
CONTENIDO

PROLOGO	ix
1. INTRODUCCION	1
1.1. Generalidades	1
1.2. Nociones básicas	2
1.3. Aplicaciones	4
1.4. Ventajas y limitaciones	5
2. PRINCIPIOS BASICOS	7
2.1. Generalidades	7
2.2. Campo eléctrico constante sobre una carga homogénea	10
2.3. Calentamiento de una carga heterogénea	15
A. Montaje en serie	15
B. Montaje en paralelo	17
C. Material de espesor variable	18
2.4. Factor de potencia, rendimiento y consumo energético en alta frecuencia	19
2.5. Calentamiento dieléctrico en microondas	20
2.6. Frecuencia de calentamiento	24
2.7. Constantes dieléctricas de los materiales	26
3. EQUIPOS ELECTRICOS Y MECANICOS EN ALTA FRECUENCIA	27
3.1. Introducción	27
3.2. Generador de alta frecuencia	28

3.3.	Circuitos oscilantes	30
3.4.	Adaptador del generador al aplicador y carga	32
3.5.	Aplicador a la carga	33
3.5.1.	Aplicador de electrodos planos	33
3.5.2.	Aplicador de electrodos al tresbolillo o en guirnalda	34
3.5.3.	Aplicador de electrodos en línea	35
3.6.	Equipos mecánicos	36
4.	EQUIPOS ELECTRICOS Y MECANICOS EN MICROONDAS	41
4.1.	Introducción	41
4.2.	Generador de microondas	42
4.3.	Guía de ondas	45
4.4.	Aplicador a la carga	46
4.4.1.	Cavidad resonante rectangular	47
4.4.2.	Aplicador tipo túnel	48
4.4.3.	Aplicador de guías ranuradas y radiantes	49
4.4.4.	Otros tipos de aplicador	50
4.5.	Equipos mecánicos	50
5.	APLICACIONES INDUSTRIALES DEL CALENTAMIENTO DIELECTRICO POR ALTA FRECUENCIA	53
5.1.	Generalidades	53
5.2.	Transformación de materiales plásticos	56
5.3.	Aplicaciones en la industria maderera	61
5.4.	Aplicaciones en la industria textil	64
5.5.	Aplicaciones en la industria papelera	68
5.6.	Aplicaciones en la industria alimentaria	70
5.7.	Aplicaciones varias	71
6.	APLICACIONES INDUSTRIALES DEL CALENTAMIENTO POR MICROONDAS	75
6.1.	Introducción	75
6.2.	Aplicaciones en la industria alimentaria	76
A.	La descongelación de alimentos	76
B.	Secado de pastas alimenticias	76
C.	Deshidratación al vacío	77
6.3.	Calentamiento para el vulcanizado del caucho	77
6.4.	Soldadura de plásticos	80
6.5.	Aplicaciones en la industria textil	80
6.6.	Aplicaciones varias	80

7. EJEMPLOS DE CALCULO EN CALENTAMIENTO DIELECTRICO	83
7.1. Introducción	83
7.2. Soldadura de plásticos	83
7.3. Secado de madera y separación del electrodo superior	86
7.4. Rendimiento del encolado de placas de madera	92
7.4.1. Montaje en paralelo	92
7.4.2. Montaje en serie	94
7.5. Características del equipo eléctrico de alta frecuencia para la preparación de paneles de madera	95
7.6. Propagación de una onda electromagnética en la carga de un equipo de microondas	99
7.7. Secado en continuo por alta frecuencia de manta de lana mineral	100
8. CONSIDERACIONES FINALES Y CONCLUSIONES	107
8.1. Introducción	107
8.2. Ventajas del calentamiento dieléctrico	107
8.3. Limitaciones del calentamiento dieléctrico	108
8.4. Comparación entre calentamiento por alta frecuencia y por microondas	109
8.5. Conclusiones	109
APENDICE 1. Constante dieléctrica y factor de pérdidas de algunos materiales	111
APENDICE 2. Comparación del calentamiento de un cuerpo plano por:	
— Conducción térmica entre 2 placas calientes	
— Dielectricidad en alta frecuencia	
— Combinación de ambas	113
A2.1. Calentamiento por conducción térmica	113
A2.2. Calentamiento dieléctrico por alta frecuencia	117
A2.3. Calentamiento combinado por conducción y dielectricidad ..	122
APENDICE 3. Referencias bibliográficas	125
APENDICE 4. Algunos fabricantes europeos de equipos de calentamiento por alta frecuencia y microondas	127
APENDICE 5. Vocabulario y acrónimos	129
INDICE ALFABETICO	137

