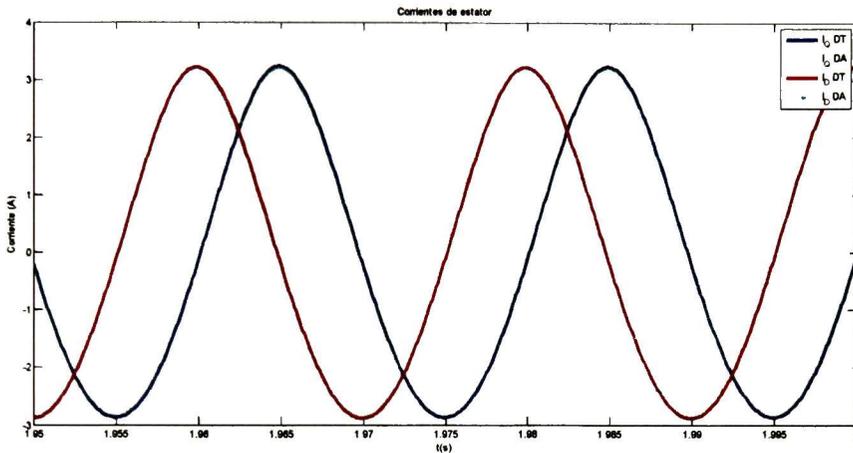


Figura 6.87 Corrientes de estator CS del motor de inducción sin carga

Las corrientes del rotor (Figura 6.88) no son senoidales puras y las componentes de eje directo y en cuadratura no están desfasadas 90° como en caso sin saturación magnética.

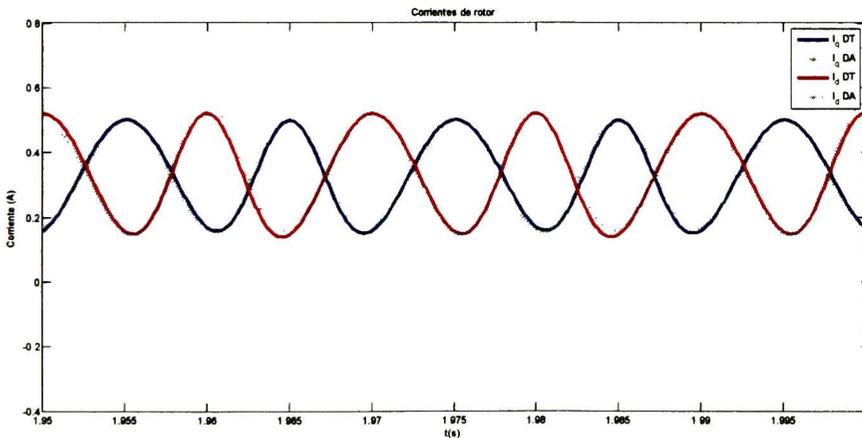


Figura 6.88 Corrientes del rotor CS del motor de inducción sin carga

Los enlaces de flujo de estator (Figura 6.89) y del rotor (Figura 6.90) son casi senoidales puras con un pequeño desplazamiento que indica una componente de corriente directa.

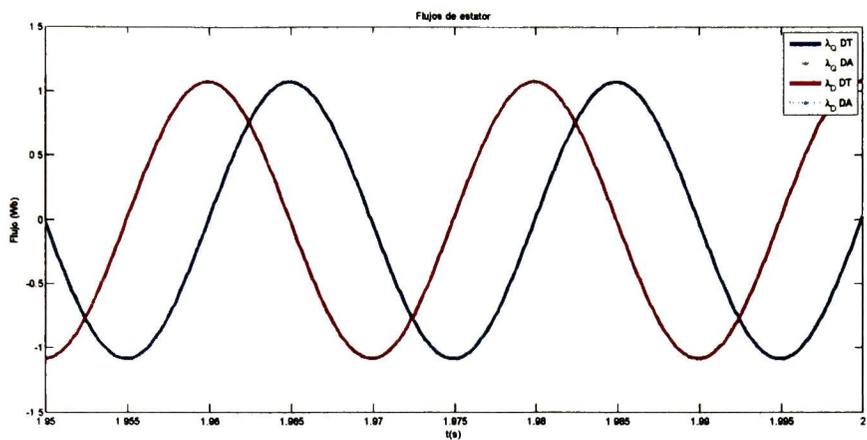


Figura 6.89 Flujos de estator para el CS del motor de inducción sin carga

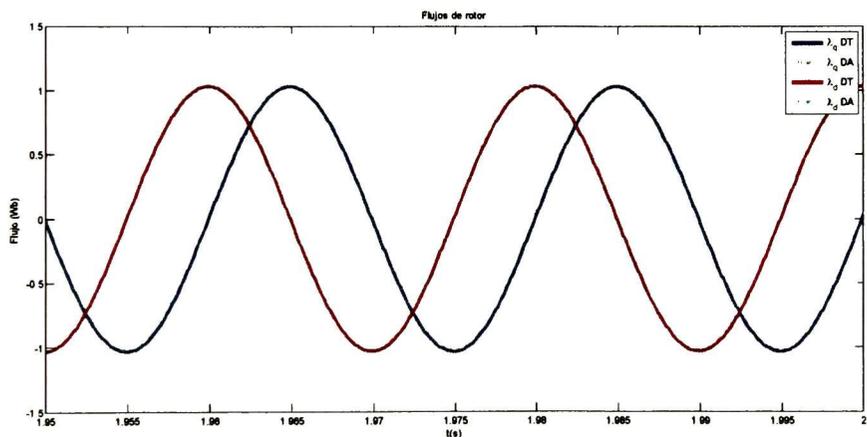


Figura 6.90 Flujos de rotor CS del motor de inducción sin carga

La corriente de magnetización (Figura 6.91) tiene valor máximo de 3.733 A y valor mínimo de -2.563 A. El enlace de flujo de magnetización (Figura 6.92) tiene valores máximos y mínimos de 1.022 Wb y -1.041 Wb respectivamente.

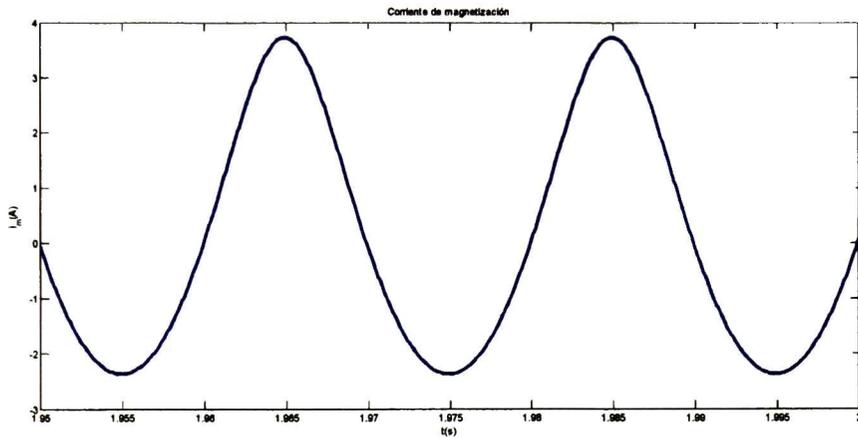


Figura 6.91 Corriente de magnetización del motor de inducción sin carga

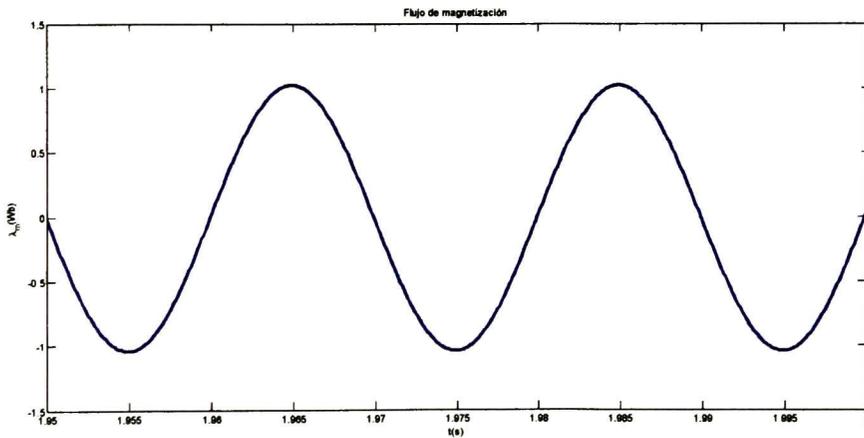


Figura 6.92 Enlace de flujo de magnetización del motor de inducción sin carga

En la Figura 6.93 se muestra la curva de magnetización simulada que se genera a partir de las corrientes y enlaces de flujo encontrados.

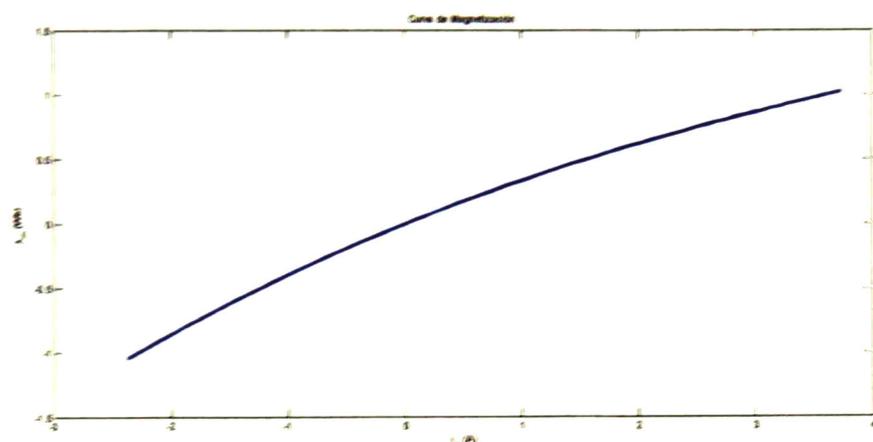


Figura 6.93 Curva de magnetización del modelado en DQ sin carga

El par electromagnético (Figura 6.94), aunque su valor medio es cero, su señal no es senoidal pura, esta señal tiene un amplitud que oscila entre -0.5832 a 0.6586 N*m.

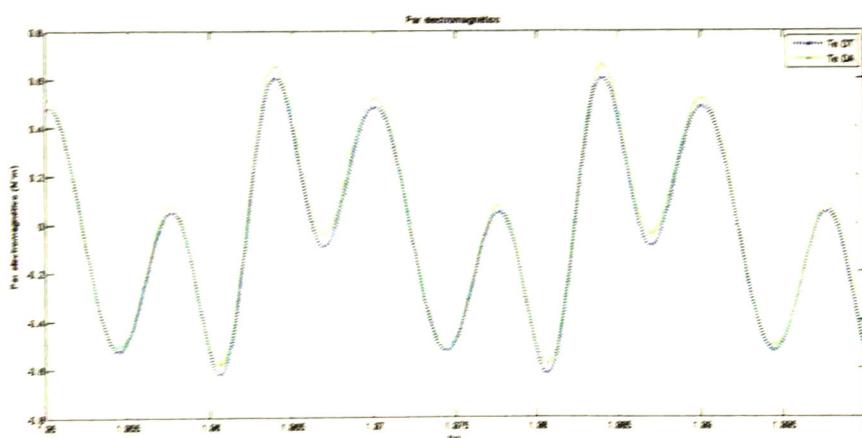


Figura 6.94 Par electromagnético CS del motor de inducción sin carga

La diferencia entre el DT y DA para el caso de magnetización no lineal se muestra en la Figura 6.95 y en la Tabla 6.14 donde la diferencia mayor ocurre en las corrientes, con un valor de centésimas, mientras que la diferencia de las otras variables se encuentra en el rango de las milésimas.

