

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	<u>Pag.</u>
CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO	ii
LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vi
RESUMEN	xviii
CAPÍTULO 1: GENERALIDADES	
1.1 Antecedentes	1
1.2 Definición del Problema	2
1.3 Objetivos	4
1.3.1 Objetivo General	4
1.3.2 Objetivos Específicos	4
1.4 Justificación	4
1.5 Alcance del Proyecto	5
CAPÍTULO 2: DESHIDRATACIÓN DE ALIMENTOS	
2.1 Importancia de la Deshidratación	7
2.2 Ventajas de la Deshidratación	8
2.3 Teoría de la Deshidratación	9
2.3.1 Actividad de Agua	9
2.3.2 Movimiento Migratorio del Agua	10
2.3.3 Influencia del Secado en la Calidad de los Alimentos	12
2.3.4 Técnicas de Secado	14
2.3.5 Preparación de los Productos para el Secado	17
2.3.6 Almacenamiento y Envasado de Productos Deshidratados	18

CAPÍTULO 3: PRODUCTOS A SECAR

3.1 Manzana	21
3.1.1 Origen y Variedades	22
3.1.2 Características Físicas	23
3.1.3 Composición Química	23
3.2 Durazno	24
3.2.1 Origen y Variedades	25
3.2.2 Características Físicas	25
3.2.3 Características Químicas	26
3.3 Uvilla	27
3.3.1 Alternativas de Procesamiento Agroindustrial y Consumo	28
3.3.2 Características Físicas	29
3.3.3 Características Químicas	29

CAPÍTULO 4: ALTERNATIVAS DE SECADO

4.1 Equipos para el Secado de Alimentos	31
4.1.1 Secado al Sol	32
4.1.2 Secado Solar	33
4.1.3 Secado por Gases Calientes	39
4.1.4 Secadores por Conducción	54
4.1.5 Otros Métodos de Secado	57

CAPÍTULO 5: PARÁMETROS RELACIONADOS CON LA DESHIDRATACIÓN

5.1 Contenido de Humedad	67
5.1.1 Contenido de Humedad Inicial	69
5.1.2 Contenido de Humedad de Equilibrio	69
5.1.3 Contenido de Humedad Libre	70
5.1.4 Contenido de Humedad Retenida o Ligada	70
5.1.5 Contenido de Humedad no Retenida o Desligada	71
5.2 Actividad de Agua	71
5.3 Curvas de Equilibrio Higroscópico	72

5.3.1	Importancia de las Curvas de Equilibrio Higroscópico	74
5.3.2	Obtención de las Curvas de Equilibrio Higroscópico	74
5.4	Convección	75
5.4.1	Convección Natural	79
5.4.2	Convección Forzada	81
5.4.3	Convección Combinada	82
5.5	Radiación	82
5.6	Evaporación y Condensación	86
5.6.1	Introducción	86
5.6.2	Condensación	90
5.7	Temperatura del Proceso de Secado	92
5.8	Velocidad de Secado	93
5.8.1	Velocidad de Secado Constante	93
5.8.2	Velocidad de Secado Decreciente	95
5.9	Tiempo de Secado	96
5.9.1	Tiempo de Secado Correspondiente al Período de Velocidad Constante	97
5.9.2	Tiempo de Secado Correspondiente al Período de Velocidad Decreciente	97
CAPÍTULO 6: DISEÑO DEL SISTEMA DE SECADO DE FRUTAS		
6.1	Parámetros de Diseño	99
6.1.1	Propiedades del Aire	99
6.1.2	Propiedades de los Productos A Secar	101
6.1.3	Carga de Secado	108
6.1.4	Temperatura del Aire de Secado	111
6.1.5	Tiempo de Secado	112
6.1.6	Velocidad del Aire de Secado	115
6.2	Diseño del Horno de Secado	115
6.2.1	Diseño de la Cámara	115
6.2.2	Diseño del Sistema de Calefacción	133
6.2.3	Diseño del Sistema de Ventilación	139

6.2.4 Diseño de la Estructura de Soporte	149
6.3 Diseño del Sistema de Control	149
6.4 Diagramas de Procesos	151
CAPÍTULO 7: PRUEBAS Y RESULTADOS	
7.1 Plan de Pruebas	171
7.2 Análisis de Resultados	174
CAPÍTULO 8: EVALUACIÓN ECONÓMICA – FINANCIERA	
8.1 Evaluación Económica	179
8.1.1 Costos Directos	179
8.1.2 Costos Indirectos	182
8.1.3 Imprevistos	183
8.2 Evaluación Financiera	183
8.2.1 Fuente de Financiamiento	183
8.2.2 Valor Actual Neto (VAN)	184
8.2.3 Tasa Interna de Retorno (TIR)	192
8.2.4 Relación Costo Beneficio	193
CAPÍTULO 9: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
9.1 Conclusiones	195
9.2 Recomendaciones	197