CONTENIDO

PROLOGO	ix
AGRADECIMIENTOS	xi
1. INTRODUCCION	1
1.1. Generalidades	1
1.2. Descripción general de los hornos de arco	2
1.2.1. Hornos de arco radiante	2
1.2.2. Hornos de arco sumergido	4
1.2.3. Hornos de arco para fusión de acero	5
1.3. Desarrollo histórico. Situación actual	8
2. PRINCIPIOS BASICOS DEL HORNO DE ARCO	11
2.1. Introducción	11
2.2. Análisis del arco eléctrico	12
2.2.1. Arco entre dos electrodos idénticos	12
2.2.2. El arco en hornos de corriente continua (C.C.)	14
2.2.3. El arco en hornos de corriente alterna (C.A.)	15
2.3. Estudio del circuito eléctrico básico de un horno de arco de C.A.	18
2.3.1. Circuito simple R, X_L	19
2.3.2. Circuito simple con corrección X_c	20
2.3.3. Circuito simple con transformador	23
2.3.4. Circuito básico del horno de arco	25
A) Intensidad	28
B) Potencia en el arco	29

C)	Potencia consumida	30
D)	Rendimiento eléctrico	31
E)	Factor de potencia	32
2.3.5.	Expresiones para hornos de arco trifásicos	33
2.3.6.	Consideraciones sobre la reactancia del arco	34
2.4.	Diagramas de funcionamiento en C.A.	36
2.5.	Circuito eléctrico básico y características de los hornos de C.C.	39
2.5.1.	Introducción	39
2.5.2.	Circuito básico del horno de C.C.	40
2.5.3.	Agitación del baño	44
3.	EQUIPOS ELECTRICOS EN CORRIENTE ALTERNA	47
3.1.	Introducción. Componentes del equipo eléctrico	47
3.2.	Transformador principal	49
3.3.	Embarrado y cables secundarios	51
3.4.	Equipo de control	55
3.4.1.	Generalidades	55
3.4.2.	Sistemas de control de impedancia	56
3.4.3.	Sistemas de control por ordenador	58
A)	Equipos	59
B)	Lógica del sistema	59
3.5.	Efectos eléctricos sobre la línea de suministro	62
3.5.1.	Generalidades	62
3.5.2.	Armónicos de la frecuencia fundamental	62
3.5.3.	Flicker	64
3.5.4.	Protección de puntas de tensión	66
4.	EQUIPOS MECANICOS EN CORRIENTE ALTERNA	67
4.1.	Componentes del equipo mecánico	67
4.1.1.	Conjunto de la parte mecánica	67
4.1.2.	Cuba y bóveda	70
4.1.3.	Plataforma y superestructura	74
4.1.4.	Brazos portaelectrodos y columnas	77
4.1.5.	Mecanismos de accionamiento	80
4.1.6.	Los electrodos	80
4.2.	Componentes mecánicos adicionales	85
4.2.1.	Generalidades	85
4.2.2.	Quemadores y lanzas de oxígeno	86
4.2.3.	Aspiración y depuración de humos	88
4.2.4.	Precalentadores de chatarra	90
4.2.5.	Cestas de carga y cucharas de colada	91