Tabla 6.14. Diferencias entre las señales del DT y DA para el caso NS del motor de inducción sin carga

	i_{qs} (A)	i_{ds} (A)	i_{qr} (A)	i_{dr} (A)	λ_{qs} (Wb)	λ_{ds} (Wb)	λ_{qr} (Wb)	λ_{dr} (Wb)	T_e (N·m)	ω_r (rpm)
Diferencia	1e-4	3e-4	1.1e-4	3.2e-4	3.5e-6	2e-6	7e-6	2e-7	3.8e-4	0.0073

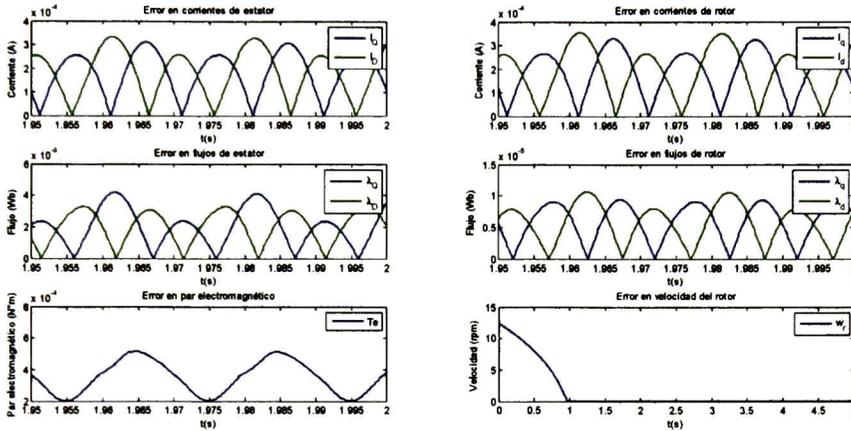


Figura 6.95 Diferencias entre el DT y DA NS del motor de inducción sin carga

En la Tabla 6.15 se puede apreciar que las componentes de corrientes y de los enlaces de flujos en el estator y del rotor son senoidales puras. Cuando se incluye saturación las corrientes y enlaces de flujo son desplazadas por una componente de corriente directa, y las señales senoidales son deformadas indicando presencia de componentes armónicos. La velocidad del rotor no se ve influida por el efecto de saturación magnética y su comportamiento dinámico y en estado estable es el mismo.

Tabla 6.15. Comparación de los valores máximos, mínimos y medios de las variables para el caso NS y CS

Dominio del Tiempo						
	De magnetización lineal			Saturada		
	Valor pico +	Valor pico -	Valor medio	Valor pico +	Valor pico -	Valor medio
I_{qs} (A)	2.843	-2.843	0	3.193	-2.842	0.1755
I_{ds} (A)	2.843	-2.843	0	3.193	-2.842	0.1755
I_{qr} (A)	0	0	0	0.5192	0.15	0.3346
I_{dr} (A)	0	0	0	0.5192	0.15	0.3346
I_m (A)	--	--	--	3.733	-2.563	0.585
λ_{qs} (Wb)	1.078	-1.078	0	1.073	-1.082	-0.0045

$\lambda_{ds} (Wb)$	1.078	-1.078	0	1.073	-1.082	-0.0045
$\lambda_{qr} (Wb)$	1.034	-1.034	0	1.02	-1.027	-0.0035
$\lambda_{dr} (Wb)$	1.034	-1.034	0	1.02	-1.027	-0.0035
$\lambda_m (Wb)$	--	--	--	1.022	-1.041	0.0895
$Te (Nm)$	0			0.6586	-0.5833	0.0376
$\omega_r (rpm)$	1250			1250		

6.5.3 Comparación del contenido armónico entre el caso de magnetización lineal y con saturación magnética

En la Figura 6.96 se muestra el contenido armónico de las corrientes de estator, se observan componentes armónicas hasta la tercer armónica causados por la inclusión de la saturación, mientras que en el caso de magnetización lineal está presente sólo la componente fundamental.

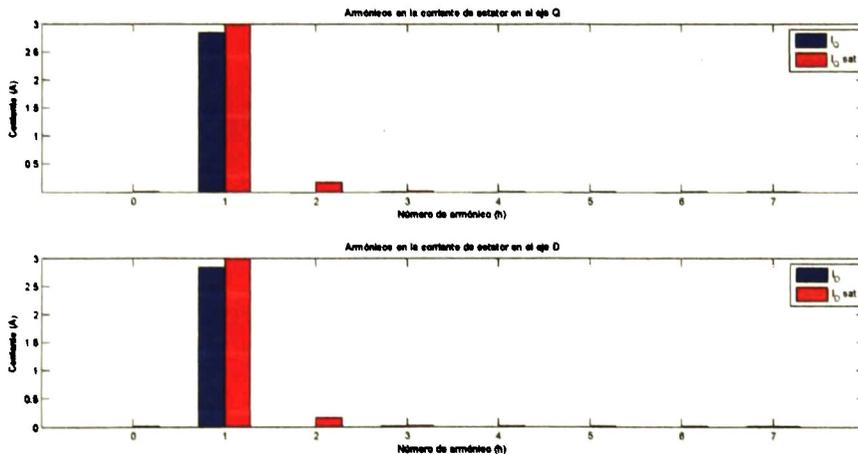


Figura 6.96 Comparación del contenido armónico de las corrientes de estator cuando se incluye y se desprecia la saturación del motor de inducción sin carga

La diferencia entre las corrientes del rotor (Figura 6.97) entre el caso sin saturación y con saturación, es que no se observan componentes armónicos cuando no se incluye la saturación, mientras que para el caso con saturación aparece hasta la cuarta armónica, incluyendo un término de CD.

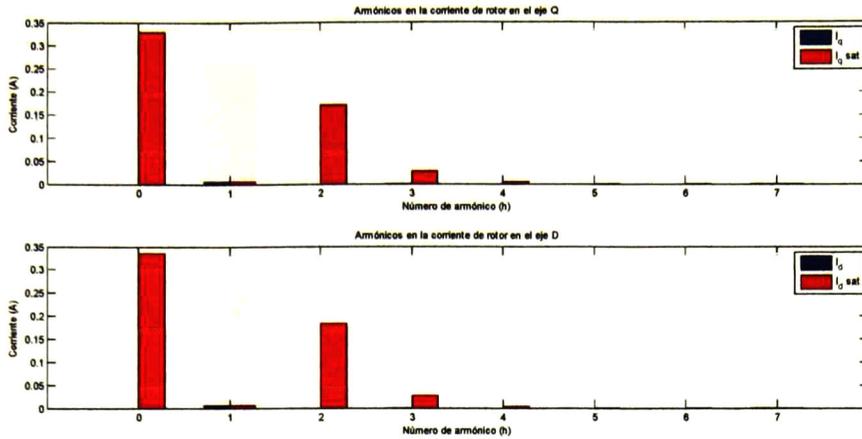


Figura 6.97 Comparación del contenido armónico de las corrientes de rotor cuando se incluye y se desprecia la saturación del motor de inducción sin carga

Los flujos de estator (Figura 6.98) y rotor (Figura 6.97) con y sin saturación tienen contenido armónico casi igual, con una pequeña componente de CD cuando se incluye saturación.

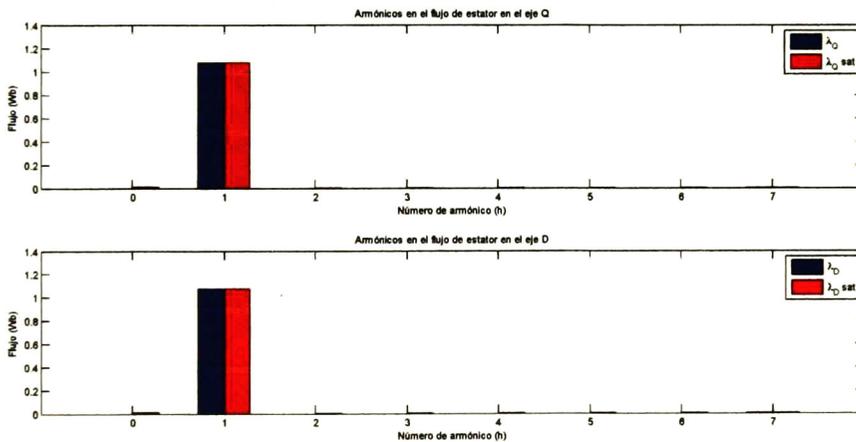


Figura 6.98 Comparación del contenido armónico de los enlaces de flujo de estator cuando se incluye y se desprecia la saturación del motor de inducción sin carga

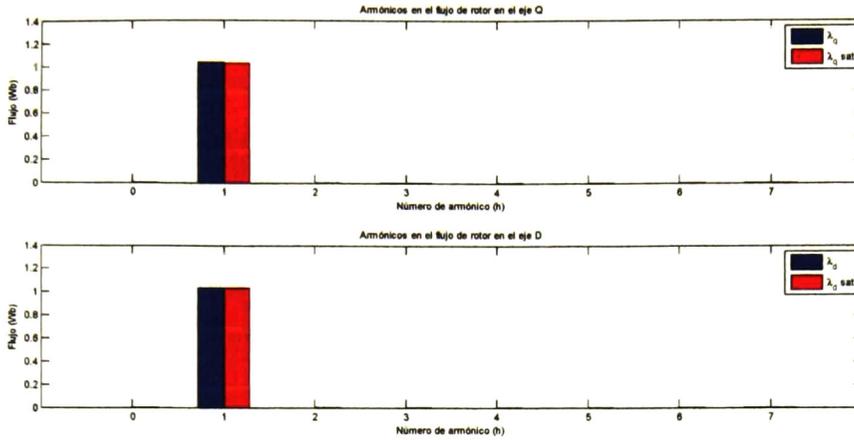


Figura 6.99 Comparación del contenido armónico de los enlaces de flujo del rotor cuando se incluye y se desprecia la saturación del motor de inducción sin carga

El contenido armónico de la corriente de magnetización (Figura 6.100), muestra la presencia de componentes armónicos, de diferente magnitud, de la segunda hasta la cuarta armónica. En los enlaces de flujo de magnetización (Figura 6.101) aparecen pequeñas componentes de directa y de segunda armónica.

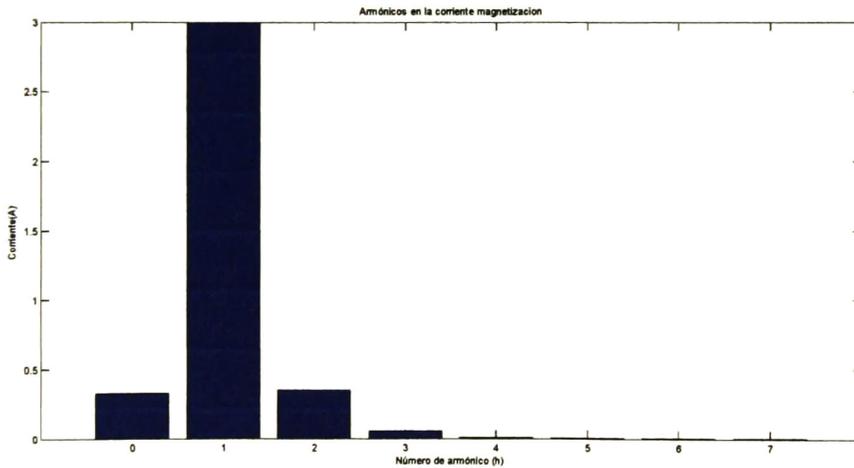


Figura 6.100 Contenido armónico de la corriente de magnetización del motor de inducción sin carga

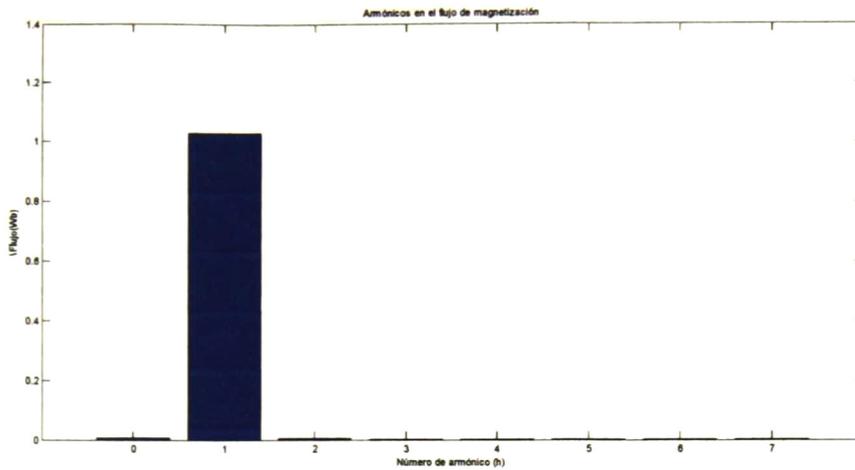


Figura 6.101 Contenido armónico del enlace de flujo de magnetización del motor de inducción sin carga

En el contenido armónico del par electromagnético (Figura 6.102) se puede observar la aparición de la todas las armónicas hasta la séptima cuando se incluye saturación magnética.

