



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y
MECÁNICA**

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO MECÁNICO**

**TEMA: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA TÉRMICO-
ENERGÉTICO PARA EVALUAR LAS CONDICIONES ÓPTIMAS DE
SECADO DEL CACAO TIPO CCN-51 Y NACIONAL**

**AUTORES: AMAGUAÑA CAZA, NATHALY YESSENIA
OLAYA SEGURA, ALEXI DAVID**

DIRECTOR: ING. GUASUMBA CODENA, SEGUNDO JOSÉ MSc.

SANGOLQUÍ

2018



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA TÉRMICO-ENERGÉTICO PARA EVALUAR LAS CONDICIONES ÓPTIMAS DE SECADO DEL CACAO TIPO CCN-51 Y NACIONAL”** fue realizado por los señores **AMAGUAÑA CAZA, NATHALY YESSENIA** y **OLAYA SEGURA, ALEXI DAVID** el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 09 de agosto del 2018

.....
ING. GUASUMBA CODENA SEGUNDO JOSÉ

C. C. 170831875-1

DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, **AMAGUAÑA CAZA, NATHALY YESSENIA** y **OLAYA SEGURA, ALEXI DAVID** declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA TÉRMICO-ENERGÉTICO PARA EVALUAR LAS CONDICIONES ÓPTIMAS DE SECADO DEL CACAO TIPO CCN-51 Y NACIONAL”** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 09 de agosto del 2018

.....
AMAGUAÑA CAZA NATHALY YESSENIA

C. C. 172346227-9

.....
OLAYA SEGURA, ALEXI DAVID

C. C. 120481695-1



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

AUTORIZACIÓN

Nosotros, **AMAGUAÑA CAZA, NATHALY YESSENIA** y **OLAYA SEGURA, ALEXI DAVID** autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA TÉRMICO-ENERGÉTICO PARA EVALUAR LAS CONDICIONES ÓPTIMAS DE SECADO DEL CACAO TIPO CCN-51 Y NACIONAL”** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 09 de agosto del 2018

.....
AMAGUAÑA CAZA NATHALY YESSENIA

C. C. 172346227-9

.....
OLAYA SEGURA, ALEXI DAVID

C. C. 120481695-1

DEDICATORIA

A mis padres Agustín y Mónica por su apoyo incondicional, sus valiosos consejos y ser mi guía en cada etapa de mi vida, a mis hermanos Maribel, Felipe y Mateo que con su cariño y motivación supere cada obstáculo que se presentó, a mi abuelita Carmen por creer en mí y mostrarme siempre su cariño.

Nathaly Amaguaña

Dedico este trabajo a mi mamá Ofelia por haberme dado todo su apoyo incondicional y su amor para cumplir esta meta personal.
A mi papá Jorge quien desde el cielo me cuida constantemente y guía mis pasos.
A mis hermanos Fernando e Isabel por ser un gran apoyo en mi vida y brindarme sus consejos
A toda mi familia por siempre estar conmigo unidos y enseñándome que todas las batallas se ganan en equipo.

David Olaya

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme ciencia y sabiduría para poder estudiar esta maravillosa carrera.

A mis padres por su esfuerzo constante para apoyarme moral y económicamente, sin ellos nada de esto sería posible.

A David Olaya por el apoyo mutuo, las ideas y la culminación de esta gran etapa de mi vida.

A mi director de proyecto ingeniero José Guasumba por su asesoría y hacer posible la culminación del presente proyecto.

A mis queridos profesores por brindarme sus conocimientos y formarme profesionalmente.

A la Universidad de las Fuerzas Armadas-Espe y al Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica por brindarme la oportunidad de estudiar la carrera.

Nathaly Amaguaña

A Dios el creador y señor de todo, quien cada día le agradezco por tenerme con vida luchando y cumpliendo mis metas.

A mi madre quien depositó toda su confianza en mí y ser una parte fundamental en mi desarrollo personal y profesional, para que hoy este cumpliendo este objetivo, así como a mis hermanos quienes me ayudaron con palabras de fortalezas y apoyo en los momentos difíciles.

A mi compañera de tesis Nathaly con quien estoy cumpliendo este sueño y deseándole los mejores éxitos.

Al director de este proyecto el Ing. José Guasumba por compartirme sus conocimientos y por despejar cada duda a medida que aparecían durante la elaboración de este trabajo.

Finalmente un agradecimiento muy especial a mis amigos Juan y Esteban ya que con su amistad y apoyo estamos cumpliendo con nuestras metas y objetivos.

A todos los ingenieros y compañeros de clases por sus enseñanzas.

A todos muchas gracias.

David Olaya

Índice de Contenido

CERTIFICACIÓN.....	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	ii
AUTORIZACIÓN	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTOS	v
ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
RESUMEN.....	xviii
ABSTRACT	xix
CAPÍTULO I.....	1
1. GENERALIDADES	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Definición del problema	3
1.3. Objetivos.....	4
1.3.1. Objetivo general.....	4
1.3.2. Objetivos específicos.....	4
1.4. Alcance del proyecto.....	4
1.5. Justificación e importancia	5
CAPÍTULO II.....	7
2. MARCO TEÓRICO	7
2.1. Cacao ecuatoriano.....	7
2.2. Características del cacao.....	8
2.2.1. Características Morfológicas.....	8
2.2.2. Estructura del cacao	9
2.3. Tipos de cacao.....	9
2.3.1. Cacao Nacional o Fino.....	10
2.3.2. Cacao CCN-51.....	10
2.4. Beneficio del cacao	11
2.5. Cosecha de cacao	11
2.6. Extracción de las semillas.....	12
2.7. Fermentación	13
2.8. Secado.....	14
2.8.1. Secado natural.....	14
2.8.2. Secado Artificial	15
2.9. Limpieza y selección.....	16
2.10. Almacenamiento	16
2.11. Control de calidad del cacao.....	17
2.11.1. Características organolépticas.....	18