4.3. Refractarios para hornos de arco	91
4.3.1. Introducción	91
4.3.2. Refractarios para la cuba	93
4.3.3. Refractarios para la cuchara y horno-cuchara de afino	96
5. HORNOS DE ARCO DE CORRIENTE CONTINUA	99
5.1. Introducción	99
5.2. Equipo eléctrico	101
5.2.1. Generalidades	101
5.2.2. Interruptor general	102
5.2.3. Transformador principal	102
5.2.4. Equipo rectificador	103
5.2.5. Bobina de autoinducción de C.C.	104
5.2.6. Equipo de control y regulación	105
5.3. Equipo mecánico	106
5.3.1. Generalidades: Capacidad de la cuba y potencia ...	106
5.3.2. Solera conductora	108
5.4. Comparación entre hornos de C.A. y C.C.	112
5.4.1. Consumo de electrodos	113
5.4.2. Consumo de energía eléctrica	115
5.4.3. Consumo de refractario	115
6. FUNCIONAMIENTO DE LOS HORNOS DE ARCO. BALAN- CES ENERGETICOS. COSTES OPERATIVOS	117
6.1. Funcionamiento de los hornos de arco	117
6.1.1. Generalidades	117
6.1.2. Diagramas de funcionamiento	120
6.2. Balances energéticos	124
6.2.1. Introducción	124
6.2.2. Quemadores auxiliares	128
6.2.3. Lanzas de inyección de O ₂	129
A) Oxidación de la chatarra	130
B) Oxidación del carbón introducido	131
C) Oxidación de los electrodos	132
D) Oxidación del Si, Mn y C del acero	132
E) Calor de reacción entre los óxidos y la cal ...	133
6.2.4. Fusión y recalentamiento del acero	135
6.2.5. Fusión y recalentamiento de la escoria	135
6.2.6. Calor perdido por los humos	136
6.2.7. Pérdidas por el agua de refrigeración	138
6.2.8. Pérdidas térmicas y eléctricas	140

A) Pérdidas por el refractorio de bóveda	140
B) Pérdidas por el refractorio de bóveda	142
C) Pérdidas por apertura de bóveda y puerta	142
D) Pérdidas eléctricas	143
6.2.9. Balance energético en régimen continuo	144
6.2.10. Consumo adicional por régimen discontinuo	146
6.2.11. Consideraciones finales	148
6.3. Costes operativos	150

7. HORNOS DE ARCO ESPECIALES 155

7.1. Generalidades	155
7.2. Hornos de arco de C.A. no convencionales	155
7.2.1. Proceso CONSTEEL	156
7.2.2. Horno FUJISAWA	157
7.2.3. Horno SHEERNES	159
7.2.4. Proceso K-ES	160
7.3. Horno de arco de C.C. de dos cubas gemelas	161
7.4. Horno-cuchara de afino	163
7.5. Horno de arco al vacío	166

8. CONCLUSIONES 169

APENDICES

1. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS 171

2. VOCABULARIO Y ACRONIMOS 179

INDICE 191

26-11-03

CONTENIDO

PROLOGO	ix
1. INTRODUCCION	1
1.1. Apunte histórico	1
1.2. Nociones básicas	3
1.2.1. Equipos con núcleo magnético	3
1.2.2. Equipos sin núcleo magnético	4
1.3. Campos de aplicación	6
1.4. Ventajas y limitaciones	6
2. FUNDAMENTOS. CARACTERISTICAS GENERALES ...	9
2.1. Principios físicos	9
2.1.1. Profundidad de penetración	11
2.1.2. Potencia transmitida a la carga	11
2.1.3. Rendimiento del calentamiento por inducción ..	16
2.1.4. Factor de potencia	20
2.2. Transmisión del calor	21
2.2.1. Transmisión de calor en la carga	21
2.2.2. Pérdidas de calor por radiación	25
2.2.3. Pérdidas de calor por convección	26
2.2.4. Pérdidas de calor por conducción	27
2.2.5. Pérdidas por el agua de refrigeración	28
2.3. Propiedades características de la carga	30
2.3.1. Resistividad eléctrica	31