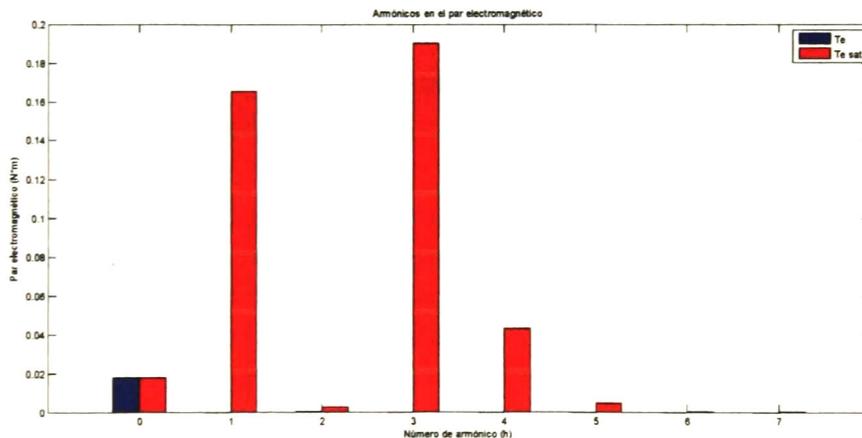


Figura 6.102 Comparación del contenido armónico del par electromagnético cuando se incluye y se desprecia la saturación del motor de inducción sin carga

El contenido armónico del motor de inducción sin carga para el caso sin y con saturación se muestra en la Tabla 6.16. Cuando no se incluye saturación la forma de las variables es senoidal pura. Cuando se incluye saturación se presentan componentes armónicas en prácticamente todas las variables, con excepción de los enlaces de flujo. Está presente además una componente de CD.

Tabla 6.16. Componentes armónicas para el caso sin saturación y con saturación

Dominio Armónico																
	De magnetización lineal								Saturada							
	Armónico								Armónico							
	0	1	2	3	4	5	6	7	0	1	2	3	4	5	6	7
$I_{qs} (A)$	--	2.84	--	--	--	--	--	--	1e-4	2.995	0.177	0.0271	0.004	0.0005	--	--
$I_{ds} (A)$	--	2.84	--	--	--	--	--	--	1e-4	2.995	0.177	0.0271	0.004	0.0005	--	--
$I_{qr} (A)$	--	--	--	--	--	--	--	--	0.164	0.005	0.17	0.0277	0.004	0.0005	--	--
$I_{dr} (A)$	--	--	--	--	--	--	--	--	0.164	0.005	0.17	0.0277	0.004	0.0005	--	--
$I_m (A)$	--	--	--	--	--	--	--	--	0.329	2.99	0.34	0.05	0.008	.001	0	1e-4
$\lambda_{qs} (Wb)$	--	1.08	--	--	--	--	--	--	0.013	1.08	9e-4	1e-4	--	--	--	--
$\lambda_{ds} (Wb)$	--	1.08	--	--	--	--	--	--	0.013	1.08	9e-4	1e-4	--	--	--	--
$\lambda_{qr} (Wb)$	--	1.03	--	--	--	--	--	--	0.003	1.03	5e-4	--	--	--	--	--
$\lambda_{dr} (Wb)$	--	1.03	--	--	--	--	--	--	0.003	1.03	5e-4	--	--	--	--	--
$\lambda_m (A)$	--	1.03	--	--	--	--	--	--	.0063	1.031	0.003	4e-4	1e-4	--	--	--
$Te (Nm)$	0.01	--	--	--	--	--	--	--	0.01	0.165	0.027	0.19	0.043	0.005	--	--
$\omega_r (rpm)$	1250	--	--	--	--	--	--	--	1250	--	--	--	--	--	--	--

6.6 Operación del motor de inducción con carga nominal

6.6.1 Caso cuando se desprecia la saturación magnética

La operación con carga nominal $T_L = 1.7896 N*m$ se hace para la condición de rotor parado hasta que se estabiliza su velocidad. La velocidad del rotor se muestra en la Figura 6.103, se estabiliza en 1.241seg después del arranque en el valor de 1247 rpm.

En la Figura 6.104 se muestra la velocidad del rotor del motor de inducción sin y con carga, en ésta se puede apreciar que la carga provoca un retardo en tiempo de 0.24 seg en la estabilización del motor.

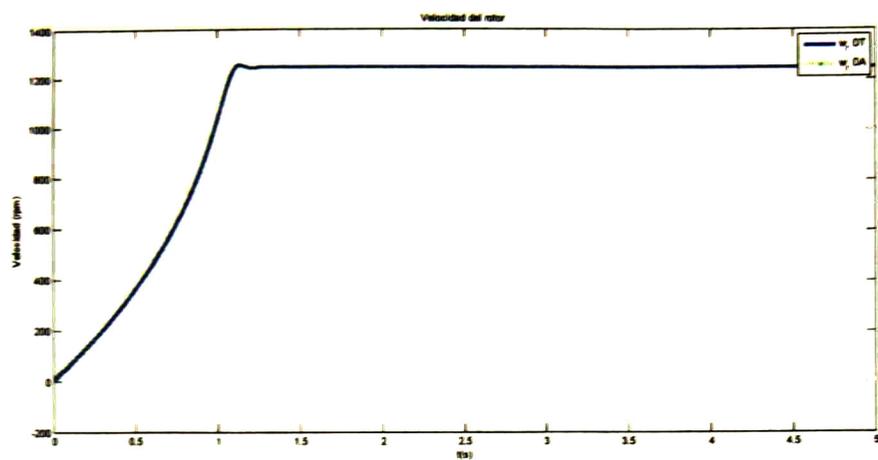


Figura 6.103 Velocidad del rotor del motor de inducción con carga

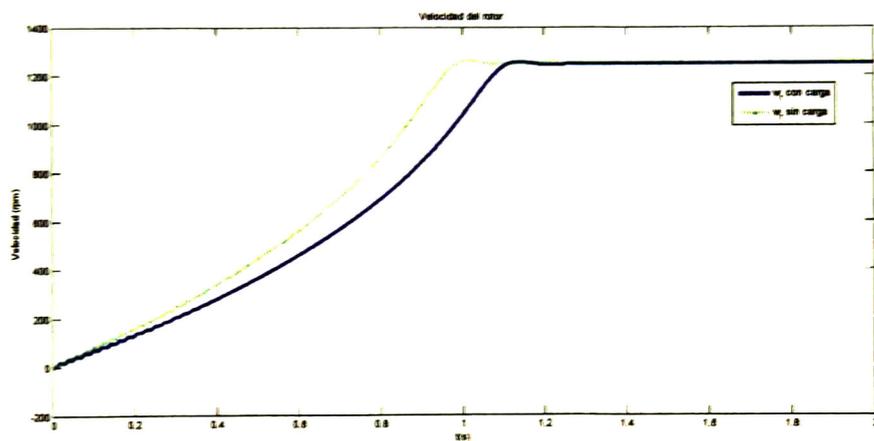


Figura 6.104 Comparación de las velocidades del rotor con y sin carga

El par electromagnético y las corrientes del estator y rotor se muestran en la Figura 6.105 a

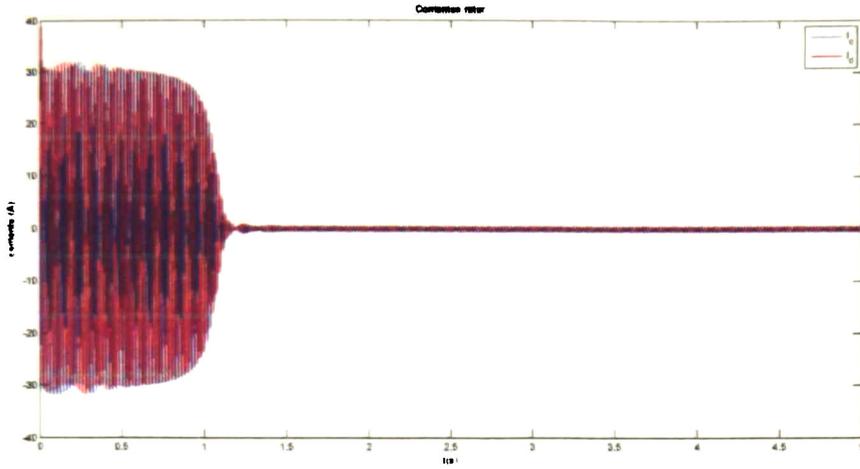


Figura 6.10~ respectivamente.

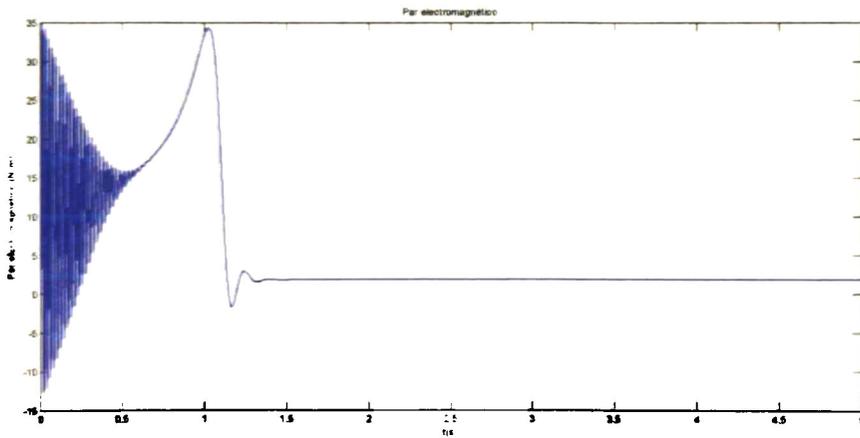


Figura 6.105 Par electromagnético τ del motor de inducción con carga

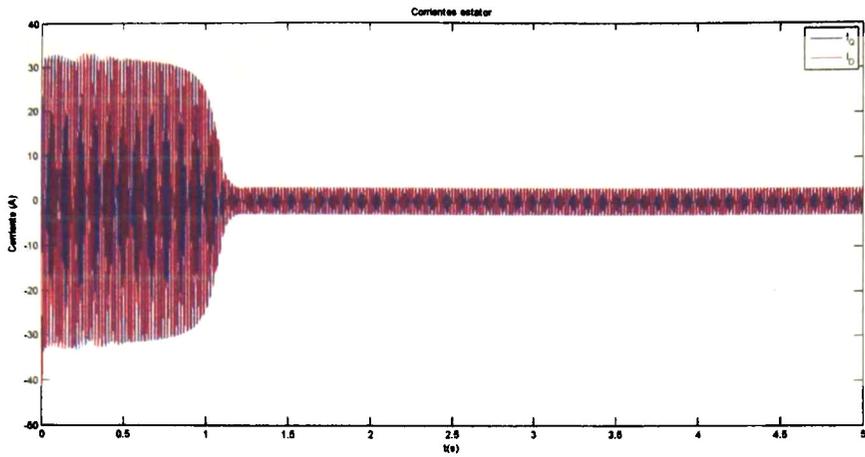


Figura 6.106 Corrientes del estator NS del motor de inducción con carga

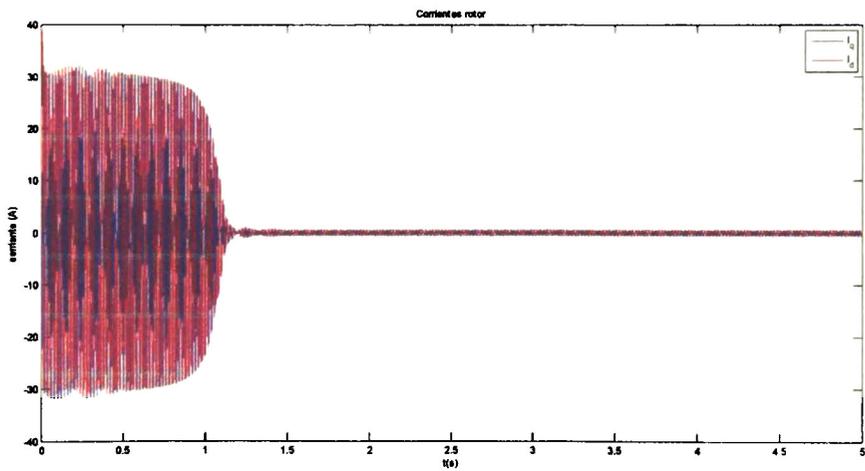


Figura 6.107 Corrientes del rotor NS del motor de inducción con carga

Las corrientes de estator en estado estable se muestran en la Figura 6.108, el valor pico de las corrientes de estator es de 2.932 A.