2.11.2. Características físicas.....	19
2.11.3. Características químicas.....	20
2.12. Normas de Calidad	21
2.12.1. Normas Internacionales para el Cacao.....	22
2.13. Transferencia de calor	23
2.13.1. Conducción.....	23
2.13.2. Convección	23
2.13.3. Radiación.....	24
2.14. Coeficiente global de transferencia.....	25
2.15. Transferencia de calor por convección natural	26
2.16. Aislamiento térmico.....	28
2.16.1. Lana de roca	28
2.16.2. Lana de vidrio	29
2.17. Requerimientos energéticos	30
2.17.1. Condiciones del medio externo.....	30
2.17.2. Propiedades termofísicas del grano.....	30
2.17.3. Medición de humedad en el grano de cacao	31
2.17.4. Tiempo de secado	32
2.17.5. Humedad relativa del aire	33
2.17.6. Humedad Absoluta	33
2.17.7. Velocidad de secado.....	34
2.17.8. Higroscopia de los granos de cacao	34
CAPÍTULO III.....	36
3. DISEÑO DEL SISTEMA TÉRMICO-ENERGÉTICO	36
3.1. Cuadro de situaciones	37
3.2. Alternativas de diseño.....	37
3.2.1. Propuestas de tipo de secadores.....	38
3.2.2. Propuestas de sistemas de calentamiento	40
3.2.3. Propuestas de tipo de secadores.....	43
3.3. Matriz de decisión	44
3.3.1. Aspectos Técnicos.....	44
3.3.2. Aspectos económicos (costo)	44
3.3.3. Otros complementarios.....	45
3.4. Matriz morfológica.....	47
3.4.1. Descripción del sistema térmico- energético	47
3.4.2. Especificaciones de diseño.....	48
3.4.3. Componentes del sistema térmico-energético	48
3.5. Diseño mecánico	49
3.5.1. Cámara del secador.....	49

3.5.2.	Aislante térmico	52
3.5.3.	Cubierta de la cámara.....	52
3.5.4.	Estructura de la cámara.....	54
3.5.5.	Bandejas.....	57
3.5.6.	Soporte de bandejas.....	60
3.5.7.	Puerta	62
3.5.8.	Cubierta de la puerta	64
3.5.9.	Soporte para el sistema	64
3.6.	Diseño térmico.....	73
3.6.1.	Condiciones psicrométricas del ambiente.....	73
3.6.2.	Contenido de humedad inicial.....	75
3.6.3.	Masa seca del cacao	76
3.6.4.	Cantidad de agua a remover	76
3.6.5.	Tiempo de secado	76
3.6.6.	Calor útil de secado	79
3.6.7.	Coeficiente global de transferencia de calor	82
3.6.8.	Calor perdido por paredes del secador.....	90
3.6.9.	Calor perdido por cambios de aire	91
3.6.10.	Calor acumulado en paredes.....	92
3.6.11.	Calor perdido por respiraderos y rejillas	93
3.6.12.	Calor Neto.....	94
3.7.	Modelado matemático del sistema térmico-energético	94
3.7.1.	Distribución de temperaturas	95
3.7.2.	Solución para el estado estacionario	98
3.7.3.	Solución para el estado transitorio.....	103
3.8.	Balance energético	110
3.8.1.	Calor máximo entregado al producto	111
3.8.2.	Calor perdido por radiación.....	111
3.8.3.	Calor perdido por convección	112
3.8.4.	Calor perdido por evaporación de agua	112
3.8.5.	Balance energético para el producto	113
3.8.6.	Balance energético para la cámara	114
3.9.	Selección de resistencias eléctricas	115
3.10.	Diseño del sistema eléctrico/electrónico	116
3.10.1.	Sensor de temperatura	116
3.10.3.	Celda de carga.....	118
CAPÍTULO IV		121
4.	CONSTRUCCIÓN MONTAJE Y PRUEBAS	121
4.1.	Construcción del sistema térmico-energético	121

4.1.1.	Materiales	121
4.1.2.	Máquinas, herramientas e instrumentos	122
4.2.	Diagramas de proceso	124
4.2.1.	Cámara de secado	124
4.2.2.	Estructura de la cámara	127
4.2.3.	Tubo para recubrimiento de resistencia	128
4.2.4.	Soporte de resistencia	129
4.2.5.	Cubierta de la cámara	130
4.2.6.	Puerta	131
4.2.7.	Cubierta de la puerta	133
4.2.8.	Bandejas	134
4.2.9.	Soporte de bandejas	136
4.2.10.	Soporte para el sistema	137
4.2.11.	Ensamblaje	138
4.3.	Implementación del sistema eléctrico/electrónico	141
4.4.	Pruebas de validación del sistema térmico-energético	147
4.5.	Eficiencia del sistema térmico-energético	148
CAPÍTULO V		151
5.	PROCESO DE SECADO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	151
5.1.	Plan de pruebas	151
5.2.	Proceso para secado de los granos de cacao	154
5.3.	Preparación de las muestras de cacao	155
5.4.	Pruebas de secado	156
5.4.1.	Ensayo de secado del cacao tipo CCN-51	157
5.4.2.	Ensayo de secado para cacao tipo nacional	163
5.5.	Prueba físicas y de calidad para los granos de cacao	169
5.5.1.	Peso en 100 granos de cacao	169
5.5.2.	Contenido de humedad en 100 granos	171
5.5.3.	Granos defectuosos después del proceso de secado	172
5.5.4.	Resultados de requisitos físicos para los granos de cacao	174
5.5.5.	Prueba de cascarilla en los granos de cacao	176
5.5.6.	Pruebas de pH de los granos de cacao	178
CAPÍTULO VI		182
6.	ANÁLISIS ECONÓMICO	182
6.1.	Costos directos	182
6.2.	Costos indirectos	184
6.3.	Costo total	185
CAPÍTULO VII		187
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	187

7.1. Conclusiones 187

7.2. Recomendaciones 188

BIBLIOGRAFÍA..... 190

ANEXOS..... 197

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. <i>Estructura de los granos de cacao</i>	9
Tabla 2. <i>Características del grano fermentado</i>	13
Tabla 3. <i>Parámetro físico químicos del grano</i>	17
Tabla 4. <i>Sabores básicos y específicos del cacao</i>	18
Tabla 5. <i>Requisitos físicos y calidad para los granos de cacao</i>	21
Tabla 6. <i>Propiedades térmicas de la lana de roca</i>	29
Tabla 7. <i>Propiedades térmicas de lana de vidrio</i>	30
Tabla 8. <i>Condiciones termofísicas del medio externo</i>	30
Tabla 9. <i>Densidad del cacao</i>	31
Tabla 10. <i>Matriz de Alternativas de Selección</i>	38
Tabla 11. <i>Matriz comparativa de tipos de secador</i>	40
Tabla 12. <i>Matriz comparativa de Sistema de calentamiento</i>	42
Tabla 13. <i>Matriz comparativa de la forma de la cámara</i>	44
Tabla 14. <i>Ponderación de parámetros</i>	45
Tabla 15. <i>Pautas de valoración</i>	45
Tabla 16. <i>Matriz de decisión para el tipo de secador</i>	46
Tabla 17. <i>Matriz de decisión para el sistema de calentamiento</i>	46
Tabla 18. <i>Matriz Morfológica de selección</i>	47
Tabla 19. <i>Resultados psicrométricos del aire en el ambiente</i>	74
Tabla 20. <i>Resultados psicrométricos del aire de secado en la cámara</i>	75
Tabla 21. <i>Características técnicas de las resistencias eléctricas</i>	116
Tabla 22. <i>Especificaciones técnicas de la termocupla tipo K</i>	117
Tabla 23. <i>Especificaciones técnicas del sensor DHT22</i>	117
Tabla 24. <i>Especificaciones de la celda de carga</i>	119
Tabla 25. <i>Listado de materiales</i>	121
Tabla 26. <i>Listado de máquinas</i>	122
Tabla 27. <i>Listado de herramientas</i>	123
Tabla 28. <i>Listado de instrumentos</i>	124
Tabla 29. <i>Listado de materiales eléctricos</i>	141

