

ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABLAS.....	XVI
RESUMEN.....	i
ABSTRACT.....	ix
RESUM.....	xvi
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. SECADO CONVECTIVO.....	1
1.1.1. Generalidades.....	2
1.1.1.1. <i>Etapas de secado</i>	3
1.1.1.2. <i>Mecanismos de transferencia de materia</i>	4
1.1.2. Isotermas de sorción. Relación Humedad-Actividad de agua.....	5
1.1.2.1. <i>Concepto de actividad de agua</i>	5
1.1.2.2. <i>Isotermas de sorción</i>	7
1.1.2.3. <i>Modelización de las isotermas de sorción</i>	11
1.1.2.4. <i>Calor isostérico de sorción</i>	14
1.1.3. Modelización de las cinéticas de secado.....	16
1.1.3.1. <i>Modelo difusional</i>	18
1.1.3.2. <i>Modelo de Weibull</i>	20
1.1.4. Liofilización a presión atmosférica.....	21
1.1.4.1. <i>Descripción del proceso</i>	21
1.1.4.2. <i>Aplicaciones. Ventajas e inconvenientes</i>	21
1.1.5. Nuevas tecnologías aplicadas al secado convectivo.....	23
1.1.5.1. <i>Microondas</i>	23
1.1.5.2. <i>Radiofrecuencia</i>	25
1.1.5.3. <i>Radiación infrarroja</i>	25
1.1.5.4. <i>Ultrasonidos de potencia</i>	26
1.2. ULTRASONIDOS.....	27
1.2.1. Generalidades.....	27
1.2.1.1. <i>Propagación y tipos de onda</i>	28
1.2.1.2. <i>Parámetros ultrasónicos</i>	29
1.2.1.3. <i>Clasificación</i>	33

ÍNDICE

1.2.2. Ultrasonidos de señal.....	34
1.2.2.1. <i>Aplicaciones en Tecnología de Alimentos</i>	34
1.2.3. Ultrasonidos de potencia.....	36
1.2.3.1. <i>Sistemas de generación</i>	36
1.2.3.2. <i>Sistemas de aplicación</i>	40
1.2.3.3. <i>Principales efectos producidos por los ultrasonidos de potencia en el secado convectivo</i>	45
1.2.3.4. <i>Aplicaciones en procesos de transferencia de materia en medios líquidos</i>	48
1.2.3.5. <i>Secado asistido por ultrasonidos de potencia</i>	54
1.2.3.6. <i>Otras aplicaciones en Tecnología de Alimentos</i>	58
1.3. CONCLUSIONES	62
2. OBJETIVOS	66
3. MATERIALES Y MÉTODOS	68
3.1. MATERIAS PRIMAS	68
3.1.1. Zanahoria.....	68
3.1.2. Albaricoque.....	69
3.1.3. Corteza de Limón.....	72
3.1.4. Caqui.....	73
3.1.5. Determinación experimental del contenido de humedad.....	74
3.2. ISOTERMAS DE SORCIÓN	76
3.2.1. Isotermas obtenidas a partir de referencias bibliográficas.....	76
3.2.1.1. <i>Zanahoria</i>	76
3.2.1.2. <i>Albaricoque</i>	77
3.2.1.3. <i>Caqui</i>	77
3.2.2. Determinación experimental de las isotermas de sorción de la corteza de limón.....	78
3.2.2.1. <i>Preparación de la muestra</i>	78
3.2.2.2. <i>Secado de las muestras</i>	79
3.2.2.3. <i>Determinación experimental de la actividad de agua</i>	79
3.2.2.4. <i>Determinación experimental de la humedad</i>	80
3.2.2.5. <i>Modelización de la isoterma de sorción</i>	81

