

INDICE GENERAL

	Pág.
1 INTRODUCCIÓN	2
1.1 ANTECEDENTES Y MOTIVACIÓN	2
1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	2
1.3 SOLUCIÓN PROPUESTA	2
1.4 OBJETIVOS	2
1.4.1 Objetivo general	2
1.4.2 Objetivo específicos	3
1.5 ALCANCES	3
1.6 METODOLOGIAS Y HERRAMIENTAS UTILIZADAS	3
1.7 RESULTADOS ESPERADOS.....	4
1.8 ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO	4
2 MARCO TEÓRICO	6
2.1 ESTADO DEL ARTE DEL CALENTAMIENTO POR INDUCCIÓN	6
2.2 INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA.....	7
2.2.1 Calentamiento por inducción y corrientes de Foucault	8
2.2.1.1 Profundidad de penetración	10
2.3 FENÓMENOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR	12
2.3.1 Conducción.....	12
2.3.2 Convección.....	13
2.3.3 Radiación.....	14
2.4 MODELACIÓN POR DIFERENCIAS FINITAS	15
2.4.1 Ecuación del calor	16
2.4.2 Condiciones de borde.....	16
2.4.3 Discretización de la ecuación del calor	17
2.5 MODELACIÓN POR ELEMENTOS FINITOS	20
2.5.1 Pauta operativa de ANSYS	20
3 MODELACION MEDIANTE DIFERENCIAS FINITAS	24
3.1 DESCRIPCIÓN FÍSICA DEL PROBLEMA.....	24
3.2 GENERACIÓN DE CORRIENTES DE FOUCAULT	25
3.2.1 Metodología analítica de cálculo para la generación de calor	25
3.2.2 Metodología mediante Software ANSOFT MAXWELL	26
3.2.3 Comparación de metodologías	28
3.3 ANÁLISIS DE TRANSFERENCIA DE CALOR	28

3.4	DIFERENCIAS FINITAS.....	29
3.4.1	Modelación de nodos intermedios ($i=1,2...M-1$)	30
3.4.2	Condiciones de borde.....	31
3.4.2.1	Nodo en la superficie ($i=M$)	31
3.4.2.2	Calculo de Coeficiente Pelicular Convectivo Medio	31
3.4.3	Algoritmo de solución	33
3.5	RESULTADOS MEDIANTE DIFERENCIAS FINITAS.....	36
3.5.1	Análisis de Convergencia.....	36
3.5.2	Resultados numéricos	37
3.6	DISCUSIONES DEL CAPÍTULO.....	37
4	MODELACIÓN MEDIANTE SOFTWARE DE ELEMENTOS FINITOS.....	42
4.1	MODELACIÓN DEL PROBLEMA ELÉCTRICO	42
4.1.1	Modelación problema eléctrico.....	42
4.1.2	Resultados del problema eléctrico	45
4.2	MODELACIÓN DEL PROBLEMA TÉRMICO	46
4.2.1	Resultados del análisis estado estacionario	47
4.2.2	Resultados análisis transiente.....	48
4.3	DISCUSIONES DEL CAPITULO.....	49
5	MODELACION EXPERIMENTAL	52
5.1	INTRODUCCIÓN AL MODELADO EXPERIMENTAL	52
5.2	DESCRIPCIÓN DE LAS INSTALACIONES.....	52
5.2.1	Pauta operativa para montaje del experimento	53
5.2.2	Pauta operativa para la medición las temperaturas.....	55
5.2.3	Análisis de datos Obtenidos.....	56
5.3	Discusiones	57
6	ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS	59
6.1	COMPARACION CON PUBLICACIONES CIENTIFICAS	59
6.2	COMPARACIÓN CON SOFTWARE COMERCIAL	62
6.2.1	Análisis estado estacionario.....	62
6.2.2	Análisis transiente	63
6.1	COMPRACION ALGORITMO PROPUESTO	64
6.2	DISCUSIONES.....	65
7	CONCLUSIÓN.....	67
7.1	DESAFIOS A FUTURO.....	68