Tabla 30. <i>Componentes del gabinete del control</i>	144
Tabla 31. <i>Medición de las resistencias eléctricas</i>	148
Tabla 32. <i>Checklist validación del sistema</i>	149
Tabla 33. <i>Parámetros a medir durante el proceso de secado</i>	151
Tabla 34. <i>Características de instrumentos utilizados</i>	153
Tabla 35. <i>Resultados del secado para cacao CCN-51</i>	157
Tabla 36. <i>Resultados del ensayo de secado en el cacao CCN-51</i>	159
Tabla 37. <i>Resultados del secado para cacao nacional</i>	164
Tabla 38. <i>Resultados del ensayo de secado en el cacao nacional</i>	166
Tabla 39. <i>Peso de 100 granos de cacao</i>	170
Tabla 40. <i>Contenido de humedad de 100 granos de cacao CCN-51</i>	171
Tabla 41. <i>Contenido de humedad de 100 granos de cacao nacional</i>	171
Tabla 42. <i>Granos defectuosos para el tipo CCN-51</i>	174
Tabla 43. <i>Granos defectuosos para el tipo nacional</i>	174
Tabla 44. <i>Resultados de calidad en los granos de cacao CCN-51</i>	175
Tabla 45. <i>Resultados de calidad en los granos de cacao nacional</i>	175
Tabla 46. <i>Resultados de cascarilla en los granos de cacao CCN-51</i>	177
Tabla 47. <i>Resultados de cascarilla en los granos de cacao nacional</i>	178
Tabla 48. <i>Resultados de pH en los granos de cacao</i>	180
Tabla 49. <i>Costo de los materiales mecánicos</i>	182
Tabla 50. <i>Costo de materiales eléctricos/electrónicos</i>	183
Tabla 51. <i>Costo de mano de obra</i>	184
Tabla 52. <i>Total de costos directos</i>	184
Tabla 53. <i>Costos indirectos</i>	185
Tabla 54. <i>Costo de energía realizar los ensayos</i>	185
Tabla 55. <i>Costos totales</i>	186

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Cacao ecuatoriano.....	8
Figura 2. Cacaotero	8
Figura 3. Fruto del cacao	9
Figura 4. Cacao nacional.....	10
Figura 5. Cacao CCN-51	11
Figura 6. Recolección del cacao.....	12
Figura 7. Herramientas de cosecha.....	12
Figura 8. Extracción de semillas	13
Figura 9. Técnica de secado natural.....	15
Figura 10. Secadores	16
Figura 11. Almacenamiento del cacao.....	17
Figura 12. Cascarilla de cacao	19
Figura 13. Normas Internacionales para el cacao	22
Figura 14. Transferencia por convección natural.....	26
Figura 15. Capa límite en una placa plana vertical	27
Figura 16. Lana de roca.....	29
Figura 17. Lana de vidrio	29
Figura 18. Tipos de agua en los granos de cacao	35
Figura 19. Fuerzas y velocidades en el proceso de secado convencional	35
Figura 20. Ingeniería Concurrente	36
Figura 21. Cuadro de situaciones para el sistema térmico-energético	37
Figura 22. Secador de bandejas.....	38
Figura 23. Secador Rotativo	39
Figura 24. Secador al vacío	40
Figura 25. Secador con GLP	41
Figura 26. Secador con combustión de biomasa.....	41
Figura 27. Secadora de cacao con resistencias eléctricas	42
Figura 28. Cámara de forma poliédrica	43
Figura 29. Cámara rectangular	43

Figura 30. Dimensiones de la cámara de secado.....	50
Figura 31. Características técnicas de aislante térmico: Lana de vidrio	52
Figura 32. Conformación del sistema térmico energético.....	52
Figura 33. Cubierta de la cámara	53
Figura 34. Esfuerzos de Von Mises de la estructura de la cámara de secado	56
Figura 35. Desplazamientos de la estructura para la cámara.....	57
Figura 36. Esfuerzos de Von Mises de bandejas.....	59
Figura 37. Desplazamientos de bandejas.....	60
Figura 38. Esfuerzos de Von Mises del soporte de bandejas	61
Figura 39. Desplazamientos del soporte de bandejas	62
Figura 40. Puerta para el sistema.....	63
Figura 41. Dimensiones disponible y propiedades de la sección.....	65
Figura 42. Perfil estructural ángulo “L”	65
Figura 43. Dimensiones disponible y propiedades de la sección.....	66
Figura 44. Valores de k para columnas	68
Figura 45. Relación Ancho-espesor: Elementos a compresión	69
Figura 46. Esfuerzos de Von Mises del soporte para el sistema	72
Figura 47. Desplazamientos del soporte para el sistema	72
Figura 48. Carta psicrométrica del sistema térmico-energético.....	73
Figura 49. Propiedades psicrométricas del ambiente	74
Figura 50. Esquema del calor útil en la cámara de secado	79
Figura 51. Esquema de la pared del secador	83
Figura 52. Esquema de la cámara de secado	85
Figura 53. Celdas de Benard.....	86
Figura 54. Diámetro hidráulico.....	87
Figura 55. Coeficiente de convección externa	90
Figura 56. Esquema del Calor perdido por paredes en el sistema	91
Figura 57. Esquema del aislamiento térmico	95
Figura 58. Balance energético para el aislamiento	96
Figura 59. Perfil de temperaturas y condiciones de frontera.....	99