3.2.2.6. <i>Calor isostérico de sorción</i>	81
3.3. <i>DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE SECADO</i>	83
3.3.1. Secadero convectivo convencional.....	83
3.3.2. Sistema ultrasónico de potencia.....	86
3.3.2.1. <i>Diseño del sistema de aplicación ultrasónico</i>	86
3.3.2.2. <i>Componentes</i>	89
3.3.2.3. <i>Caracterización</i>	91
3.3.3. Adaptación del secadero para la instalación del sistema de aplicación de ultrasonidos de potencia.....	93
3.3.4. Sistemas portamuestras.....	95
3.3.4.1. Sistema portamuestras para experiencias en lecho fluidizado. Cubeta móvil.....	96
3.3.4.2. Sistema portamuestras para las experiencias en lecho fijo.....	97
3.4. <i>EXPERIENCIAS DE SECADO</i>	99
3.4.1. Experiencias en lecho fluidizado.....	99
3.4.2. Experiencias con diferentes velocidades del aire de secado.....	99
3.4.3. Experiencias con diferentes temperaturas del aire de secado.....	100
3.4.4. Experiencias con diferentes densidades de carga másica.....	101
3.4.5. Experiencias con aplicación de diferentes potencias ultrasónicas.....	101
3.4.6. Cinéticas de secado.....	102
3.5. <i>LIOFILIZACIÓN A PRESIÓN ATMOSFÉRICA DE BACALAO</i>	103
3.5.1. Materia prima.....	103
3.5.2. Secadero convectivo con bomba de calor.....	105
3.5.3. Experiencias de secado.....	107
3.5.4. Medidas experimentales.....	108
3.5.4.1. <i>Humedad</i>	108
3.5.4.2. <i>Actividad de agua</i>	108
3.5.4.3. <i>Color</i>	108
3.5.4.4. <i>Densidad aparente</i>	109
3.5.4.5. <i>Capacidad de rehidratación</i>	109
3.5.4.6. <i>Encogimiento</i>	109
3.6. <i>MODELIZACIÓN DE LAS CINÉTICAS DE SECADO</i>	111
3.6.1. Modelos difusionales.....	111
3.6.1.1. <i>Modelos que no consideran la resistencia externa (SRE)</i>	112

3.6.1.2. <i>Modelos que consideran la resistencia externa (RE)</i>	114
3.6.2. Modelo de Weibull.....	115
3.6.3. Efecto de la temperatura.....	116
3.6.4. Influencia de la velocidad del aire en el coeficiente de transferencia de materia.....	116
3.6.5. Influencia de la temperatura del aire en el coeficiente de transferencia de materia.....	117
3.6.6. Identificación paramétrica. Métodos de optimización.....	118
3.6.7. Determinación de la bondad de los ajustes.....	118
3.6.8. Análisis estadístico.....	119
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	120
4.1. <i>CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE APLICACIÓN DE ULTRASONIDOS DE POTENCIA</i>	120
4.1.1. Caracterización previa.....	120
4.1.2. Estudio del comportamiento del sistema de aplicación de ultrasonidos en condiciones de trabajo.....	122
4.2. <i>ISOTERMAS DE SORCIÓN DE CORTEZA DE LIMÓN</i>	126
4.2.1. Datos experimentales. Influencia de la temperatura.....	126
4.2.2. Modelización incluyendo el efecto de la temperatura.....	128
4.2.3. Calor isostérico de sorción.....	133
4.3. <i>SECADO EN LECHO FLUIDIZADO ASISTIDO POR ULTRASONIDOS DE POTENCIA</i>	136
4.3.1. Secado de zanahoria y albaricoque en lecho fluidizado.....	136
4.3.2. Modelos SRE. Secado en lecho fluidizado.....	139
4.3.3. Modelo de Weibull. Secado en lecho fluidizado.....	141
4.3.4. Estimación de la energía de activación. Secado en lecho fluidizado....	144
4.4. <i>INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD DEL AIRE EN EL SECADO ASISTIDO POR ULTRASONIDOS DE POTENCIA</i>	146
4.4.1. Influencia de la velocidad del aire en el campo acústico.....	146
4.4.2. Secado de diferentes productos, zanahoria, corteza de limón y caqui, a diferentes velocidades del aire	149
4.4.3. Modelos SRE. Influencia de la velocidad del aire.....	156
4.4.4. Modelo RE. Influencia de la velocidad del aire.....	169

