
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE MORELIA

"José María Morelos y Pavón"

DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES
PROGRAMA DE GRADUADOS E
INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA ELÉCTRICA
TESIS

**"IMPLEMENTACIÓN DE MODELOS DE
MÁQUINAS ELÉCTRICAS EN UN
ENTORNO DE SIMULACIÓN
MULTI-DOMINIO"**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

PRESENTA:
ARMANDO GARCÍA MEJÍA

DIRECTOR: DR. ENRIQUE MELGOZA VÁZQUES

CODIRECTOR:

REVISOR:

REVISOR:

MORELIA, MICHOACÁN, MÉXICO – MARZO 2019

Armando García Mejía: *IMPLEMENTACIÓN DE MODELOS DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS EN UN ENTORNO DE SIMULACIÓN MULTI-DOMINIO*, © Marzo 2019.

MESA DE REVISIÓN:
Dr. Enrique Melgoza Vázquez

LOCALIDAD:
Morelia, Michoacán, México

IMPRESA:
Marzo 2019 fecha de impresión.

Con todo mi amor para las personas que hicieron todo en la vida para que yo
pudiera lograr mis metas, por darme sus sabios consejos y nunca dudar de mi, a
ustedes por siempre mi alma y mi agradecimiento.

Mamá y Papá

Dedicado al amor de mi vida, Lupita O. A. (Chito)

♡ - ∞

RESUMEN

En este proyecto de tesis se implementan diversos modelos acoplados de máquinas eléctricas (transformador monofásico, motor de **CD** y motor de inducción) implementando la conexión de un modelo físico y llevándolo a un modelo eléctrico por medio de la extracción de parámetros. El modelo físico de la máquina eléctrica se implementa en el software **FLD** el cual resuelve por el Método de Elemento Finito (**FEM**) el campo magnético, en este software se extraen los parámetros necesarios para la construcción del circuito que modela la máquina eléctrica. En el software **OpenModelica**, se implementa el modelo de circuito de la máquina eléctrica, en este software al ser multidisciplinario se simulan las diferentes características de las máquinas eléctricas. También se implementa un control **PI** de voltaje de lazo cerrado de un convertidor **boost** para una máquina de **CD**, con el objetivo de demostrar la capacidad del software **OpenModelica**. Al final de este trabajo de tesis se presentan los problemas surgidos en la implementación de los diferentes modelos, así como los resultados satisfactorios de las simulaciones, conclusiones y los trabajos futuros pertinentes.

ABSTRACT

In this thesis project, several coupled models of electrical machines (single-phase transformer, **CD** motor and induction motor) are implemented, making the connection of a physical model and taking it to an electric model by means of the extraction of parameters. The physical model of the electric machine is implemented in the **FLD** software which solves the magnetic field by the Finite Element Method (**FEM**). In this software, the necessary parameters for the construction of the circuit that models the electric machine are extracted. In the **OpenModelica** software the circuit model of the electric machine is implemented, in this software, being multidisciplinary, the different characteristics of the electric machines are simulated. A closed loop voltage **PI** control of a **boost** converter for a **CD** machine is also implemented, in order to demonstrate the **OpenModelica** software's capacity.

At the end of this thesis work, the problems arising in the implementation are presented of the different models, as well as the satisfactory results of the simulations, conclusions and the works relevant futures.