Figura 60. Perfil de Temperatura en el estado estacionario	103
Figura 61. Perfil de temperatura en el estado transitorio	110
Figura 62. Dimensiones para el producto	111
Figura 63. Esquema del balance energético para el producto.....	113
Figura 64. Esquema del balance energético para la cámara.....	114
Figura 65. Resistencia con ductos cerámicos.....	115
Figura 66. Esquemas de las resistencias eléctricas	116
Figura 67. Termocupla tipo K.....	117
Figura 68. Conexión para el sensor DHT22 y el Arduino.....	118
Figura 69. Celda de carga	118
Figura 70. Conexión de celda de carga en arduino	119
Figura 71. Conexión de la pantalla LCD	120
Figura 72. Bosquejo del sistema de secado	120
Figura 73. Diagrama de proceso de cámara de secado	125
Figura 74. Corte y doblado de la placa A para cámara de secado	126
Figura 75. Ubicación de las placas (B) y (C).....	126
Figura 76. Diagrama de proceso de estructura de la cámara	127
Figura 77. Diagrama de proceso de tubo para recubrimiento de resistencia.....	128
Figura 78. Tubo para recubrimiento de resistencia.....	128
Figura 79. Diagrama de proceso de soporte de resistencia.....	129
Figura 80. Soporte de resistencia soldado a la cámara.....	129
Figura 81. Diagrama de proceso de cubierta de la cámara	130
Figura 82. Proceso de doblado de la placa (A).....	131
Figura 83. Perforación de la placa (C)	131
Figura 84. Diagrama de proceso de puerta	132
Figura 85. Puerta	132
Figura 86. Diagrama de proceso de cubierta de la puerta	133
Figura 87. Cubierta de la puerta	133
Figura 88. Diagrama de proceso de bandejas	134
Figura 89. Corte de la malla de acero inoxidable.....	135

Figura 90. Bandejas.....	135
Figura 91. Ganchos en la bandeja para el pesaje	135
Figura 92. Diagrama de proceso del soporte de bandejas	136
Figura 93. Disposición de soportes de bandejas	136
Figura 94. Diagrama de proceso del soporte para el sistema.....	137
Figura 95. Soporte del sistema	138
Figura 96. Ensamblaje mecánico del sistema.....	139
Figura 97. Colocación de aislante térmico en las paredes de la cámara.....	139
Figura 98. Ubicación de la cubierta en la cámara.....	140
Figura 99. Sujeción de la puerta a la cámara	140
Figura 100. Ensamblaje mecánico del sistema térmico energético	141
Figura 101. Diagrama de proceso del sistema eléctrico	143
Figura 102. Exterior del gabinete de control	143
Figura 103. Interior del gabinete de control	144
Figura 104. Diagrama de proceso de la instrumentación del sistema	145
Figura 105. Conexión de la termocupla tipo K.....	146
Figura 106. Instrumentación para adquisición de datos	147
Figura 107. Caja para instrumentos electrónicos.....	147
Figura 108. Validación del sistema eléctrico/electrónico	150
Figura 109. Sistema.....	150
Figura 110. Ubicación de los indicadores de medición.....	152
Figura 111. Granos de cacao en baba	156
Figura 112. Peso inicial de los granos de cacao.....	156
Figura 113. Producto cargado en la cámara de secado	157
Figura 114. Granos de cacao seco CCN-51	160
Figura 115. Medición de humedad con el higrómetro	160
Figura 116. Curva de secado del cacao CCN-51	160
Figura 117. Diagrama de agua removida en los granos de cacao CCN-51	161
Figura 118. Diagrama de temperatura exterior y de secado.....	162
Figura 119. Diagrama de temperatura de pared lateral, inferior y producto	162

Figura 120. Cacao nacional en la cámara de secado	163
Figura 121. Granos de cacao seco nacional.....	166
Figura 122. Medición de humedad en cacao nacional.....	166
Figura 123. Curva de secado del cacao nacional	167
Figura 124. Diagrama de agua removida en los granos de cacao nacional	167
Figura 125. Diagrama de temperatura exterior y de secado.....	168
Figura 126. Diagrama de temperatura de pared lateral, inferior y producto	169
Figura 127. Pesaje de los granos de cacao.....	170
Figura 128. Contenido de humedad en los granos de cacao CCN-51 y nacional.....	172
Figura 129. Granos de cacao múltiples o pelota.....	172
Figura 130. Granos de cacao planos o granza	173
Figura 131. Granos de cacao negros	173
Figura 132. Pesaje de los granos defectuosos	173
Figura 133. Ensayo de corte del cacao CCN-51.....	174
Figura 134. Ensayo de corte de cacao nacional	175
Figura 135. Muestras de los granos de cacao	176
Figura 136. Cascarilla del cacao.....	176
Figura 137. Pesaje de la cascarilla	177
Figura 138. Calibración del pH-metro	179
Figura 139. Pesaje de 10 gramos de cacao	179
Figura 140. Solución de los granos de cacao más agua destilada.....	179
Figura 141. Agitación de la solución	180
Figura 142. Medición del pH.....	180
Figura 143. Costo total	186

RESUMEN

En el presente proyecto de titulación se planteó el diseño y construcción de un sistema térmico-energético que mediante la selección de los componentes mecánicos y el diseño térmico se obtendrá las condiciones óptimas del secado de cacao CCN-51 y nacional. La capacidad del equipo es de 12 kg de producto húmedo, para efectuar el proceso de secado los granos de cacao deben ser fermentados durante 3 días disminuyendo su contenido de humedad inicial al 40%. Se realizaron 9 ensayos para cada tipo en donde la temperatura de secado fue programada a 70°C, la humedad relativa en el interior de la cámara no superó el 40%, teniendo como resultado un tiempo de secado en el cacao CCN-51 de 9 horas y del cacao nacional de 10 horas que comparado con el secado natural que es de 4 a 6 días se redujo aproximadamente en un 90% el tiempo. Al finalizar el proceso se obtuvo un contenido de humedad del producto seco del 7%, con los datos obtenidos de la masa se determinaron las curvas de secado y la cantidad de agua removida para posteriormente hacer pruebas requeridas por la norma NTE INEN 176-Requisitos: peso en 100 granos, visualización de granos fermentados, violetas y los defectos en una muestra de 500 gramos por cada ensayo, el cacao presentó una coloración marrón, aroma característico a chocolate y sabor amargo agradable, se efectuó ensayos de porcentaje de cascarilla y pH para garantizar la calidad del producto.

PALABRAS CLAVES:

- **CACAO CCN-51**
- **CACAO NACIONAL**
- **CONVECCIÓN NATURAL**
- **CONTENIDO DE HUMEDAD**
- **CONTROL DE CALIDAD**

ABSTRACT

In the present titling project the design and construction of a thermal-energetic system was raised that by means of the selection of the mechanical components and the thermal design will obtain the optimal conditions of the cocoa drying CCN-51 and national. The capacity of the equipment is 12 kg of wet product, to effect the drying process the cocoa beans must be fermented for 3 days decreasing their initial moisture content to 40%. 9 tests were performed for each type in which the drying temperature was programmed at 70 ° C, the relative humidity inside the chamber did not exceed 40%, resulting in a drying time in the cocoa CCN-51 of 9 hours and of the national cocoa of 10 hours that compared with the natural drying that is of 4 to 6 days was reduced approximately in a 90% the time. At the end of the process a moisture content of the dry product of 7% was obtained, with the data obtained from the mass, the drying curves and the amount of water removed were determined to subsequently perform the tests required by the NTE INEN 176-Requirements: weight in 100 grains, visualization of fermented grains, violets and the defects in a sample of 500 grams for each test, the cocoa presented a brown coloration, chocolate characteristic aroma and pleasant bitter taste, tests of percentage of scale and pH for guarantee the quality of the product.