compra

60600

2.3.2.	Permeabilidad magnética	33
2.3.3.	Calor específico y entalpía	34
2.3.4.	Conductividad térmica	36
2.3.5.	Emisividad	37
3.	EQUIPOS ELECTRICOS	39
3.1.	Clasificación. Componentes	39
3.2.	Equipos a la frecuencia de la red	40
3.3.	Equipos de media frecuencia	45
3.3.1.	Grupos motor-alternador	46
3.3.2.	Multiplicadores estáticos de frecuencia	47
3.3.3.	Convertidores de media frecuencia de tiristores ..	48
3.4.	Equipos de alta frecuencia	53
3.4.1.	Generadores de válvulas electrónicas	53
3.4.2.	Generadores aperiódicos	54
3.4.3.	Generadores de tiristores	54
3.4.4.	Generadores de transistores de potencia	55
3.5.	Otros elementos eléctricos	57
3.5.1.	Transformadores de acoplamiento	58
3.5.2.	Condensadores	59
3.5.3.	Embarrados y cables flexibles	60
3.5.4.	Conmutadores	61
4.	HORNOS DE FUSION Y MANTENIMIENTO	63
4.1.	Introducción. Clasificación	63
4.2.	Hornos de canal	64
4.2.1.	Cuerpo del horno	66
4.2.2.	Inductor	68
4.2.3.	Aplicaciones de los hornos de canal	71
4.3.	Hornos de inducción de crisol	73
4.3.1.	Capacidad y frecuencia	74
4.3.2.	Agitación electromagnética	76
4.3.3.	Capacidad. Potencia. Frecuencia	77
4.3.4.	Bobina inductora	79
4.3.5.	Revestimiento refractario	80
4.3.6.	Disposición general	81
4.3.7.	Funcionamiento. Balance energético	82
4.3.8.	Aplicaciones de los hornos de crisol	85
4.4.	Equipos de refrigeración por agua	89
4.5.	Equipos de preparación de cargas	91

5.	CALENTAMIENTO PARA DEFORMACION PLASTICA.	95
5.1.	Introducción	95
5.2.	Tipos de calentadores	96
5.2.1.	Calentadores semicontinuos de tacos	97
5.2.2.	Calentadores de empuje continuo	98
5.2.3.	Calentadores continuos de barras y tubos	101
5.2.4.	Equipos continuos de calentamiento parcial	102
5.2.5.	Calentadores intermitentes de varios inductores ..	103
5.2.6.	Bobinas inductoras	107
5.3.	Frecuencia de la corriente eléctrica	110
5.4.	Tiempo de calentamiento	113
5.5.	Rendimiento. Producción específica. Consumo energético	115
5.6.	Ventajas y limitaciones. Comparación con hornos de llamas	118
6.	TRATAMIENTOS TERMICOS POR INDUCCION	121
6.1.	Introducción	121
6.2.	Temple superficial	122
6.2.1.	Frecuencia. Potencia específica. Tiempo de calentamiento	122
6.2.2.	Inductores de temple	130
6.2.3.	Equipos de manipulación de piezas	132
6.3.	Tratamientos térmicos en toda la masa	136
6.4.	Tratamientos superficiales	137
7.	OTRAS APLICACIONES DEL CALENTAMIENTO POR INDUCCION	139
7.1.	Introducción	139
7.2.	Soldadura de metales	140
7.3.	Cubas de galvanizado	142
7.4.	Fabricación de semiconductores	146
7.5.	Calentamiento de cuerpos no conductores	148
8.	EJEMPLOS DE CALCULO Y APLICACION	151
8.1.	Introducción	151
8.2.	Elección de una instalación de fusión	152
8.3.	Características de un horno de crisol	156
8.4.	Funcionamiento real de una instalación de fusión	159
8.4.1.	Características principales	159

8.4.2.	Datos de funcionamiento	160
8.4.3.	Mediciones realizadas	161
8.4.4.	Consumo de energía eléctrica	162
8.5.	Calentador de inducción para tacos de acero	167
8.5.1.	Frecuencia del equipo eléctrico	167
8.5.2.	Tiempo de calentamiento y longitud de la bobina	168
8.5.3.	Potencia útil y pérdidas térmicas	169
8.5.4.	Potencia requerida en la carga. Rendimiento eléctrico	172
8.5.5.	Características eléctricas del inductor	173
8.6.	Calentamiento para temple de barras de acero	175
8.7.	Cuba de galvanizado calentada por inducción	176
8.7.1.	Rendimiento eléctrico y factor de potencia	176
8.7.2.	Potencia y número de espiras. Balance energético	178
9.	CONCLUSIONES	181

APENDICES

1.	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	185
2.	FABRICANTES DE HORNOS DE INDUCCION	187
3.	VOCABULARIO Y ACRONIMOS	191
	INDICE	206