TABLAS

	<u>Pag.</u>
Tabla 3.1. Composición química promedio de la manzana	24
Tabla 3.2. Composición por 100 gramos de porción comestible de durazno	27
Tabla 3.3. Composición nutricional de la uvilla	29
Tabla 5.1. Clasificación de productos agrícolas de acuerdo a su humedad inicial	69
Tabla 5.2. Emisividad de varias superficies	84
Tabla 6.1. Temperatura y humedad relativa promedio para Quito	100
Tabla 6.2. Propiedades del aire a temperatura ambiente	101
Tabla 6.3. Características de la Uvilla	104
Tabla 6.4. Características de la Manzana	106
Tabla 6.5. Características del Durazno	108
Tabla 6.6. Carga de Producto	111
Tabla 6.7. Temperaturas de Secado	111
Tabla 6.8. Propiedades del aire a temperatura máxima de trabajo	112
Tabla 6.9. Dimensiones del horno deshidratador	120
Tabla 6.10. Propiedades de los materiales utilizados en la cámara	123
Tabla 6.11. Propiedades del flujo de aire	124
Tabla 6.12. Resistencias Térmicas	126
Tabla 6.13. Calor Perdido	132
Tabla 6.14. Propiedades del aire a diferentes temperaturas de trabajo	134
Tabla 6.15. Viscosidad dinámica del agua a temp. de bulbo húmedo	134
Tabla 6.16. Valores de calor, velocidad y tiempo de secado	137
Tabla 6.17. Capacidad de secado del horno	139

Tabla 8.1. Materiales de estructura y recubrimiento	179
Tabla 8.2. Materiales de construcción de bandejas	180
Tabla 8.3. Accesorios y equipos de sistema de control	181
Tabla 8.4. Costo de mano de obra	181
Tabla 8.5. Total Costos Directos	182
Tabla 8.6. Total Costos Indirectos	182
Tabla 8.7. Producción anual estimada	184
Tabla 8.8. Costos mano de obra por carga	185
Tabla 8.9. Costos consumo energía eléctrica	186
Tabla 8.10. Valor Actual Neto ($i=20\%$)	191
Tabla 8.11. Valor Actual Neto ($i^*=25\%$)	192
Tabla 8.12. Tasa interna de retorno ($i^*=74,34\%$)	193
Tabla 8.13. Relación Costo-Beneficio (C/B) ($i=20\%$)	194

FIGURAS

	<u>Pag.</u>
Figura 1.1. Alternativas de procesamiento y conservación de fruta	3
Figura 2.1. Gráfica de estabilidad de los alimentos	10
Figura 2.2. Materiales de empaque	19
Figura 2.3. Empaque y embalaje	19
Figura 4.1. Secado al sol	33
Figura 4.2. Tipos de secadores solares	35
Figura 4.3. Secado solar directo	36
Figura 4.4. Secador solar indirecto	37
Figura 4.5. Secador solar asistido con almacenamiento de calor por agua	39
Figura 4.6. Clasificación de los principales tipos de secadores	40
Figura 4.7. Secador de horno	41
Figura 4.8. Secador de bandejas	43
Figura 4.9. Secador de túnel	45
Figura 4.10. Secador de banda transportadora	47
Figura 4.11. Secador rotatorio	48
Figura 4.12. Secadores de Lecho Fluidizado	50
Figura 4.13. Secador neumático tipo spray	53
Figura 4.14. Estabilidad de alimentos basados en el efecto "obstáculo"	64
Figura 4.15. Procesos tradicionales y nuevos desarrollados en conservación de alimentos	65
Figura 5.1. Curva de equilibrio higroscópico	72
Figura 5.2. Serie de curvas de equilibrio higroscópico	73
Figura 6.1. Carta Psicrométrica. Programa Akton	101
Figura 6.2: Bandeja de acero inoxidable	116
Figura 6.3: Estructura de las Bandejas de acero inoxidable	119

Figura 6.4: Cámara de secado	119
Figura 6.5: Vista frontal y longitudinal de las bandejas en el horno	120
Figura 6.6: Vista frontal de la puerta del horno	121
Figura 6.7: Circuito térmico equivalente para una pared compuesta en serie	122
Figura 6.8: Calor suministrado al producto	133
Figura 6.9: Intercambiador de Calor	138
Figura 6.10. Ventilador Turbo-Axial	141
Figura 6.11. Ventilador Vaneaxial	142
Figura 6.12. Curvas características de los ventiladores axiales	143
Figura 6.13. Ventiladores contrarrotatorios	145
Figura 6.14: Estructura soporte	149
Figura 6.15: Control de temperatura interior de la cámara	150
Figura 7.1. Curva de secado de la manzana	176
Figura 7.2. Curva de secado del durazno	176
Figura 7.3. Curva de secado de la uvilla	177