KEYWORDS:

- **CCN-51 COCOA**
- **NATIONAL COCOA**
- **NATURAL CONVECTION**
- **HUMIDITY CONTENT**
- **QUALITY CONTROL**

CAPÍTULO I

1. GENERALIDADES

1.1. Antecedentes

La producción de cacao en el Ecuador se ha incrementado y se evidencia en las exportaciones del 2017 donde existe un aumento del 23 % con relación al año 2016, con una tasa de exportación de 14800 Tm de grano, además se indica que el 80% de cultivos de cacao se encuentran en las provincias de Esmeraldas, Manabí, Guayas, Santa Elena, Los Ríos y El Oro (Ministerio de Agricultura y Ganadería, 2017). En las zonas rurales del Cantón de Buena Fe se producen cacao CCN-51 y nacional.

La calidad del cacao depende de las condiciones en que se realice la cosecha, fermentación, secado y de la tecnología que se use para el procesamiento.

La fermentación y el secado influye en la calidad de los granos de cacao, con un proceso inadecuado se podría perder propiedades organolépticas: aroma, sabor y textura; las cuales representan un requisito fundamental para la exportación. El secado se realiza por procesos naturales o artificiales, en las provincias mencionadas anteriormente el secado del cacao se lo realiza de forma natural al aire libre colocados en plásticos de color negro conocido como tendales exponiéndolos al sol y aprovechando el calor generado por los rayos solares para secar de forma lenta y paulatinamente los granos, según información proporcionada por los agricultores del cantón Buena Fe el tiempo de secado varía dependiendo de las condiciones climáticas, por lo general se obtiene un producto seco de 4 a 6 días y con una humedad aproximada de 15% (Anecacao, 2015), pero algunos agricultores no toman en cuenta

parámetros importantes como el tiempo de fermentación y el grado de humedad óptimo al que debe llegar los granos de cacao después del proceso de secado según indica Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 176 Cacao en grano – Requisitos.

Existen algunos estudios relacionados con la tecnología de secado en granos de cacao, en la Escuela de Ingeniería de Antioquia, Colombia se realizó un estudio acerca del “Análisis del proceso de deshidratación de cacao para la disminución del tiempo de secado” esta investigación redujo el tiempo de secado industrial, variando parámetros como la humedad y temperatura, utilizando un horno de gas para 7 bandejas y un horno con controlador de temperatura programable de 55 °C en 12 horas de funcionamiento (Tinoco & Ospina, 2010).

En México se investigó la “Evaluación del desempeño de un secador solar directo sobre semillas de cacao” y se disminuyó paulatinamente el contenido de humedad aproximadamente al 7.50% en 4 días (Romero, Álvarez, & Ferrer, 2016).

En la Escuela Superior Politécnica del Litoral se realizó: “Diseño de un secador motorizado para el cultivo de cacao en la provincia de Los Ríos” en la que los resultados obtenidos fueron tratados analíticamente utilizando principios de secado y modelos matemáticos para así disminuir el tiempo de secado de 7 días a 11 horas (Torres & Gonzalez, 2016).

En los estudios bibliográficos revisados de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE se encontraron temas relacionados con la calidad de secado de cacao, como son: (Maureira, 2006), (Espinoza & Ruiz, 2015), los mismos que abarcan temas de

diseño, simulación y análisis de resultados, obtenidos con las diferentes técnicas que se han empleado para el secado de los granos de cacao.

En el presente proyecto se diseñará y construirá un equipo con la finalidad de evaluar los parámetros de secado de cacao tipo CCN-51 y nacional, donde se implementarán sensores para la adquisición de datos con los cuales se determinará tiempos y temperaturas óptimas para el secado y así mejorar la calidad del producto que se cultiva en el cantón Buena Fe.

1.2. Definición del problema

Los principales problemas que se presenta en el secado tradicional o natural del grano de cacao son el contenido de humedad y el tiempo de secado, en cuanto al primer parámetro, la humedad debe descender hasta 7%, ya que a mayor contenido de humedad el grano disminuye su calidad, adquiriendo un olor desagradable y bajando su valor de comercialización.

En algunas haciendas se ha implementado el proceso de secado artificial, pero se han presentado problemas debido a que solo seca el exterior del grano de cacao dejando un porcentaje mayor de humedad en su interior, además en este proceso se pierden algunos parámetros de calidad del cacao como son: aroma, textura y sabor; debido a que muchos agricultores no tienen el suficiente conocimiento de las condiciones idóneas para el proceso de secado del cacao, haciendo que disminuya el tiempo de secado y disminuyendo la calidad de su producto.

Realizada la investigación bibliográfica se concluye que no existe un sistema térmico-energético que evalúe las condiciones óptimas de secado para alcanzar el

contenido de humedad según lo indica la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 0176 cacao en grano- requisitos, para los tipos de cacao CCN-51 y nacional, manteniendo las propiedades organolépticas.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Realizar el diseño y construcción de un sistema térmico-energético para evaluar las condiciones óptimas de secado de cacao tipo CCN-51 y nacional del cantón Buena Fe.

1.3.2. Objetivos específicos

- Investigar el estado del arte de sistemas energéticos para el secado de cacao.
- Definir los componentes mecánicos utilizados en el equipo y el diseño térmico para evaluar las condiciones óptimas del secado.
- Desarrollar el sistema eléctrico/ electrónico para la adquisición de datos requeridos por el proceso.
- Evaluar los parámetros de calidad de los granos de cacao tipo CCN-51 y nacional después del secado.

1.4. Alcance del proyecto

El alcance del proyecto consistirá en diseñar y construir un sistema térmico-energético en acero AISI 304 para la evaluación de condiciones óptimas de secado de cacao tipo CCN-51 y nacional. Se implementará un sistema de calentamiento en la cámara de secado integrado a un control de temperatura y un sistema electrónico para la adquisición de datos.