4.4.5. Modelo de Weibull. Influencia de la velocidad del aire.....	174
4.5. INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA DEL AIRE EN EL SECADO ASISTIDO POR ULTRASONIDOS DE POTENCIA.....	179
4.5.1. Secado de zanahoria a diferentes temperaturas.....	179
4.5.2. Modelo SRE. Influencia de la temperatura.....	183
4.5.3. Modelo RE. Influencia de la temperatura.....	185
4.5.4. Modelo de Weibull. Influencia de la temperatura.....	189
4.5.5. Estimación de la energía de activación. Influencia de la aplicación de ultrasonidos de potencia.....	191
4.6. INFLUENCIA DE LA DENSIDAD DE CARGA MÁSCICA EN EL SECADO ASISTIDO POR ULTRASONIDOS DE POTENCIA.....	194
4.6.1. Secado de zanahoria a diferentes densidades de carga máscica	194
4.6.2. Modelo SRE. Influencia de la densidad de carga.....	197
4.6.3. Modelo RE. Influencia de la densidad de carga.....	199
4.6.4. Modelo de Weibull. Influencia de la densidad de carga.....	203
4.7. INFLUENCIA DEL NIVEL DE POTENCIA APLICADA EN EL SECADO ASISTIDO POR ULTRASONIDOS DE POTENCIA.....	206
4.7.1. Secado acústico de zanahoria y corteza de limón a diferentes potencias.....	206
4.7.2. Modelos SRE. Influencia de la potencia	209
4.7.3. Modelos RE. Influencia de la potencia.....	213
4.7.4. Modelo de Weibull. Influencia de la potencia.....	218
4.8. LIOFILIZACIÓN A PRESIÓN ATMOSFÉRICA DE BACALAO.....	221
4.8.1. Influencia de la temperatura de secado en la cinética del proceso.....	222
4.8.1.1. Cinéticas de secado de bacalao.....	222
4.8.1.2. Modelización del secado de bacalao.....	224
4.8.1.3. Estimación de la energía de activación. Secado de bacalao.....	226
4.8.2. Influencia de la temperatura de secado en los parámetros de calidad .	228
4.8.2.1. Color.....	228
4.8.2.2. Encogimiento.....	231
4.8.2.3. Densidad aparente.....	232
4.8.2.4. Capacidad de rehidratación.....	233

ÍNDICE

5. CONCLUSIONES.....	236
6. RECOMENDACIONES.....	243
7. NOMENCLATURA.....	244
8. BIBLIOGRAFÍA.....	247
9. ANEJOS.....	277
<i>ANEJO 1. Isotermas de sorción de corteza de limón.....</i>	<i>277</i>
<i>ANEJO 2. Secado en lecho fluidizado de zanahoria y albaricoque.....</i>	<i>280</i>
<i>ANEJO 3. Influencia de la velocidad del aire en el secado asistido por ultrasonidos de potencia.....</i>	<i>284</i>
<i>ANEJO 4. Influencia de la temperatura del aire en el secado asistido por ultrasonidos de potencia.....</i>	<i>293</i>
<i>ANEJO 5. Influencia de la densidad de carga másica en el secado asistido por ultrasonidos de potencia.....</i>	<i>296</i>
<i>ANEJO 6. Influencia de la potencia aplicada en el secado asistido por ultrasonidos de potencia.....</i>	<i>299</i>
<i>ANEJO 7. Liofilización a presión atmosférica de bacalao.....</i>	<i>302</i>
<i>ANEJO 8. Método implícito de las diferencias finitas. Aplicación a la modelización del secado de alimentos considerando la resistencia externa.....</i>	<i>304</i>
<i>ANEJO 9. Publicaciones relacionadas con la tesis doctoral.....</i>	<i>313</i>