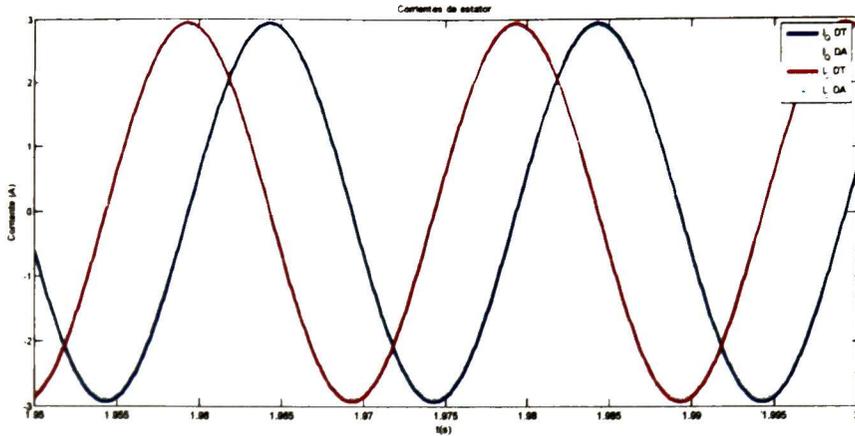


Figura 6.108 Corrientes de estator para NS del motor de inducción con carga

En la simulación de las corrientes de rotor (Figura 6.109) se puede apreciar que la corriente no es cero, tienen un valor pico de 0.5842 A.

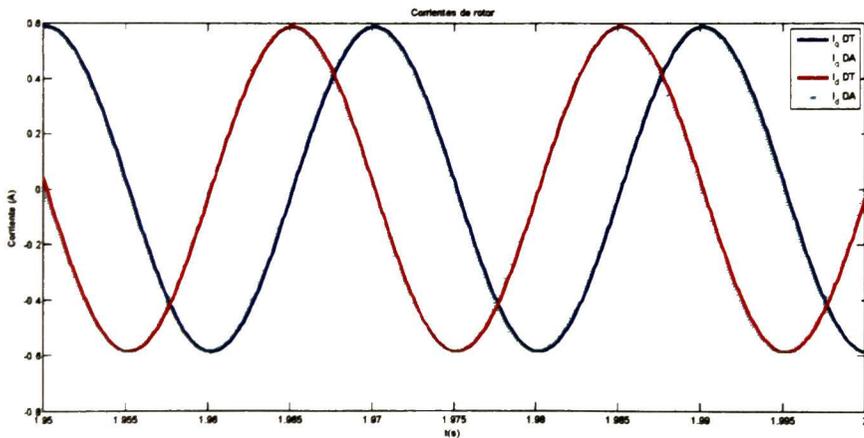


Figura 6.109 Corrientes de rotor NS del motor de inducción con carga

Los flujos de estator (Figura 6.110) y de rotor (Figura 6.111) tienen valores picos que disminuyen muy poco en comparación con el caso del motor de inducción con carga, siendo 1.072 Wb y 1.028 Wb el valor pico de los enlaces de flujo de estator y rotor respectivamente.

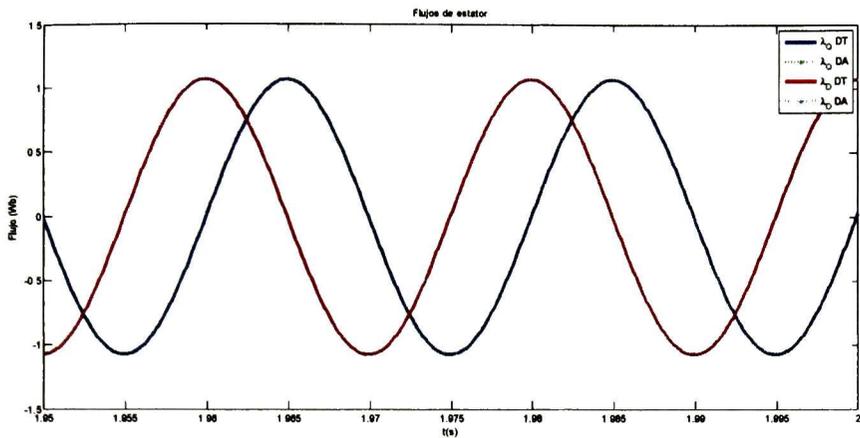


Figura 6.110 Flujos de estator NS del motor de inducción con carga

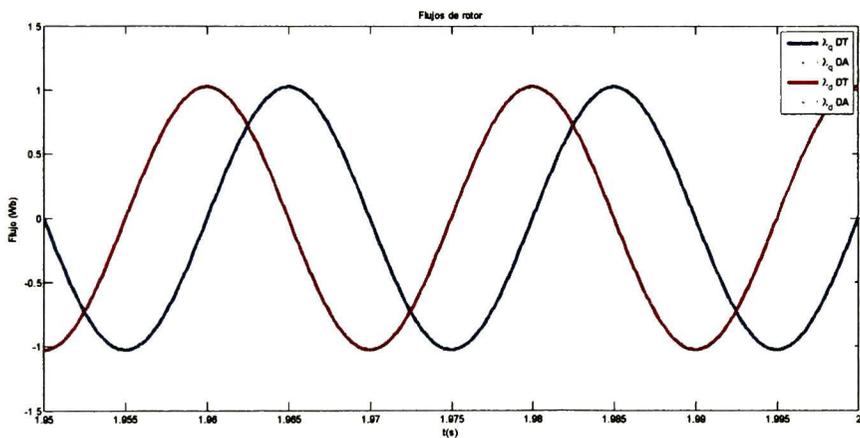


Figura 6.111 Flujos de rotor NS del motor de inducción con carga

El par electromagnético (Figura 6.112) para el caso de magnetización lineal es constante, de valor 1.7896 N*m.

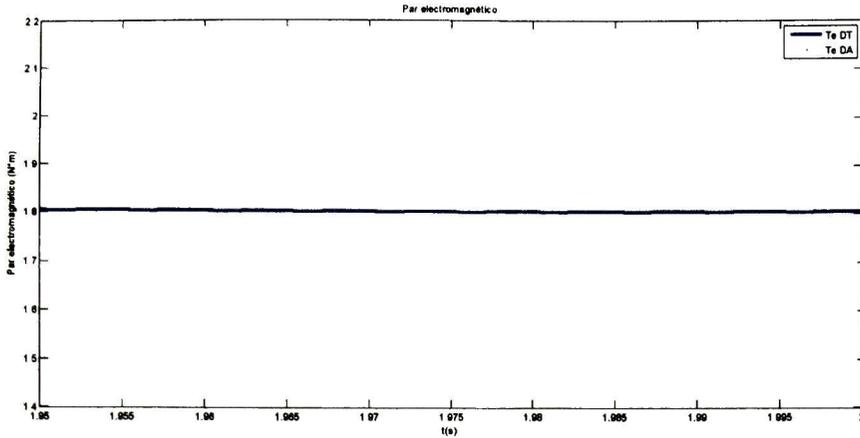


Figura 6.112 Par electromagnético del caso de magnetización lineal del motor de inducción sin carga

La diferencia entre las señales en DT y DA se muestra en la Tabla 6.17 y Figura 6.113, en las cuales se puede observar que la diferencia es mínima.

Tabla 6.17. Diferencias entre las señales del DT y DA para el caso NS del motor de inducción con carga

	i_{qs} (A)	i_{ds} (A)	i_{qr} (A)	i_{dr} (A)	λ_{qs} (Wb)	λ_{ds} (Wb)	λ_{qr} (Wb)	λ_{dr} (Wb)	T_e (N·m)	ω_r (rpm)
Diferencia	0.0015	0.0391	0.0004	0.0406	0.0004	0	0.0003	0	0.0021	0.0041

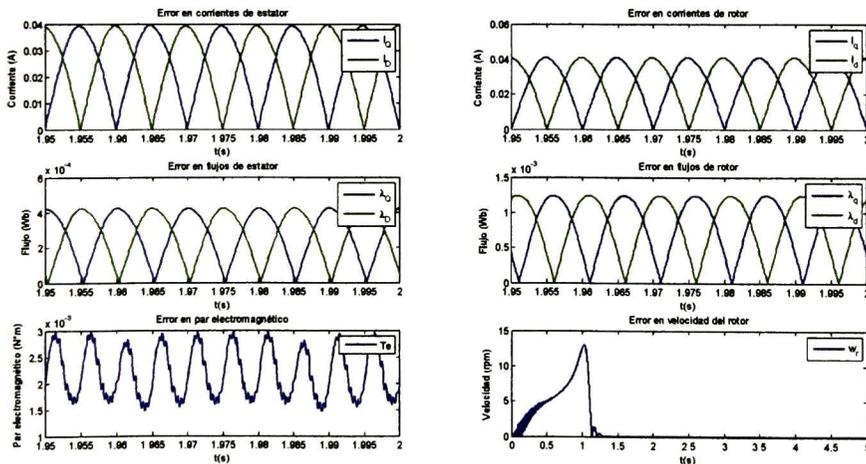


Figura 6.113 Diferencias entre el DT y DA NS del motor de inducción con carga

6.6.2 Resultados incluyendo saturación magnética

El comportamiento de la velocidad en el tiempo se muestra en la Figura 6.114, se estabiliza en 1.24 seg. al valor de 1247 rpm.

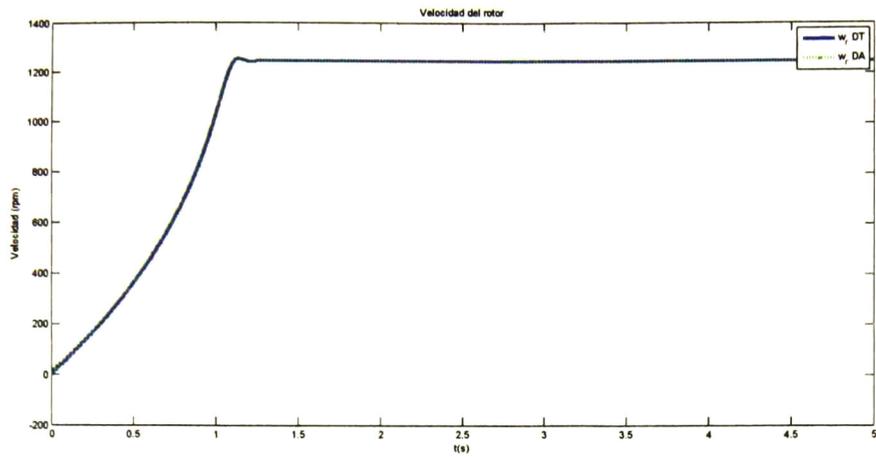


Figura 6.114 Velocidad del rotor del motor de inducción con carga

El par electromagnético, las corrientes de estator y rotor se muestran en la Figura 6.115 a Figura 6.117 .