En el equipo se realizarán pruebas de secado de granos de cacao bajo las mismas condiciones ambientales para una posterior comparación y análisis de datos obtenidos en las diferentes pruebas de secado según la Norma Técnica Ecuatoriana. Durante el proceso de secado se tomarán los datos de temperatura interior de cámara de secado, temperatura del producto y la temperatura de pared utilizando termocuplas, termómetro infrarrojo y sensores. Además, se medirá el contenido de humedad del aire en el interior de la cámara, para caracterizar el proceso de secado, se obtendrán datos periódicos de temperatura de secado, contenido de humedad, temperatura de pared y del ambiente, velocidad del aire circundante, cantidad de agua removida. Las condiciones del proceso de secado, deben asegurar que el producto final tenga la calidad requerida en textura, color, sabor, olor, manteniendo sus propiedades organolépticas que no se vean afectadas por la velocidad de secado o la temperatura.

Adicionalmente en la cámara se implementará un sistema de adquisición de datos para realizar gráficas de temperatura vs tiempo y humedad vs tiempo para obtener las condiciones idóneas del secado sin disminuir la calidad de los granaos de cacao tipo CCN-51 y nacional.

Como resultados de esta investigación se obtendrán los balances energéticos para el producto y la cámara de secado, y las condiciones térmicas óptimas para implementar un eficiente proceso de secado en el ámbito productivo regional.

1.5. Justificación e importancia

El Ecuador ha sido un país agrícola por naturaleza y en vista que la era petrolera está por terminar, se proyecta que el sector agrícola se convertirá en una de las

principales actividades económicas en el país. En la actualidad la agricultura aporta un 8,5% al PIB, y entre los principales productos están el banano, café y cacao (CIAGP - UTN, 2017).

La producción de cacao en el Ecuador es permanente y para la obtención de granos de calidad se considera la etapa de fermentación y secado las más críticas dentro del beneficiado del cacao, dependiendo de estas las cualidades organoléptica. Si el secado del grano no se realiza de manera apropiada puede afectar la apariencia física del grano, el sabor y olor del mismo; a la vez produciendo una pérdida en la cosecha.

Según datos obtenidos de la finca “Albita” por parte de los agricultores se tiene un 30% de desperdicios de su cosecha trimestral lo que equivale aproximadamente a 20 qq. del producto final, por la carencia de conocimientos de parámetros óptimos acerca de un correcto secado.

Con el desarrollo e implementación del presente proyecto se reducirá las pérdidas del secado en un 50% de los cacaos tipo CCN-51 y nacional en los agricultores del Cantón de Buena Fe, mediante las investigaciones y pruebas que se realizarán sobre parámetros óptimos de secado para mantener las cualidades organolépticas y la calidad del secado en cada tipo de cacao.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Cacao ecuatoriano

En 1737 el naturalista sueco Carl Von Linneo nombró el árbol de cacao en Teobroma, las mismas que están conformadas por 22 especies siendo el Teobroma cacao L. el más importante (Moreno & Sánchez, 1989).

En el Ecuador los cultivos de cacao son muy importantes para el sector agrícola (tercer producto agrícola exportado) debido a que el 20% de la superficie agrícola sembrada pertenece a este producto (ESPAC, 2016). Desde el 2013 el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) está trabajando en promover la producción y competitividad, a través del “Proyecto de Reactivación de Café y Cacao Nacional Fino de Aroma”.

El cacao se utiliza como materia prima para la elaboración de chocolate, que previamente es procesado industrialmente para convertirse en manteca de cacao, licores, polvo y entre otros. El cacao ecuatoriano (ver figura 1) es considerado diferente al resto por sus características organolépticas las cuales lo convierten muy apetecido en mercados especializados por la finura de su aroma y la calidad en los granos (Anecacao, 2015).



Figura 1. Cacao ecuatoriano

2.2. Características del cacao

El cacao conocido también como cacaotero es un árbol de donde se adquieren los granos de cacao, el cual es la materia prima de varios productos, principalmente el chocolate.

2.2.1. Características Morfológicas

El cacaotero es un árbol que mide de 4 a 6 metros de altura, exceptuando el cacao nacional que en ocasiones puede alcanzar mayores alturas, dependiendo de las condiciones climáticas a la que se encuentre expuesto.



Figura 2. Cacaotero

Las mazorcas de cacao son de color rojizas o marrones y amarillas, su forma depende del tipo de cacao pueden ser; cilíndricas o esféricas con una gruesa cáscara con surcos profundos. Cada mazorca contiene entre 20 a 60 semillas (ver figura 3). Cada semilla está recubierta de una pulpa llamada “mucilago”, después del secado puede llegar a pesar hasta 1.5 gr.



Figura 3. Fruto del cacao

2.2.2. Estructura del cacao

En la tabla 1 se indica la estructuración de los granos de cacao después del proceso de secado:

Tabla 1.

Estructura de los granos de cacao

Elemento	Porcentaje [%]
Cotiledón	87.1
Cáscara	12.0
Germen	0.9
Tegumento	0

Fuente: (Gavilánez, 2001)

2.3. Tipos de cacao

Las variedades de cacao que se producen en el Ecuador son: Nacional o Arriba y CCN-51.

2.3.1. Cacao Nacional o Fino

Esta variedad se produce principalmente en las provincias de Manabí, Los Ríos y Guayas. El cacao nacional posee fragancias y sabores florales y frutales es por ello que se ha convertido en un producto emblemático del Ecuador. El principal problema de este cacao es que es frágil y susceptible a enfermedades (Anecacao, 2015).



Figura 4. Cacao nacional

Una de las características del cacao arriba es que los granos después del proceso de secado son de color dorado dándole un nombre en el mercado internacional de “Pepa de Oro” (Ministerio de Agricultura y Ganadería, 2017).

2.3.2. Cacao CCN-51

Esta variedad fue creada por el agrónomo Homero Castro, su significado es Colección Castro Naranjal y el número “51” representa al cruce de la semilla de la cual se obtuvo esta especie (NTE INEN 176, 2018). Sus principales características son la alta capacidad productiva (el cacao se cultiva a los 24 meses después del sembrío) y la resistencia a plagas. Sus propiedades organolépticas son menos finas que el cacao

sabor arriba, pero en los últimos años su calidad ha ido mejorando obteniendo algunos premios (Aprocafa, 2016).



Figura 5. Cacao CCN-51

2.4. Beneficio del cacao

Beneficiar el cacao es realizar un conjunto actividades relacionadas con la transformación física-química de las semillas de cacao (Reyes & Romero, 2000), las mismas que deben cumplir un proceso para convertirse en un producto de comercialización y de exportación, para mantener las propiedades y cualidades del cacao se debe seguir el siguiente procedimiento: Cosecha, extracción de la semillas, fermentación, secado, limpieza, selección y almacenamiento.