NOMENCLATURA

- A_{sec} : Área de superficie de secado. / [m²]
 A_{Tsec} : Area total de secado. / [m²]
 A_{Ban} : Area de carga por bandeja. / [m²]
 a_w Actividad de agua [adimensional]
 A : Superficie de contacto [m²]
 A_{ms} : Área de superficie por Kg. de materia seca. / [m²/Kg_{materia seca}]
 A_s : Área superficial promedio. / [cm²]
 A_{band} : Área de carga por bandeja. / [m²]
 A_{band} : Área de carga por bandeja. / [m²]
 C_d : Carga de producto final deshidratado. / [Kg]
 C_f : Carga de producto fresco. / [Kg]
 C_{ev} : Cantidad de agua a evaporar. / [Kg]
 C_s : Carga de masa seca. / [Kg]
 Cap_{SEC} : Capacidad de secado del horno. / [m³/h]
 D_u : Diámetro promedio. / [cm]
 e : Espesor del material. / [m]
 F_{c_u} : Factor de carga para la uvilla.
 F_{neto} : Flujo neto
 g : Gravedad 9,81 [m/s²]
 Gr : Número de Grashoff [adimensional]
 G : Flujo másico de aire [kg / (m² x s)]
 h : Coeficiente de transferencia de calor por convección [W/(m²·°K)]
 h_{fg} : Calor latente de vaporización [J / kg]
 h : Entalpia. / [KJKg]
 i : Interés. / [%]
 k : Conductividad térmica [W/(m°K)]
 L : Longitud de la pared [m]
 m_T : Masa total del producto [Kg]
 m_S : Masa seca del producto [Kg]

m_W : Masa de agua evaporable del producto [Kg]
 m : Pendiente de la recta [Kg _{masa seca} / (m² x min)]
 n_{band} : Numero de bandejas.
 Nu : Número de Nusselt [adimensional]
 Nu_N : Número de Nusselt para convección natural [adimensional]
 Nu_f : Número de Nusselt para convección forzada [adimensional]
 n : Número de años
 P_{va} : Presión parcial del vapor de agua de un alimento [Pa]
 P_v : Presión parcial del vapor de agua pura [Pa]
 Pr : Número de Prandtl [adimensional]
 P_{atm} : Presión atmosférica / [Pa]
 \dot{Q}_{conv} : Tasa de transferencia de calor por convección [J/s]
 \dot{Q}_{emit} : Tasa de radiación máxima [J/s].
 q_a : Calor trasferido al producto. / [W]
 Q_a : Caudal de aire necesario. / [m³/min]
 Re : Número de Reynolds [adimensional]
 Ra : Número de Rayleigh [adimensional]
 R : Velocidad de secado [Kg _{agua} / (s * Kg _{masa seca})]
 R_c : Velocidad de secado constante [kg _{agua} / s]
 R''_d : Velocidad de secado en el periodo postcrítico [Kg _{agua} / (m² x min)]
 R_A : Constante de los gases ideales / 0.2870[KPam³/Kg°K]
 R_{Tot} : Resistencia térmica total. / [K/W]
 T_s : Temperatura de la superficie del producto [°K]
 T_f : Temperatura del fluido mas allá de la superficie [°K]
 T_∞ : Temperatura del ambiente [K]
 T_{bs} : Temperatura de bulbo seco – aire de secado [°C]
 T_{bh} : Temperatura de bulbo húmedo del aire de secado [°C]
 t_T : Tiempo total de secado [s]
 t_c : Tiempo de secado correspondiente al periodo de velocidad constante [s]
 t_d : Tiempo de secado correspondiente al período de velocidad decreciente [s]
 T_A : Temperatura del aire ambiente / [°K]

- U: Coeficiente global de transferencia de calor [W / (m² x °C)]
- V_A: Velocidad del aire de secado [m/s]
- V_u: Volumen promedio del producto. / [m³]
- Vol: Volumen de carga húmeda de producto / [m³]
- VAN: Valor actual neto
- w: Velocidad de flujo [m/s]
- X_W : Contenido de humedad en base húmeda [%]
- X_d: Contenido de humedad en base seca [%]
- X_F : Contenido de humedad libre [Kg_{agua} / Kg_{masa seca}]
- X_{eq} : Contenido de humedad de equilibrio [Kg_{agua} / Kg_{masa seca}]
- X_c : Contenido de humedad crítica [Kg_{agua} / Kg_{masa seca}]
- z: Altura exacta de la ubicación / [m]
- α: Tasa de transferencia de calor. / [W/m²K]
- β: Coeficiente volumétrico de expansión térmica [K⁻¹]
- ε : Emisividad de la superficie (0 ≤ ε ≤ 1) [adimensional]
- Ø_{eq} : Humedad relativa del aire en equilibrio higroscópico [%]
- Θ_p: Angulo de inclinación de las paredes, perpendicular del flujo [rad]
- ρ_a: Densidad del aire / [kg/m³]
- ρ_u: Densidad del producto. / [Kg/m³]
- σ : Constante de Stefan-Boltzmann (σ = 5,669 x 10⁻⁸ [W/m². K⁴])
- μ: Viscosidad dinámica [m²/s]
- ν: Viscosidad cinemática [m²/s]

ANEXOS

	<u>Pag.</u>
A: Planos del horno de secado de frutas	203
B: Manual de operación y mantenimiento del equipo	245
C: Fotografías del equipo	253
D: Fotografías de los productos	259
E: Selección y hoja técnica del ventilador	263
F: Tablas de propiedades	269
G: Diseño de estructura soporte	279