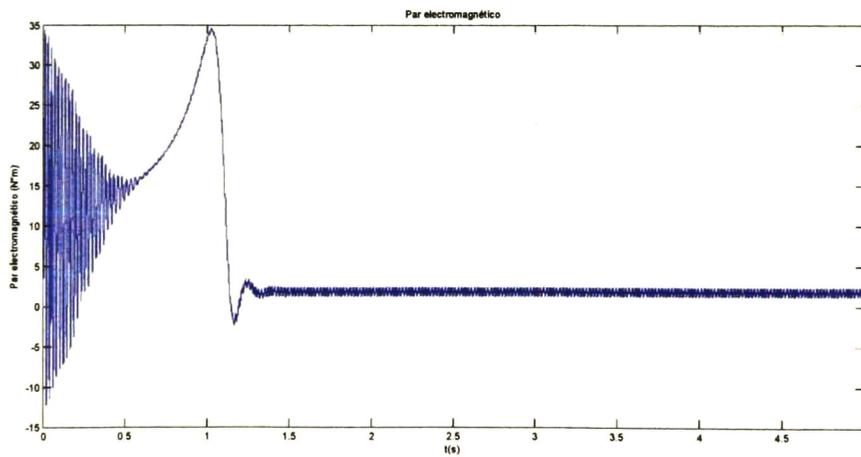


Figura 6.115 Par electromagnético CS del motor de inducción con carga

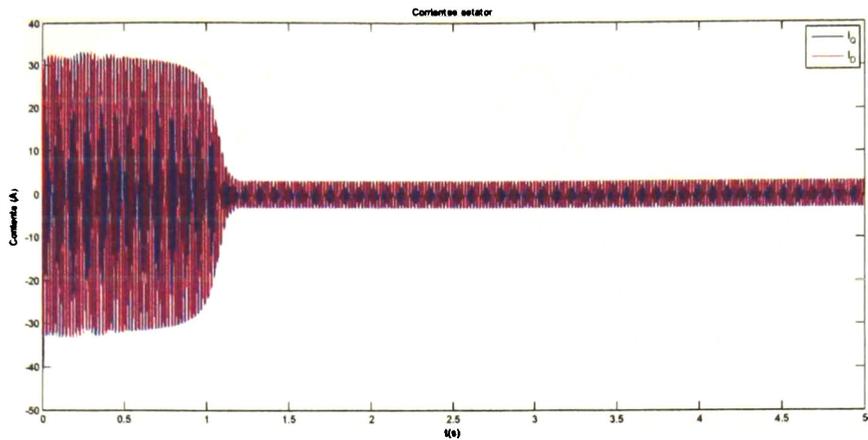


Figura 6.116 Corrientes del estator CS del motor de inducción con carga

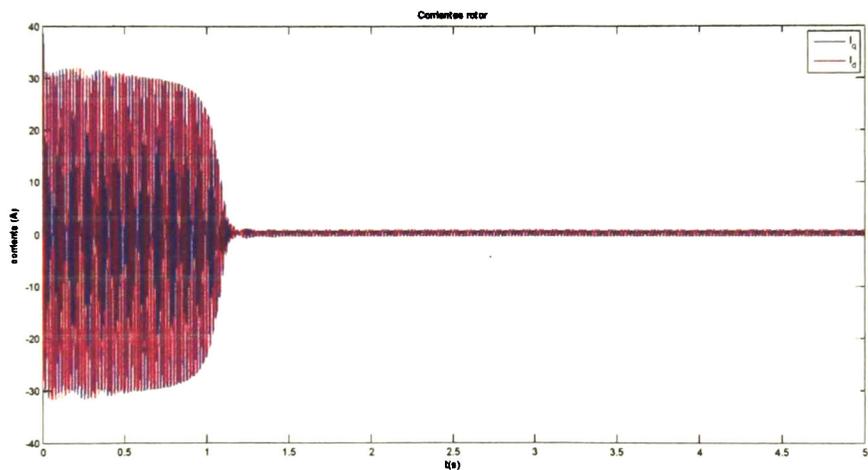


Figura 6.117 Corrientes del rotor CS del motor de inducción con carga

Las corrientes de estator se muestran en la Figura 6.118, los valores pico son de mayor magnitud respecto del caso de magnetización lineal, con valor máximo de 3.225 A y mínimo de -2.962 A. Las corrientes de rotor (Figura 6.119) muestran una deformación que indican la presencia de armónicos, el valor máximo es 0.765 A y mínimo de -0.4344 A.

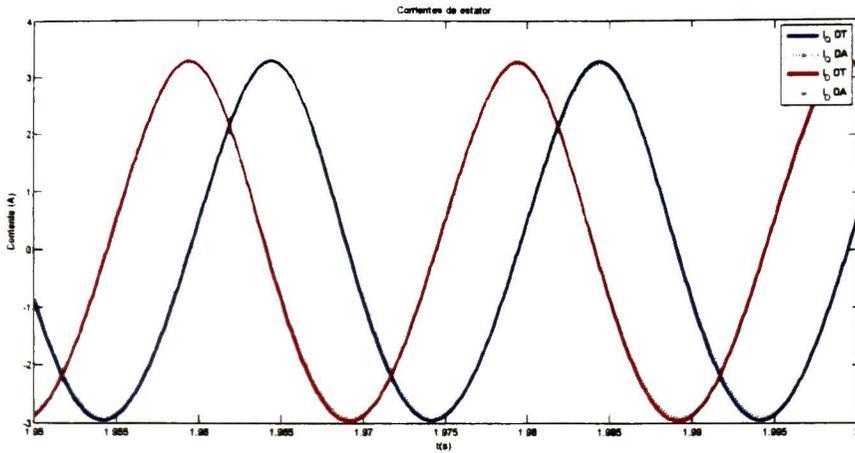


Figura 6.118 Corrientes de estator CS del motor de inducción con carga

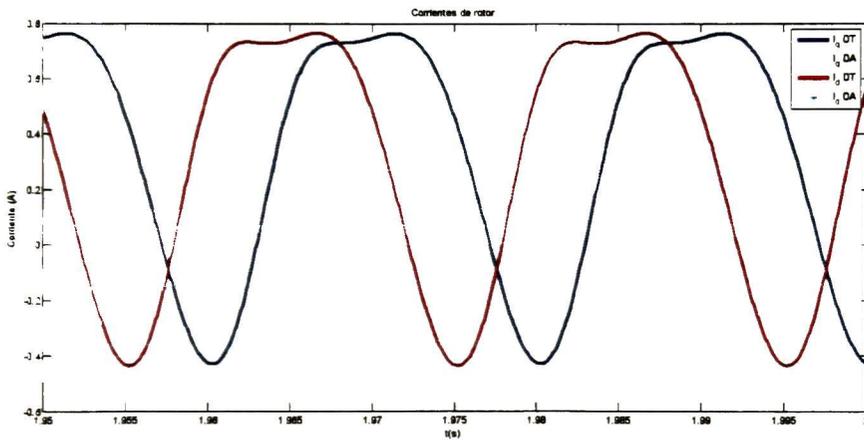


Figura 6.119 Corrientes del rotor CS del motor de inducción con carga

Los flujos de estator (Figura 6.120) y del rotor (Figura 6.121) son de la misma forma al de la operación sin carga. Se observa una componente de directa la cual mueve el eje de referencia a un valor diferente de cero. Los flujos de estator tienen un valor máximo de 1.068 Wb y mínimo de -1.076 Wb, mientras que los enlaces de flujo de rotor son de 1.027 Wb el valor máximo y el valor mínimo es de -1.024 Wb.

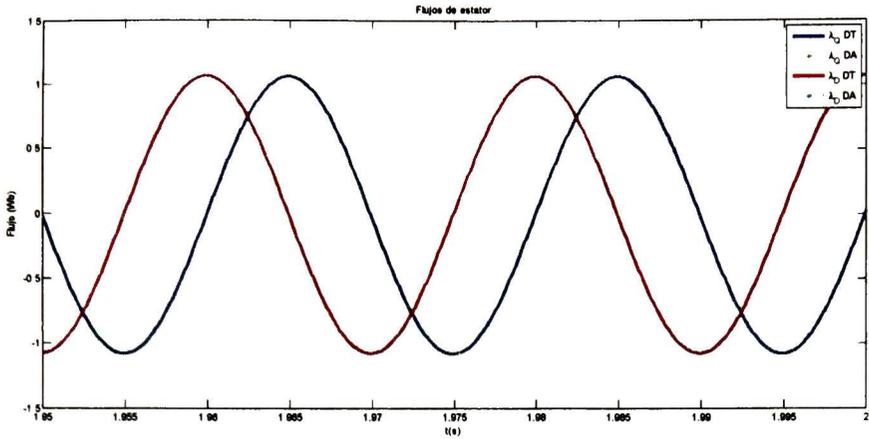


Figura 6.120 Flujos de estator CS del motor de inducción con carga

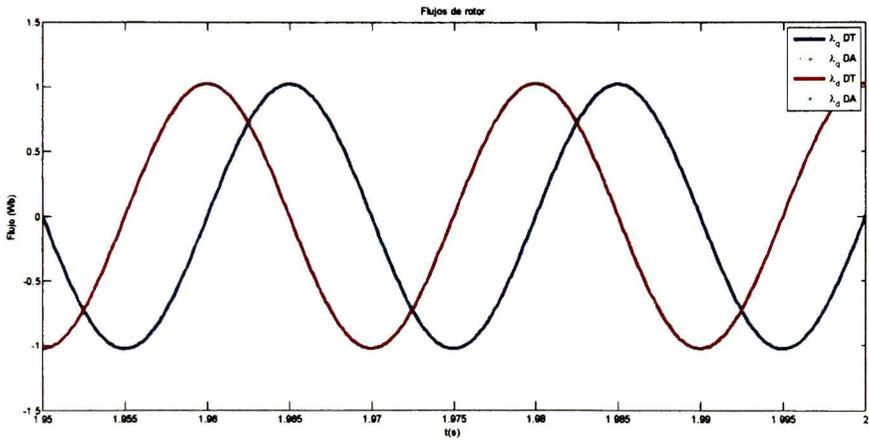


Figura 6.121 Flujos de rotor CS del motor de inducción con carga

La corriente y el enlace de flujo de magnetización se muestran en la Figura 6.122 y la Figura 6.123; la corriente de magnetización tiene valor máximo de 3.705 A y mínimo de -2.356 A, mientras el enlace de flujo de magnetización tiene un valor máximo de 1.016 Wb y mínimo de -1.034 Wb.

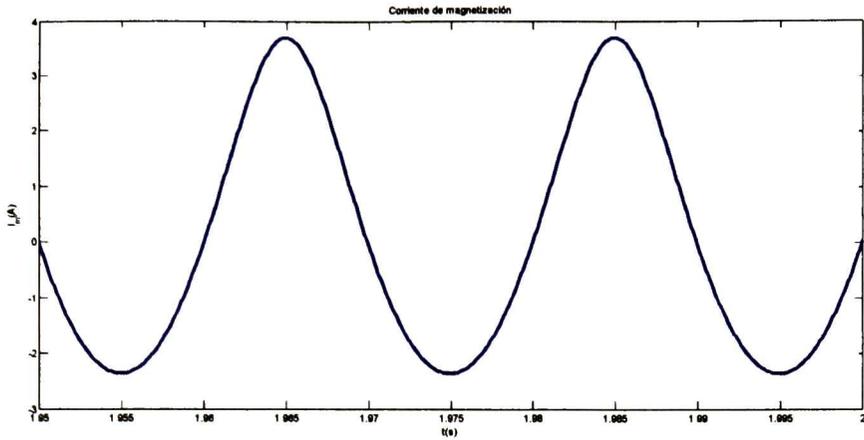


Figura 6.122 Corriente de magnetización CS del motor de inducción con carga

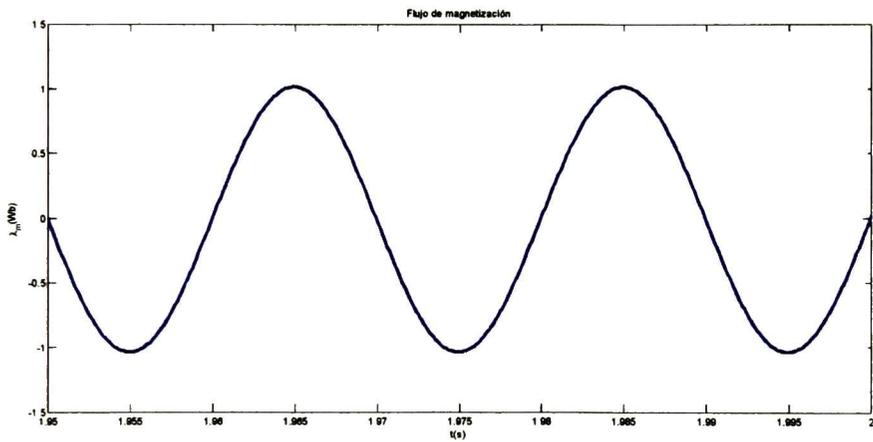


Figura 6.123 Enlace de flujo de magnetización del motor de inducción con carga

En la Figura 6.124 se muestra la curva de magnetización que se genera a partir de las corrientes y enlaces de flujo encontrados en simulación.