2.5. Cosecha de cacao

La cosecha es la recolección de las mazorcas, las mismas que deben ser seleccionadas por su color amarillento o rojizo (figura 6), según el tipo o variedad de cacao. Generalmente los períodos de cosechas se realiza cada 15 días en época invernal, en algunas ocasiones puede ser semanal debido a una alta producción y cada 30 días en verano.



Figura 6. Recolección del cacao

Para este proceso se utiliza una podadora afilada acoplada a palancas para cortar las mazorcas que se encuentran a grandes alturas y tijeras de podar o machete para las que se encuentran en las partes bajas del árbol.



Figura 7. Herramientas de cosecha

2.6. Extracción de las semillas

Las mazorcas deben ser abiertas máximo al día siguiente de la cosecha para no afectar la fermentación en las semillas afectando la calidad, estas deben ser partidas por la mitad sin lastimar las semillas, y extraídas con las manos o cuchara como se muestra en la figura 8.



Figura 8. Extracción de semillas

2.7. Fermentación

Los compuestos del sabor del chocolate se forman durante las etapas de fermentación y secado. El tiempo de fermentación es de 3 a 4 días y la remoción debe realizarse cada 24 horas (Anecacao, 2015).

En el proceso se puede observar dos etapas: la primera etapa anaeróbica en donde las levaduras convierten el almidón y azúcares del mucilago en alcohol etanol y liberan gas carbónico, en la segunda etapa con aire las bacterias acetobacter transforman el etanol en ácido acético el cual se introduce dentro de la semilla causando cambios que originan sustancias que proporcionan buen sabor y aroma al cacao.

En la tabla 2 se muestran las características que poseen los granos de cacao después de realizarles prueba de corte posterior al proceso de fermentado:

Tabla 2.
Características del grano fermentado

Características	Grano bien fermentado	Grano que le faltó fermentado	Grano sin fermentar
Forma	Hinchado	Medio aplastado	Aplanado
Color exterior del grano	Café oscuro	Amarillo claro	Blanquecino o rojizo
Cascarilla	Se retira con los dedos	No se puede desprender fácilmente	Se encuentra unida al grano

CONTINÚA 

Consistencia del grano	Se quiebra fácilmente	Se desbarata con los dedos	Es compacto y difícil de quebrar
Interior del grano	Se observa quebrado completamente	No existen quebraduras	Es un grano sólido
Color del grano	Café o marrón	Blanquecino y violeta ligero	Violeta intenso

Fuente: (Lutheran World Relief, 2013)

2.8. Secado

El proceso de secado es una etapa en la que actúa la calidad del producto para preservar el sabor y el aroma de los granos de cacao. Concluida la fermentación, el contenido de humedad es de 60% y con este proceso debe disminuir al 7% para ser almacenadas (Anecacao, 2015).

En el transcurso del secado, los granos continúan con el proceso de transformación física-química y concluye la etapa de oxidación haciendo que las semillas cambien de color violeta a marrón, si se acelera este proceso no se logra un correcto secado complicando la hidrólisis y produciendo una capa que obstaculiza la salida de ácidos volátiles haciendo ácidas las almendras (Ramos & Azócar, 2000).

Existen dos métodos para completar este proceso, los cuales son el secado natural y artificial, estos se emplean debido a su costo de implementación.

2.8.1. Secado natural

El secado natural se puede realizar en patios o pavimento. Para este secado los granos de cacao se colocan sobre plástico negro o en el piso exponiéndolos a los rayos del sol y con la acción del viento deshidrata los granos de forma lenta y paulatina, el tiempo de secado es aproximadamente de 4 a 6 días y el producto puede llegar a tener un porcentaje de humedad inferior al 8% (Anecacao, 2015).

La técnica de secado natural es realizada comúnmente por los agricultores que producen bajas cantidades de cacao. Una de las principales desventajas es que ocupa grandes extensiones de terreno y los granos se encuentran a la intemperie adquiriendo plagas.



Figura 9. Técnica de secado natural

2.8.2. Secado Artificial

Este método es utilizado en lugares donde las condiciones climáticas son desfavorables y no es factible el secado natural o en haciendas donde la producción es alta, debido a que se disminuye el espacio de secado y tiempo. En el mercado se pueden encontrar secadores directos o adiabáticos los cuales exponen las almendras a una circulación de aire caliente (ver figura 10), y los secadores no adiabáticos o indirectos la transferencia de calor se la realiza esparciendo las semillas sobre una superficie que se calienta, estos equipos se denominan por bandejas.

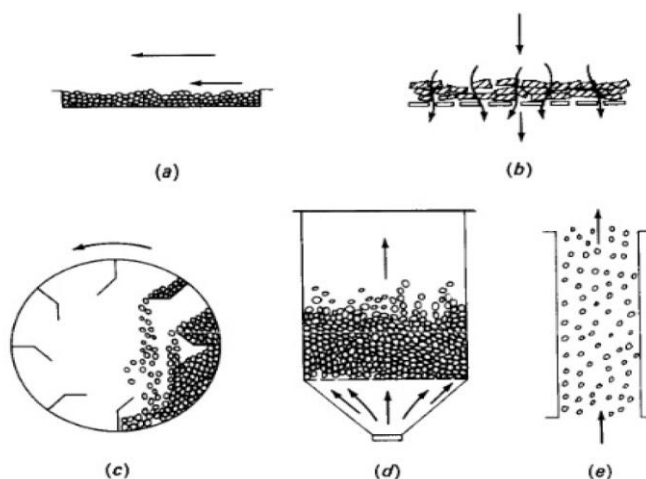


Figura 10. Secadores

Nota:(a) flujo paralelo, (b) circulación directa, (c) móvil,
(d) fluidizado, e) Flujo de gas equicorriente

Fuente: (Perry, 2000)

El empleo de este proceso da la facilidad de utilizar varias fuentes de energía y tecnologías. Entre las fuentes de energía que se pueden utilizar: Leñas, combustibles, resistencias eléctricas y ventiladores.

2.9. Limpieza y selección

En esta etapa se deben descartar almendras dañadas o elementos extraños como pequeños insectos o piedras adquiridas en etapas anteriores. En la selección se agruparán los granos de acuerdo a los estándares de calidad como color o tamaño y el tipo de cacao.

2.10. Almacenamiento

Debido a que el cacao es un producto higroscópico debe ser almacenado en un lugar libre de humedad para que no sea absorbida por los granos. El almacenamiento de las almendras secas se lo realiza en sacas de yute, estos deben estar en estantes alejados del suelo con una altura mínima de 30 cm (Ramos & Azócar, 2000), para que

no adquieran nuevamente humedad y pierdan su calidad y valor de comercialización (figura 11).