CONTENIDO

PROLOGO	xi
1. INTRODUCCION A LOS HORNOS DE RESISTENCIAS ...	1
1.1. Definición de hornos industriales y hornos de resistencias.	1
1.2. Campos de aplicación	3
1.3. Procedimientos	6
1.4. Clasificación de los hornos de resistencias	7
1.5. Factores para una elección correcta	8
2. RESISTENCIAS DE CALENTAMIENTO	11
2.1. Generalidades. Clasificación	11
2.2. Resistencias metálicas. Materiales	15
2.2.1. Aleaciones de base Ni-Cr	15
2.2.2. Aleaciones Fe-Cr-Al	19
2.2.3. Otros materiales metálicos	20
2.3. Disposición de resistencias metálicas. Terminales. Conexiones.	22
2.3.1. Disposición de resistencias de alambre	23
2.3.2. Disposición de resistencias de pletina	28
2.3.3. Resistencias tubulares	30
2.3.4. Terminales y conexiones	31
2.4. Cálculo de resistencias metálicas	34
2.4.1. Ejemplo de resistencia de alambre arrollado	38
2.4.2. Ejemplo de resistencia de pletina ondulada	41
2.4.3. Cálculo de resistencias de horno de carro	43
2.5. Resistencias no metálicas. Materiales	45

2.5.1.	Resistencias de carburo de silicio	45
2.5.2.	Resistencias de bisilicuro de molibdeno	51
2.5.3.	Resistencias de grafito	58
2.5.4.	Resistencias de cromita de lantano	58
2.6.	Tubos radiantes eléctricos	59
2.7.	Resistencias blindadas	61
3.	RECINTO DEL HORNO. PERDIDAS DE CALOR	67
3.1.	Introducción	67
3.2.	Materiales refractarios y aislantes	67
3.2.1.	Generalidades. Clasificación	67
3.2.2.	Productos refractarios densos	68
3.2.3.	Productos refractarios aislantes	73
3.2.4.	Productos aislantes no refractarios (hasta 1.000 °C)	74
3.2.5.	Productos calorífugos (hasta 100-150 °C)	76
3.2.6.	Fibras cerámicas de alta temperatura	77
3.2.7.	Resumen	78
3.3.	Pérdidas de calor	79
3.3.1.	Pérdidas de calor por las paredes	79
3.3.2.	Pérdidas por calor almacenado en el revestimiento	86
3.3.3.	Pérdidas por puentes térmicos	90
3.3.4.	Pérdidas de calor por aberturas	92
3.3.5.	Pérdidas de calor por el agua de refrigeración	92
3.3.6.	Pérdidas de calor por infiltración de aire	97
4.	INTERCAMBIO TERMICO DE LAS RESISTENCIAS CON LA CARGA EN EL CALENTAMIENTO Y EN EL ENFRIAMIENTO	101
4.1.	Introducción	101
4.1.1.	Radiación	101
4.1.2.	Convección	105
4.1.3.	Radiación y convección combinadas	108
4.1.4.	Conducción	110
4.2.	Calentamiento por radiación	112
4.2.1.	Corrección por la disposición de las resistencias ...	114
4.2.2.	Factor de corrección de la carga específica	115
4.3.	Calentamiento por radiación y convección	120
4.3.1.	Disposiciones de la ventilación forzada	121
4.3.2.	Ventiladores de recirculación y punto de funcionamiento	123
4.3.3.	Calentamiento por convección y pérdidas de calor del horno	125