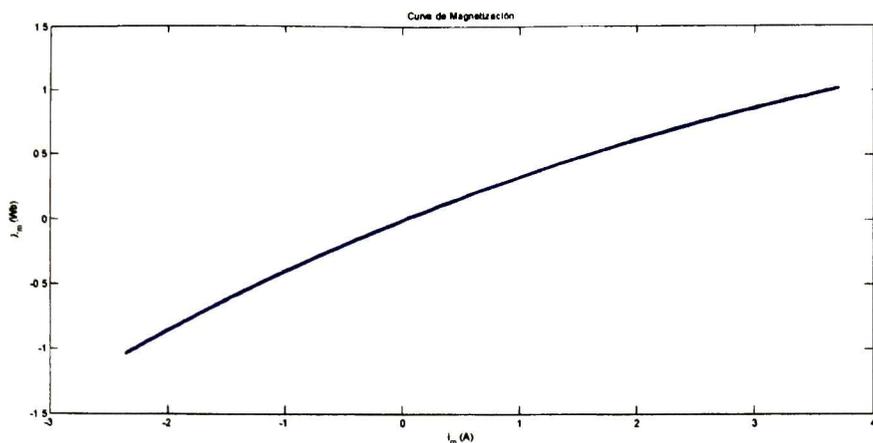


Figura 6.124 Curva de saturación del modelado en DQ con carga

El par electromagnético, al igual que para el caso sin carga, se encuentra montado sobre una componente de directa la cual es la carga aplicada al motor de inducción (1.79 N*m). En la Figura 6.125 se puede ver que la señal contiene armónicos debido a la saturación.

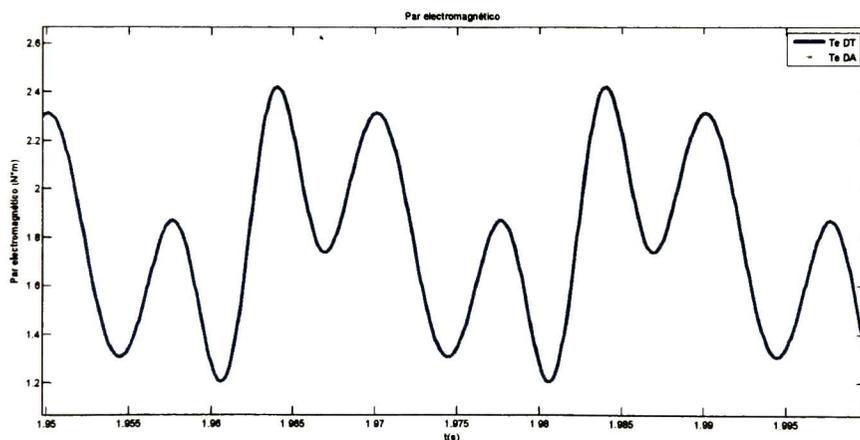


Figura 6.125 Par electromagnético CS del motor de inducción con carga

La diferencia entre las señales de DA y DT se muestran en la Tabla 6.18 y Figura 6.126, en los cuales se puede ver que las diferencias entre las señales son mínimas.

Tabla 6.18. Diferencias entre las señales del DT y DA para el caso CS del motor de inducción con carga

	i_{qs} (A)	i_{ds} (A)	i_{qr} (A)	i_{dr} (A)	λ_{qs} (Wb)	λ_{ds} (Wb)	λ_{qr} (Wb)	λ_{dr} (Wb)	T_e (N*m)	ω_r (rpm)
Diferencia	0.0007	0.0004	0.0007	0.0004	0	0	0	0	0.0022	0.0034

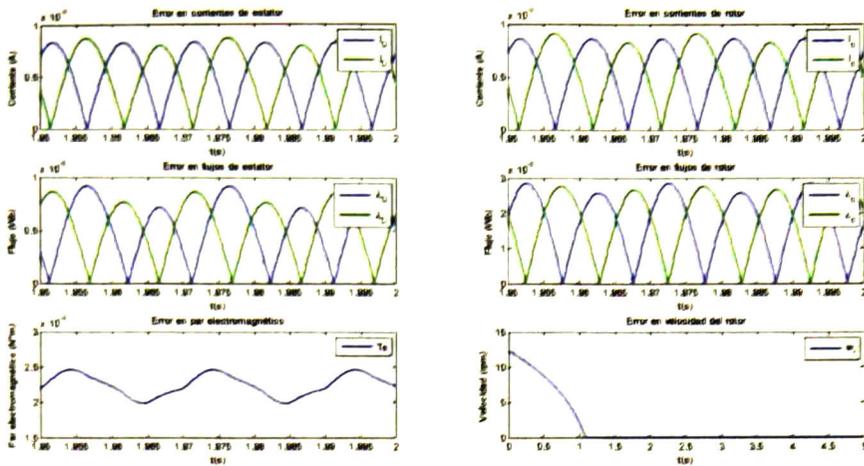


Figura 6.126 Diferencias entre el DT y DA CS del motor de inducción con carga

En la tabla a continuación se muestran los valores máximos y mínimos para el motor de inducción con carga entre el caso de magnetización lineal y con saturación. En ésta podemos observar que de igual manera las variables para el caso de magnetización lineal tienen valor medio de cero, el par electromagnético es constante en el valor de la carga, mientras que la velocidad disminuye con respecto al caso sin carga. Para la condición de saturación el valor absoluto de los valores máximos y mínimos no es el mismo, esto quiere decir que tiene un valor medio diferente de cero; el valor medio del par electromagnético es el valor de la carga que se le conectó al motor de inducción, mientras que la velocidad en estado estable se mantiene igual que en el caso de magnetización lineal.

Tabla 6.19. Comparación de los valores máximos, mínimos y medios de las variables para el caso NS y CS

Dominio del Tiempo						
	De magnetización lineal			Saturada		
	Valor pico +	Valor pico -	Valor medio	Valor pico +	Valor pico -	Valor medio
$I_{qs} (A)$	2.89	-2.89	0	3.225	-2.962	0.1465
$I_{ds} (A)$	2.89	-2.89	0	3.225	-2.962	0.1465
$I_{qr} (A)$	0.58	-1.643	0	0.765	-0.4344	0.1654
$I_{dr} (A)$	0.58	-1.643	0	0.765	-0.4344	0.1654
$I_m (A)$	--	--	--	3.705	-2.356	0.6754
$\lambda_{qs} (Wb)$	1.07	-1.07	0	1.068	-1.076	-0.004
$\lambda_{ds} (Wb)$	1.07	-1.07	0	1.068	-1.076	-0.004

$\lambda_{qr} (Wb)$	1.016	-1.016	0	1.027	-1.024	0.0015
$\lambda_{dr} (Wb)$	1.03	-1.03	0	1.027	-1.024	0.0015
$\lambda_m (Wb)$	--	--	--	1.016	-1.034	-0.162
$Te (Nm)$	1.8			2.421	1.207	1.814
$\omega_r (rpm)$	1247			1247		

6.6.3 Comparación del contenido armónico entre el caso de magnetización lineal y con saturación magnética

En la Figura 6.127 se muestra el contenido armónico de las corrientes de estator, en la cual se puede observar un aumento en la componente fundamental de la señal y la aparición de la segunda armónica y tercer armónica en poca medida cuando se incluye la saturación. En la Figura 6.128 se muestra el contenido armónico de las corrientes de rotor, en la cual se puede apreciar que la componente fundamental es poco mayor cuando se incluye la saturación, además, aparece una componente de directa así como de la segunda a la cuarta armónica.

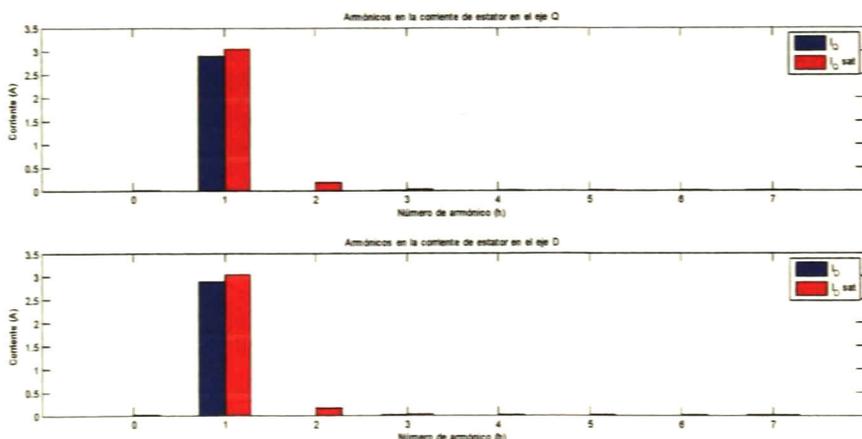


Figura 6.127 Comparación del contenido armónico de las corrientes de estator cuando se incluye y se desprecia la saturación del motor de inducción con carga

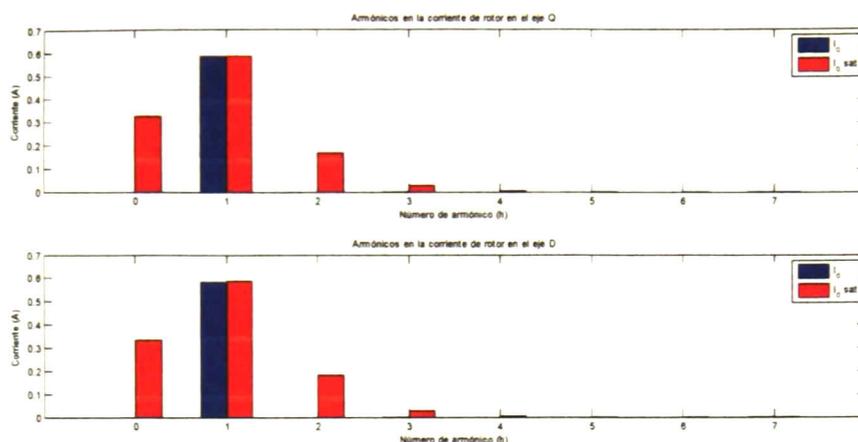


Figura 6.128 Comparación del contenido armónico de las corrientes de rotor cuando se incluye y se desprecia la saturación del motor de inducción con carga

En el caso de los flujos de estator (Figura 6.129) y rotor (Figura 6.130) no se aprecia la influencia de armónicos en las señales, sólo aparece la frecuencia fundamental, y en menor medida una pequeña componente de directa cuando se incluye la saturación magnética en los flujos de estator.