Anexo I: Código de Diferencias Finitas

Anexo II: Calculo de la potencia volumétrica

Anexo III: Pauta operativa MAXWELL V15

Anexo IV: Imágenes de la experiencia práctica

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
FIGURA 2.1: Primeros hornos por inducción.....	6
FIGURA 2.2: Eficiencia de la conversión de las fuentes de energía para el calentamiento por inducción (FUENTE: R.W Sundeen, Proceedings, 39th Electric Furnance Conference, Houston, TX, AIME, New York, 1982, p. 8).....	7
FIGURA 2.3: Cambio en el costo de las fuentes de energía desde 1948 (FUENTE: R.W Sundeen, Proceedings, 39th Electric Furnance Conference, Houston, TX, AIME, New York, 1982, p. 8).....	7
FIGURA 2.4: Esquematización de la inducción electromagnética (FUENTE: http://tap.iop.org).....	8
FIGURA 2.5: Principio de calentamiento por inducción (FUENTE: http://www.dw-inductionheating.com/).....	9
FIGURA 2.6: Distribución de corrientes en un conductor frente a la corriente alterna (FUENTE: NDT Resource center).....	11
FIGURA 2.7: Perfil de temperaturas y velocidades durante la convección de una placa. (Fuente: F.Kreith, 2009).....	13
FIGURA 2.8: Comportamiento de las pérdidas por convección y radiación en función de la temperatura (Fuente: Simulation of induction heating in manufacturing, Martin Fisk, 2008).....	15
FIGURA 3.1 : Esquema del modelo físico	24
FIGURA 3.2 : Generación del campo magnético al pasar la corriente por las N, espiras en 3D (Fuente: Elaboración propia).....	26
FIGURA 3.3 : Fuerza Electromotriz generada en la periferia por el campo Magnético en 2D (Fuente: Elaboración propia).....	27
FIGURA 3.4 : Generación de calor por las corrientes parasitas en 2D (Fuente: Elaboración propia).....	27
FIGURA 3.5: Forma Axisimetrica en un cilindro. (Fuente: Elaboración propia)	29
FIGURA 3.6 : Malla de puntos que simula el modelo físico.....	29
FIGURA 3.7 : Tamaño y forma del elemento.....	29
FIGURA 3.8: Variación del número de Prandlt en función de la temperatura para el Aire.....	33
FIGURA 3.9 : Grafico de viscosidad dinámica del aire y agua en función de la temperatura.....	33
FIGURA 3.10: Densidad de corriente y potencia en función de la profundidad de penetración en la probeta	34
FIGURA 3.11: Gráfico de nodos de posición v/s temperatura superficial.....	36
FIGURA 3.12 : Grafico de función temperatura en nodo central y de la superficie.....	37
FIGURA 3.13 : Tamaño de matrices que caben en 2GB de memoria RAM.	38
FIGURA 3.14 : Zona de generación de calor.....	39
FIGURA 4.1: Algoritmo de solución ANSOFT MAXWELL.....	44
FIGURA 4.2: Requerimientos mínimos recomendados para el uso del SOFTWARE.....	45
FIGURA 4.3: Generación de calor mediante Maxwell	45
FIGURA 4.4: Análisis estático de la probeta de acero.....	47

FIGURA 4.5: Flujo de calor Direccional	48
FIGURA 4.6 : Análisis transiente mediante ANSYS THERMAL, en un tiempo de 400 segundos ...	49
FIGURA 4.7 : Comparación de la ventaja de tener un disco SSD vs Disco duro tradicional (Fuente: <i>Boosting Memory Capacity with SSD</i>)	49
FIGURA 5.1 : Foto del LCEEP de la UTALCA (Fuente: www.utralca.cl).....	52
FIGURA 5.2: Convertidor fuente-voltaje desarrollado por E. Arriagada	53
FIGURA 5.3 : Esquema del circuito inductivo	53
FIGURA 5.4: Esquema de la bobina de inducción.....	54
FIGURA 5.5: Caracterización de los IGBT.....	56
FIGURA 6.1: Fases del modelado y simulación (Fuente: Verification and Validation in Computational Fluid Dynamics)	59
FIGURA 6.2: Comparación de resultados con Duta et al (2008).....	60
FIGURA 6.3: Comparación con resultados Choi et al (1999).....	61
FIGURA 6.4: Gráfico de comparación de los tres modelos propuestos en 400 segundos	63
FIGURA 6.5 : Comparación con resultados experimentales	64

SIMBOLOS

∇ = Operador Nabla	α = difusividad térmica
E = Campo eléctrico	h = coeficiente pelicular convectivo
B = Campo Magnético	e = emisividad
t = tiempo	σ = constante Stefan Boltzmann
∂ = derivada parcial	f' = primera derivada
A = Área	f'' = segunda derivada
σ = permeabilidad eléctrica	
J = densidad de corriente	
Q = Calor generado	
I = Intensidad de corriente	
δ = profundidad de penetración	
f = frecuencia	
μ_0 = permeabilidad magnética en el vacío	
μ = permeabilidad magnética del material	
T = Temperatura	
k = conductividad térmica	