4.4. Cálculo del tiempo de calentamiento	126
4.4.1. Generalidades y fórmulas	126
4.4.2. Método de incrementos finitos	129
4.4.3. Método aproximado	130
4.4.4. Consideraciones finales	134
4.5. Enfriamiento de la carga en el horno	137
4.5.1. Generalidades	137
4.5.2. Enfriamiento en horno continuo	137
4.5.3. Enfriamiento en horno discontinuo	139
5. DESCRIPCIÓN DE LOS HORNOS DE RESISTENCIAS	143
5.1. Introducción	143
5.2. Hornos de fusión	144
5.2.1. Generalidades	144
5.2.2. Hornos de crisol	144
5.2.3. Hornos de reverbero	146
5.3. Hornos de recalentamiento	147
5.3.1. Generalidades	147
5.3.2. Hornos de fosa	148
5.3.3. Hornos de empujadora	149
5.3.4. Hornos de vigas galopantes	151
5.3.5. Hornos de mufla y de carro	152
5.4. Hornos de tratamientos térmicos	153
5.4.1. Clasificación	153
5.4.2. Hornos intermitentes para usos generales	154
5.4.3. Hornos continuos para usos generales	162
5.4.4. Hornos para usos especiales	172
5.4.5. Hornos de vacío	179
5.5. Atmósferas controladas en hornos industriales	181
5.5.1. Introducción	181
5.5.2. Generadores de atmósferas	184
5.5.3. Aplicaciones de las atmósferas controladas	188
5.6. Tanques de temple	188
5.6.1. Introducción	188
5.6.2. Horno discontinuo	189
5.6.3. Horno continuo	193
5.6.4. Balance térmico	193
6. EQUIPOS DE REGULACIÓN Y CONTROL	197
6.1. Generalidades	197
6.2. Regulación de la temperatura	198
6.2.1. Termopares	199

6.2.2.	Lunetas de radiación	199
6.2.3.	Termómetros de resistencia	201
6.2.4.	Aparatos de regulación	201
6.2.5.	Organos de regulación	201
6.3.	Características de regulación de un horno	201
6.3.1.	Características estáticas	202
6.3.2.	Características dinámicas	202
6.4.	Métodos de regulación de temperatura	206
6.4.1.	Regulación en dos o tres niveles	207
6.4.2.	Regulación proporcional	209
6.4.3.	Regulación proporcional e integral	210
6.4.4.	Regulación proporcional, integral y derivada	211
6.4.5.	Regulación de consigna elevada	212
6.4.6.	Regulación autoajutable	214
6.5.	Regulación de potencia	214
6.5.1.	Regulación por contactores	215
6.5.2.	Regulación por tiristores	216
6.5.3.	Regulación en varias zonas	218
6.5.4.	Regulación a programa	219
7.	BALANCES ENERGETICOS Y DE EXPLOTACION	223
7.1.	Balance energético	223
7.1.1.	Generalidades	223
7.1.2.	Componentes básicos del balance energético	224
7.1.3.	Balance energético en funcionamiento estable	229
7.1.4.	Balance energético en funcionamiento real	232
7.2.	Balance de explotación	234
7.3.	Comparación entre calentamiento por gas y electricidad en hornos industriales	239
8.	CONCLUSIONES	243
APENDICES		
A1.	CARACTERISTICAS PRINCIPALES DE LOS MATERIALES REFRACTARIOS Y AISLANTES	247
A2.	CALCULO DE LOS TIEMPOS DE CALENTAMIENTO Y ENFRIAMIENTO POR LOS GRAFICOS DE HEISLER ..	253
A3.	CALCULO DEL TIEMPO DE CALENTAMIENTO POR INCREMENTOS FINITOS	259

A4.	ATMOSFERAS CONTROLADAS. REACCIONES ENTRE GASES Y METALES	261
A5.	EJEMPLOS DE HORNOS DE FUSION Y MANTENIMIENTO	267
	A5.1. Hornos de crisol	267
	A5.2. Hornos de reverbero	269
A6.	EJEMPLO DE HORNO DE RECALENTAMIENTO	271
A7.	EJEMPLOS DE HORNOS DE TRATAMIENTO TERMICO.	275
	A7.1. Línea de recocido isotérmico de piezas estampadas	275
	A7.2. Horno continuo de esmaltar	277
	A7.3. Horno continuo de carbonitruración	280
	A7.4. Horno continuo de recocido de botellas de vidrio	283
	A7.5. Hornos de campana para recocido de rollos de alambre.	286
	A7.6. Horno intermitente para tratamiento térmico de piezas de acero al manganeso	287
A8.	VOCABULARIO ESPECIALIZADO	291
A9.	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	305
A10.	RELACION DE ALGUNOS FABRICANTES DE HORNOS DE RESISTENCIAS	307
	INDICE	311