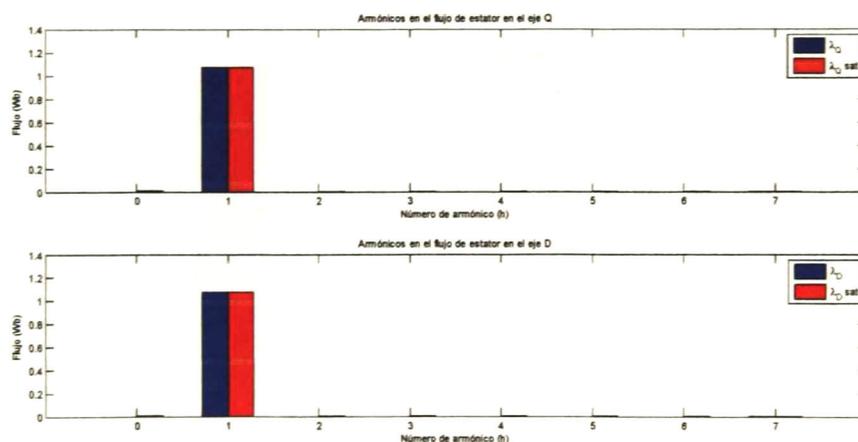


Figura 6.129 Comparación del contenido armónico de los flujos de estator cuando se incluye y se desprecia la saturación del motor de inducción con carga

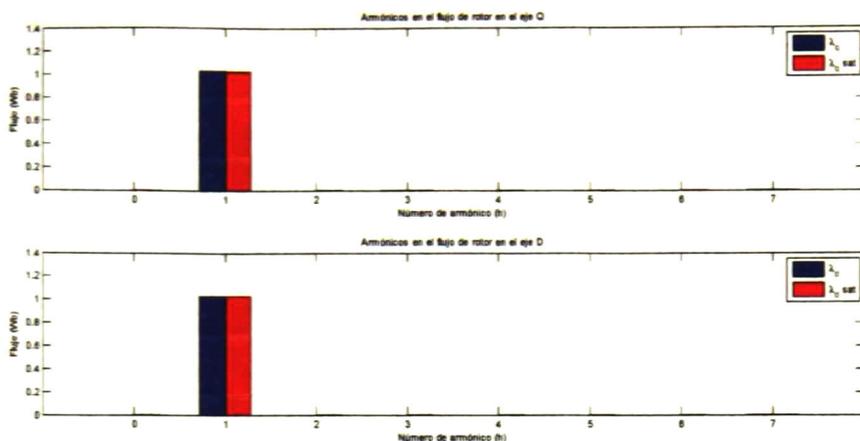


Figura 6.130 Comparación del contenido armónico de los flujos de rotor cuando se incluye y se desprecia la saturación del motor de inducción con carga

En la Figura 6.131 y en la Figura 6.132 se muestran el contenido armónico de la corriente y el flujo de magnetización; en la corriente de magnetización se puede apreciar que además del armónico de la frecuencia fundamental también aparecen el segundo, tercer y cuarto armónico así como el de directa; en el flujo de magnetización es casi solamente el de frecuencia fundamental y con menor medida el segundo armónico y el de directa.

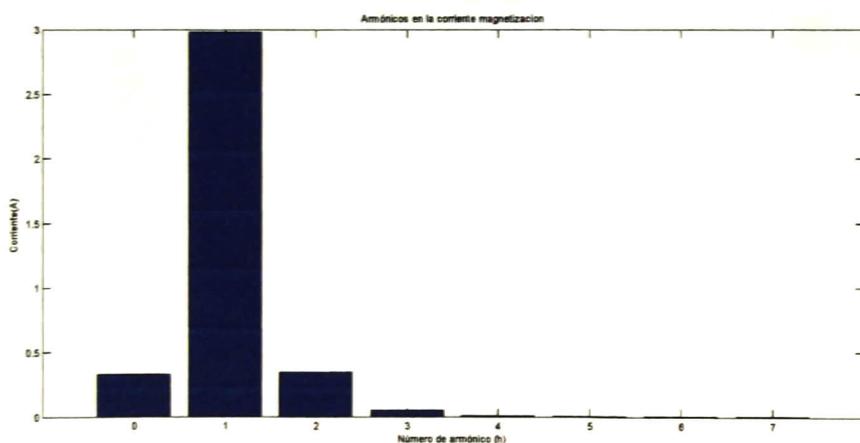


Figura 6.131 Contenido armónico de la corriente de magnetización del motor de inducción con carga

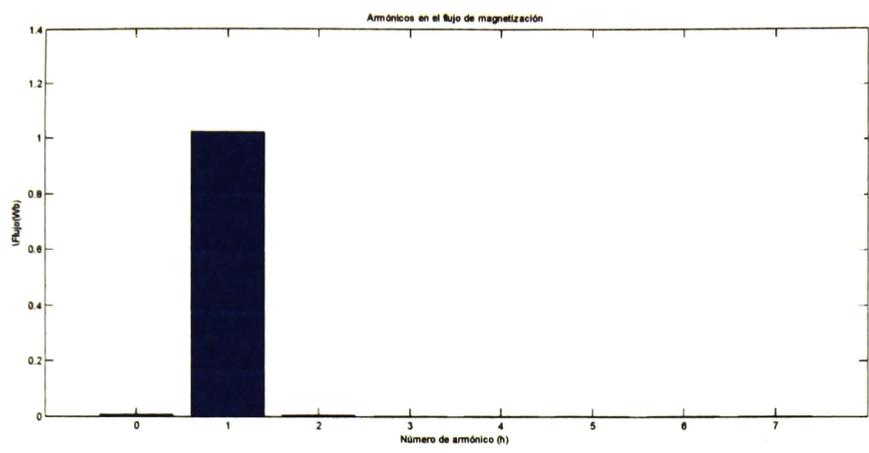


Figura 6.132 Contenido armónico del flujo de magnetización del motor de inducción con carga

En el contenido armónico del par electromagnético (Figura 6.133) se puede observar que para el caso de magnetización lineal y de saturación aparece la componente de directa, que es igual al valor de la carga en el motor de inducción. En el caso con saturación aparecen en además de la componente de directa otras componentes armónicas.

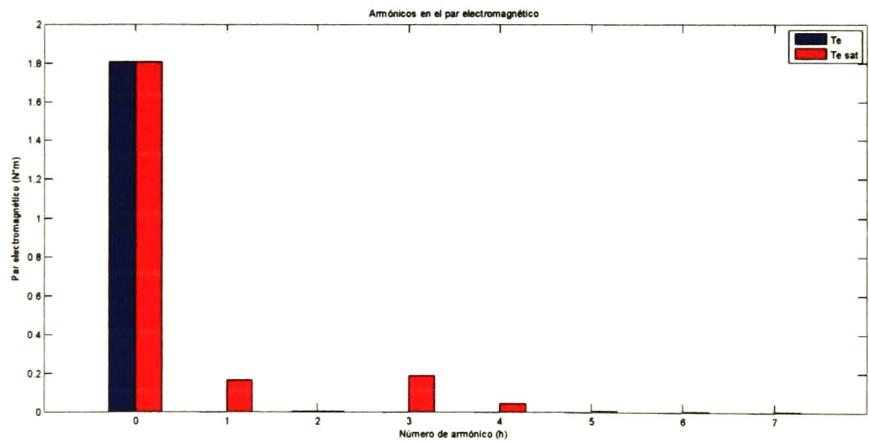


Figura 6.133 Comparación del contenido armónico del par electromagnético cuando se incluye y se desprecia la saturación del motor de inducción con carga

En la Tabla 6.20 se muestra el contenido armónico para el motor de inducción con carga para el caso de magnetización lineal y con saturación, en éste podemos ver que cuando se incluye la saturación se hacen presentes todos los armónicos hasta el séptimo para las corrientes del estator y del rotor. En los enlaces de flujo están presentes, además de la componente fundamental, una componente de directa y el segundo armónico. En el par

electromagnético, están presentes las componentes armónicas y la componente de directa, de valor igual a la conectada al motor de inducción.

Tabla 6.20. Componentes armónicas para el caso sin saturación y con saturación

Dominio Armónico																
	De magnetización lineal							Saturada								
	Armónico							Armónico								
	0	1	2	3	4	5	6	7	0	1	2	3	4	5	6	7
$I_{qs} (A)$	--	2.89	--	--	--	--	--	--	1e-4	3.04	0.175	0.026	0.004	4e-4	--	--
$I_{ds} (A)$	--	2.89	--	--	--	--	--	--	1e-4	3.04	0.175	0.026	0.004	4e-4	--	--
$I_{qr} (A)$	--	0.58	--	--	--	--	--	--	0.162	0.59	0.168	0.027	0.004	5e-4	--	--
$I_{dr} (A)$	--	0.58	--	--	--	--	--	--	0.162	0.59	0.168	0.027	0.004	5e-4	--	--
$I_m (A)$	--	--	--	--	--	--	--	--	0.324	2.97	0.342	0.053	8e-3	9e-4	0	1e-4
$\lambda_{qs} (Wb)$	--	1.07	--	--	--	--	--	--	0.013	1.07	9e-4	1e-4	--	--	--	--
$\lambda_{ds} (Wb)$	--	1.07	--	--	--	--	--	--	0.013	1.07	9e-4	1e-4	--	--	--	--
$\lambda_{qr} (Wb)$	--	1.03	--	--	--	--	--	--	0.002	1.03	5e-4	--	--	--	--	--
$\lambda_{dr} (Wb)$	--	1.03	--	--	--	--	--	--	0.002	1.03	5e-4	--	--	--	--	--
$\lambda_m (Wb)$	--	--	--	--	--	--	--	--	6.2e-3	1.02	0.0029	4e-4	1e-4	--	--	--
$Te (Nm)$	1.8	--	--	--	--	--	--	--	1.8	0.16	0.0026	0.187	0.042	0.0047	--	--
$\omega_r (rpm)$	1247	--	--	--	--	--	--	--	1247	--	--	--	--	--	--	--

Capítulo 7

7 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

7.1 Conclusiones

- Se desarrolló un modelo matemático para la inclusión de la saturación al modelo del motor de inducción en el dominio del tiempo. Se incluye operación en vacío y rotor bloqueado del motor.
- Se desarrollaron los modelos matemáticos en dominio armónico en estado estable (DA) y en estado transitorio (DAD) para el motor de inducción. Estos modelos incluyen los efectos de la saturación magnética.
- Se implementaron los modelos de dominio del tiempo así como los de dominio armónico en un programa de simulación digital (MATLAB).
- Se mostró que la saturación magnética del motor de inducción genera diversas componentes armónicas que pueden influir en forma determinante en los parámetros eléctricos y en la operación del motor de inducción.
- La inclusión de la saturación en el modelo nos permite observar la naturaleza real del par electromagnético que presenta un comportamiento oscilatorio armónico con valor medio igual a la magnitud del par de carga equivalente en un modelo sin saturación.
- Se analizó la influencia de la saturación y de las técnicas de solución: en el dominio armónico, en el dominio armónico estacionario y en el dominio armónico dinámico.
- Se muestra que los parámetros eléctricos obtenidos de las pruebas tradicionales de vacío y rotor parado pueden dar lugar a inconsistencias cuando no se consideran los efectos de la saturación magnética.

7.2 Trabajos Futuros

- Se propone investigar la influencia de señales de entrada no senoidales en el comportamiento del motor de inducción cuando se incluye saturación magnética.
- Se propone incorporar al motor controles de velocidad, par y de posición y analizar las componentes armónicas por influencia del control, de la electrónica de potencia y la saturación magnética.
- Implementar en tiempo real un motor de inducción y verificar los resultados teóricos con los obtenidos de manera experimental en motores de inducción de alta influencia magnética.
- Desarrollar un procedimiento para la determinación experimental de parámetros eléctricos obtenidos de las pruebas tradicionales de operación en vacío y de rotor bloqueado
- Extender esta técnica y procedimientos a otros tipos de máquinas eléctricas.

APÉNDICE

A. Aproximación de la curva de saturación

La característica de saturación del motor de inducción está dada por la curva de enlaces de flujo de magnetización λ_m vs. Corriente de magnetización i_m , ésta se obtiene experimentalmente mediante mediciones de campo. Una curva típica de magnetización se muestra en la (Figura A.1).