ÍNDICE GENERAL

Índice de figuras	x
Índice de tablas	xviii
Códigos	xix
Acrónimos	xx
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Planteamiento del problema	1
1.1.1 Diferencias entre los entornos de simulación, Modelica y Simulink .	3
1.2 Estado del arte	4
1.3 Hipótesis	8
1.4 Objetivos	8
1.4.1 Objetivo general	8
1.4.2 Objetivos específicos	8
1.5 Metodología	9
1.6 Descripción del contenido de los capítulos	10
2 MARCO TEÓRICO	11
2.1 El lenguaje Modelica	11
2.1.1 Modelado de componentes en el software Modelica	13
2.1.2 Conectores y clases de conectores.	14
2.1.3 Componentes eléctricos simples	14
2.1.4 Simulación de los componentes eléctricos simples implementando un circuito RLC en Openmodelica .	18
2.2 Método de Elemento Finito	21
2.2.1 Componentes del MEF	21
2.2.2 Sistemas discretos y el ensamblaje de sus ecuaciones	22
2.2.3 Formulación integral	23
2.2.4 Subdivisión del dominio	24
2.2.5 Funciones de aproximación en subdominios	26
2.3 El programa FLD	28
3 MODELADO Y SIMULACIÓN DEL TRASFOMADOR	31
3.1 Introducción	31
3.2 Modelado en el lenguaje Modelica	31
3.2.1 Transformador monofásico (dos devanados)	31
3.2.2 Transformador monofásico (tres devanados)	34
3.3 Modelado y simulación del transformador utilizando FEM	37

3.3.1	El transformador monofásico	37
3.3.2	Transformador de la sección 6.3.5 de la referencia [1]	39
3.3.3	Creación de figura	41
3.3.4	Establecimiento de regiones	42
3.3.5	Creación de malla	43
3.3.6	Establecimiento de fuentes y condiciones de frontera	44
3.3.7	Solución y resultados.	44
3.4	Conexión entre el modelo físico y el modelo eléctrico	46
3.4.1	Resultados del acoplamiento del transformador monofásico	48
3.5	Comparación de modelos eléctricos del transformador monofásico	49
3.5.1	Modelo eléctrico tipo T del transformador monofásico	52
3.5.2	Modelo eléctrico tipo Γ' del transformador monofásico	52
3.5.3	Modelo eléctrico tipo Γ'' del transformador monofásico	52
3.5.4	Comparación de resultados	54
4	MODELADO Y SIMULACIÓN DEL MOTOR DE CD	59
4.1	Introducción	59
4.2	Modelado en el lenguaje Modelica	59
4.2.1	Motor de CD con imán permanente.	59
4.2.2	Máquina de DC con conexión en derivación	64
4.3	Modelado y simulación del motor de CD utilizando FEM	68
4.3.1	Descripción del modelado del motor de CD , datos geométricos y eléctricos.	68
4.3.2	Creación de figura	69
4.3.3	Establecimiento de regiones	71
4.3.4	Creación de malla	73
4.3.5	Establecimiento de fuentes y condiciones de frontera	73
4.3.6	Solución y resultados.	74
4.4	Conexión entre el modelo físico y el modelo eléctrico	77
4.4.1	Resultados del acoplamiento del motor de CD	77
4.5	Control de fuente Boost para una maquina de CD	78
4.5.1	Diseño del convertidor boost	79
4.5.2	Diseño del control PI	80
4.5.3	Unión de los 3 modelos: máquina de CD con imán permanente, fuente boost y control PI	81
5	MODELADO Y SIMULACIÓN DEL MOTOR DE INDUCCIÓN	83
5.1	Introducción	83
5.2	Modelado en lenguaje Modelica	83
5.2.1	Ecuaciones de voltaje del motor de inducción en el marco de referencia DQ0	83
5.3	Cambio de referencia ABC a DQ0 y DQ0 a ABC	87

5.4	Simulación y resultados	90
5.5	Modelado y simulación de la máquina de inducción, utilizando FEM .	94
5.5.1	Descripción del modelado del motor de inducción, datos geométricos y eléctricos.	94
5.5.2	Definición del dominio de cálculo de campo electromagnético	99
5.5.3	Malla del modelo del motor de inducción	101
5.5.4	Prueba sin carga	102
5.5.5	Prueba rotor bloqueado	105
5.5.6	Comparación de parámetros del circuito eléctrico equivalente del motor de inducción	112
5.6	Conexión entre el modelo físico y el modelo eléctrico	113
5.6.1	Resultados del acoplamiento del motor de inducción trifásico	113
6	CONCLUSIONES, TRABAJOS FUTUROS, Y APORTACIONES.	121
6.1	Conclusiones	121
6.2	Trabajos futuros	121
6.3	Principales aportaciones del trabajo de tesis	122
	REFERENCIAS	124