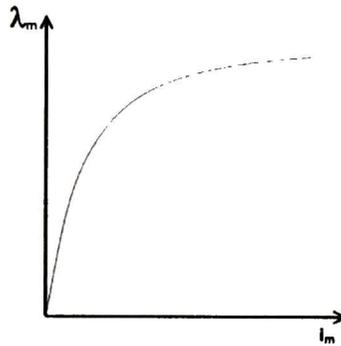


Figura A.1 Curva de magnetización

El flujo de magnetización tiene la forma

$$\lambda_m = L_m(i_m) i_m, \quad (8.1)$$

donde:

$$i_m = i_s + i_r. \quad (8.2)$$

Cuando se desprecia la saturación magnética, la relación enlaces de flujo-corriente de magnetización es lineal y la inductancia de magnetización es constante $L_m(i_m) = \text{const.}$ y corresponde a la pendiente de la parte lineal o a un valor de corriente de magnetización en la zona de saturación.

La curva de saturación generalmente se aproxima por funciones poligonales o con funciones hiperbólicas. La aproximación polinomial es de la forma

$$\lambda_m = f(i_m) \quad (8.3)$$

En este trabajo se aproxima la curva de saturación por una función polinomial de tercer orden completa, de la forma:

$$\lambda_m = f(i_m) = a_1 i_m + a_2 i_m^2 + a_3 i_m^3 \quad (8.4)$$

Esta función se aproxima mediante mínimos cuadrados [19]. Esta técnica minimiza la suma de los cuadrados de las diferencias ordenadas entre los valores calculados por la función de aproximación y los valores que se tienen de la curva de saturación experimental. Consiste en obtener el mínimo de la función:

$$e(a_1, a_2, a_3) = \sum_{k=1}^n [\lambda_{m_k} - f(i_{m_k})]^2 \quad (8.5)$$

Donde λ_{m_k} son los valores de los enlaces de flujo experimentales y $f(i_{m_k})$ son los valores evaluados por la función de aproximación, n es el número de valores de la curva.

Los coeficientes de la función de aproximación se obtienen de los mínimos de los errores (8.5), igualando a cero las derivadas de los errores respecto de los coeficientes a_1 , a_2 y a_3 ,

$$\frac{\partial e}{\partial a_1} = -2i_{m_k} \sum_{k=1}^n [\lambda_{m_k} - (a_1 i_{m_k} + a_2 i_{m_k}^2 + a_3 i_{m_k}^3)] \quad (8.6)$$

$$\frac{\partial e}{\partial a_2} = -2i_{m_k}^2 \sum_{k=1}^n [\lambda_{m_k} - (a_1 i_{m_k} + a_2 i_{m_k}^2 + a_3 i_{m_k}^3)] \quad (8.7)$$

$$\frac{\partial e}{\partial a_3} = -2i_{m_k}^3 \sum_{k=1}^n [\lambda_{m_k} - (a_1 i_{m_k} + a_2 i_{m_k}^2 + a_3 i_{m_k}^3)] \quad (8.8)$$

Después de algunas simplificaciones se obtiene el sistema de ecuaciones

$$\begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^n i_{m_k}^2 & \sum_{k=1}^n i_{m_k}^3 & \sum_{k=1}^n i_{m_k}^4 \\ \sum_{k=1}^n i_{m_k}^3 & \sum_{k=1}^n i_{m_k}^4 & \sum_{k=1}^n i_{m_k}^5 \\ \sum_{k=1}^n i_{m_k}^4 & \sum_{k=1}^n i_{m_k}^5 & \sum_{k=1}^n i_{m_k}^6 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^n \lambda_{m_k} i_{m_k} \\ \sum_{k=1}^n \lambda_{m_k} i_{m_k}^2 \\ \sum_{k=1}^n \lambda_{m_k} i_{m_k}^3 \end{bmatrix} \quad (8.9)$$

Los coeficientes para la curva de saturación correspondiente a los datos indicados en la Tabla B. son:

Tabla A.1. Coeficientes del polinomio de aproximación

Polinomio	Coficiente a_1	Coficiente a_2	Coficiente a_3
1	0.9388	-0.5098	0.1187

En la Figura A.2 se muestran los puntos de la curva de saturación así como la aproximación polinomial a esos puntos.

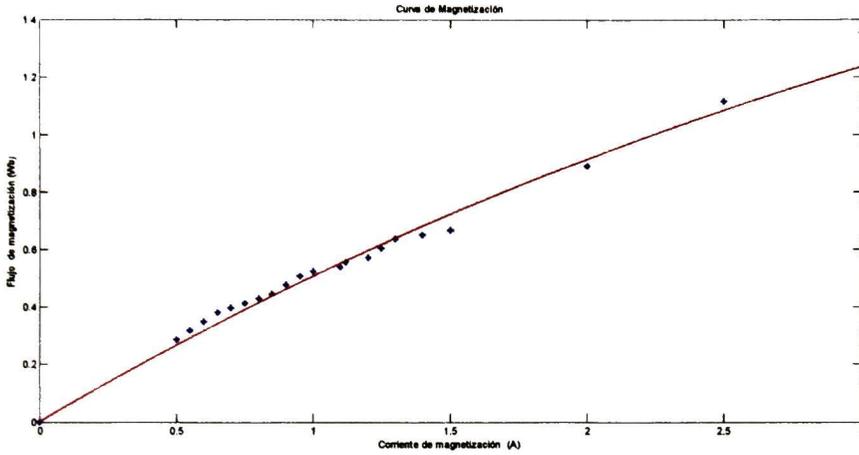


Figura A.2 Aproximación polinomial de 3er orden de la curva de saturación

El error de aproximación entre los puntos y el polinomio, es

$$Error_{rms} = 0.6792_{rms} \quad (8.10)$$

El polinomio de de aproximación (8.4) expresado en el dominio armónico tiene la forma,

$$\Psi_m = L_m(I_m)_{Tp} I_m = (a_1 I_h + a_2 I_{m_{Tp}} + a_2 I_{m_{Tp}}^2) I_m, \quad (8.11)$$

$$L_m(I_m)_{Tp} = (a_1 I_h + a_2 I_{m_{Tp}} + a_2 I_{m_{Tp}}^2), \quad (8.12)$$

donde I_m es un vector con el contenido armónico de la corriente de magnetización, $I_{m_{Tp}}$ es una matriz tipo Toeplitz creada a partir del vector I_m , mientras que Ψ_m es un vector de contenido armónico del enlace de flujo de magnetización y I_h es una matriz diagonal de orden $2h+1$.

La corriente de magnetización en el dominio armónico, es igual la suma de los vectores armónicos de las corrientes de estator y del rotor para cada uno de los ejes.

$$I_m = I_s + I_r, \quad (8.13)$$

B. Parámetros del motor de inducción

Tabla B.1. Datos del motor de inducción

Variable	Valor
Potencia nominal	3 hp
Voltaje nominal	415 Volts
Frecuencia nominal	50 Hz
Resistencia de estator	3.35 Ω
Resistencia de rotor	1.17 Ω
Inductancia de dispersión, estator y rotor	.01544 H
Inductancia de magnetización	0.3637 H
Inercia del rotor	.113 kgm ²
Polos	4

Tabla B.2. Datos de la curva de saturación

λ_m (Wb)	i_m (A)
0	0
0.2865	0.5
0.3183	0.55
0.3501	0.6
0.382	0.65
0.3979	0.7
0.4138	0.75
0.4297	0.8
0.4456	0.85
0.4775	0.9
0.5093	0.95
0.5252	1
0.5411	1.1
0.5570	1.12
0.5730	1.2
0.6048	1.25
0.6366	1.3
0.6525	1.4
0.6685	1.5
0.8913	2
1.1141	2.5
1.3528	3

Los datos fueron tomados de la referencia [11].

REFERENCIAS

- [1] Francisco C. De La Rosa, *Harmonics and Power Systems*. Boca Raton, FL, USA: Taylor and Francis, 2006.
- [2] Paul G. Cummings, "Estimating Effect of System Harmonic on Losses and Temperature Rise of Squirrel-Cage Motors," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. IA-22, no. 6, pp. 1121-1126, Noviembre/Diciembre 1986.
- [3] G. C. Jain, "The Effect of Voltage Wave Shape on the Performance of a Three-Phase Induction Motor," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS, no. 84, pp. 561-566, 1964.
- [4] Industry Applications Society / Power Engineering Society IEEE, *IEEE Recommended Practices and Requirments for Harmonic Control in Electrical Pwer Systems*. New York, USA: IEEE, 1993.
- [5] Robert D. Lorenz and Donald W. Novotny, "Saturation Effects in Field-Oriented Induction Machines," *IEEE Transactions on Industry Application*, vol. 26, no. 2, pp. 283-289, March/April 1990.
- [6] Charles R. Sullivan and Seth R. Sanders, "Model for Induction Machines eith Magnetic Saturation of the Main Flux Path," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 31, no. 4, pp. 907-917, Julio/Agosto 1995.
- [7] A.E. Fitzgerald, Charles Kingsley Jr, and Stephen D. Umans, *Electric Machinery*, Sexta edición ed. New York, USA: McGraw Hill, 20013.
- [8] Julio C. Moreira and Thomas A. Lipo, "Modeling of Saturated ac Machines Including Air Gap Flux Harmonic Components," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 28, no. 2, pp. 343-349, Marzo/Abril 1992.
- [9] John R. Brauer, "Saturation Harmonics and Current Waveforms of Single-Phase Induction Motors," A.O. Smith Corporation, Milwaukee, Wisconsin,.
- [10] A.M. Sharaf, "A Frequency Dependent Steady State Model of Induction Motor Load for Harmonic Flow Studies," Electrical Engineering Department, The University of New Brunswick, N.B., Canada,.
- [11] K.S. Sandhu and Vivek Pahwa, "A Novel Approach to Incorporate the Main Flux Saturation Effect in a three phase Induction Machine Motoring and Plugging," *International Journal Of Computer and Electrical Engineering*, vol. 3, no. 3, pp. 443-

448, June 2011.

- [12] Yi Kang He and T. A. Lipo, "Computer Simulation of an Induction Machine with Spatially Dependent Saturation," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-103, no. 4, pp. 707-714, April 1984.
- [13] Lucian and Lupsa-Tataru, "Modelling Saturated Induction Machines with a View to On-line Dynamic Security Analysis," *WSEAS transactions on Power Systemas*, vol. 3, no. 3, pp. 390-403, Mayo 2008.
- [14] A.F. Almarshoud, M.A. Abdel-halim, and A.I. Alolah, "Including Effects of Cross Saturation and Leakage Path Saturation Together in the Generalized Model of Three Phase Induction Machine," *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, vol. 1, pp. 195-200, 2001.
- [15] Enrique Acha and Manuel Madrigal, *Power Systems Harmonics - Computer Modelling and Analysis*. New York: John Wiley & Sons, LTD, 2001.
- [16] José de Jesús Chávez Muro, Tesis titulada: *Modelos Avanzados de Dispositivos de Sistemas de Potencia en Dominio Armónico Dinámico*. Cinvestavd, Unidad Guadalajara, Jalisco, México, 2009.
- [17] Chee-Mun Ong, *Dynamic Simulation of Electric Machinery*. New Jersey, USA: Prentice Hall, 1998.
- [18] Oleg Wasynczuk Paul C. Krause, *Electromechanical motion device*. USA: McGraw Hill Book Company, 1989.
- [19] Jhon H. Mathews and Kurtis D. Fink, *Métodos Numéricos con Matlab*, Tercera edición ed. Madrid, España: Pearson, 2000.



CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS DEL I.P.N. UNIDAD GUADALAJARA

El Jurado designado por la Unidad Guadalajara del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional aprobó la tesis

Análisis del Motor de Inducción en el Dominio Armónico y en el
Tiempo incluyendo Saturación Magnética

del (la) C.

Pablo RODRÍGUEZ ARCE

el día 13 de Diciembre de 2012.

Dr. José Manuel Cañedo Castañeda
Investigador CINVESTAV 3C
CINVESTAV Unidad Guadalajara

Dr. Juan Manuel Ramírez Arredondo
Investigador CINVESTAV 3C
CINVESTAV Unidad Guadalajara

Dr. Alexander Georgievich Loukianov
Investigador CINVESTAV 3C
CINVESTAV Unidad Guadalajara



CINVESTAV - IPN
Biblioteca Central



SSIT0011464