Figura 11. Almacenamiento del cacao
Fuente: (Anecacao, 2015)

2.11. Control de calidad del cacao

Los Estándares Internacionales para el control de calidad de los granos de cacao indican que estos sean fermentados, totalmente secos, sin olor a humo, sin granos partidos o incompletos, el tamaño y peso del grano, todas las industrias que utilizan el cacao como materia prima en sus productos, en especial las chocolateras exigen granos con peso mayor a 1 g. (Edson & Montero, 2016). En la tabla 3 se indican los parámetros físicos químicos de los granos de cacao después del proceso de secado según las industrias chocolateras:

Tabla 3.

Parámetro físico químicos del grano

Parámetros	Bajo	Normal	Alto
Porcentaje de cascarilla	< 11	11 a 12	> 12
Tamaño de grano (g)	< 1.05	1.05 a 1.2	> 1.2
Contenido de Humedad	6 a 6.5	7 a 8	> 8
pH	< 5.0	5.0 a 5.5	> 5.5
Sabor	Amargo	Ácido	Normal

Fuente: (Federación Nacional de Cacaoteros, Fedecacao, 2004)

En el mercado internacional el control de calidad de las semillas de cacao se dan por un sin número de factores, pero las más importantes son:

2.11.1. Características organolépticas

La calidad del cacao se basa en las características organolépticas como sabor y aromas para producir un chocolate de calidad y libres de sabores no deseados a moho, humo, tierra y acidez excesiva. El adecuado proceso de beneficio del cacao mejora las propiedades organolépticas ya que generan los procesos físicos químicos encargados de originar los compuestos precursores del sabor y aroma del chocolate.

Sabor

El cacao nacional se caracteriza por su especial aroma teniendo un sabor floral y de frutos secos frescos y el cacao CCN-51 tiene un sabor afrutado, amargo y astringente (Jiménez, 2003).

Para el control de calidad del sabor en los granos de cacao se debe procesar para convertir en licor o chocolate y luego 5 o 10 catadores degustarán para describir la identificación de los sabores básicos, específicos y adquiridos del cacao.

Tabla 4.

Sabores básicos y específicos del cacao

Sabores básicos	
Acidez	Es ácido debido a la presencia de ácidos volátiles y no volátiles. Se relaciona con vinagre y frutas cítricas
Amargo	Sabor fuerte debido a la falta de fermentación.
Sabores específicos	
Cacao	Describe un sabor típico a chocolate
Floral	Se caracteriza por un sabor agradable, similar al olor de las flores
Frutal	Presenta un sabor a fruta madura, muy agradable
Nuez	Describe un sabor a almendra o a nuez

Fuente: (Jiménez, 2003)

2.11.2. Características físicas

Las características físicas de los granos de cacao abarcan desde el tamaño del grano, nivel de fermentación, contenido de cascarilla, porcentaje de cáscara (Anecacao, 2015).

Tamaño y uniformidad de los granos

El tamaño de los granos afecta directamente al rendimiento de grasa, este parámetro y el contenido de cascarilla muestran una mayor variación en el tipo de material genético (Alvarado & Bullard, 1961).

Porcentaje de cáscara

La cascarilla de los granos de cacao debe ser retirada fácilmente sin romperse la semilla, si el porcentaje de cáscara es mayor a 12% significa que existe menor cantidad de producto comestible y baja su valor comercial (Fedecacao, 2005).



Figura 12. Cascarilla de cacao
Fuente: (Agroplus, 2014)

Los granos de cacao deben pesar más de 1 g. y cumplir con el rango que se indicó en la tabla 3, los granos pequeños poseen más cascarilla teniendo un menor contenido de grasa. Los granos correctamente fermentados y secados se reconocen por su color característico a café oscuro.

2.11.3. Características químicas

El tiempo de fermentación influye sobre las características químicas del cacao, para analizar las características químicas se considerara el porcentaje de humedad obtenido después del proceso de secado y el pH.

pH

Con la medición del pH se determina la acidez de un grano durante el proceso de fermentación, el pH del cotiledón disminuye debido a los ácidos producidos por las bacterias que se propagan al interior del grano. El pH de los granos durante el proceso de secado disminuye en el cotiledón y aumenta en la testa del grano, debido a la evaporación del agua y a la pérdida de ácidos volátiles (Nogales, Graziani, & Ortiz, 2006).

Contenido de humedad

El contenido de humedad final de granos de cacao se define como el peso del agua evaporada y se expresa como el porcentaje del peso húmedo. Al terminar el proceso de fermentación, el cacao contiene un porcentaje de humedad de aproximadamente 40 a 60 % (CacaoMovil, 2018) , que mediante el proceso de secado debe ser reducido a 7 % (NTE INEN 176, 2018) un grano con más de 8% se infestará de bacterias y existe un riesgo de crecimiento de moho, si el contenido de humedad es menor a 6,5 %, la cascara será muy frágil y los granos se romperán aumentando la proporción de granos rotos (Aguilar, 2016).

2.12. Normas de Calidad

Las normas ecuatorianas que rigen a los granos de cacao para sus diferentes calidades físicas y químicas son la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 175, 176 y 177.

Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 176 Cacao en grano – Requisitos, en la tabla 5 se indica la clasificación y los requisitos de calidad que debe cumplir el cacao en grano beneficiado y los criterios que deben aplicarse para su clasificación.

Tabla 5.

Requisitos físicos y calidad para los granos de cacao

Requisitos	Cacao Nacional			CCN-51		Método de ensayo
	ASSS	ASS	ASE	CSS	CSC	
Cien granos pesan (g)	>130	>120 - 130	100- 120	>125	100-125	Balanza
Granos fermentados, mínimo (%)	75	65	53	68	55	NTE INEN- 175
Granos violetas, máximo (%)	15	21	25	18	26	NTE INEN- 175
Granos pizarrosos, máximo (%)	9	12	18	12	15	NTE INEN- 175
Granos mohosos, máximo (%)	1	2	4	2	4	NTE INEN- 175
TOTALES (análisis sobre 100 granos), mínimo	100	100	100	100	100	-----
Granos defectuosos, máximo (%)	0	1	3	1	3	Determinada en 500 g de muestra
Material relacionado al cacao, máximo (%)	1	1	1	1	1	
Material extraño, máximo (%)	0	0		0	0	

Fuente: (NTE INEN 176, 2018)

Dónde:

ASSS: Arriba Superior Summer Selecto

ASS: Arriba Superior Selecto

ASE: Arriba Superior Época

CSS Cacao Superior Selecto

CSC: Cacao Superior Corriente

Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 177 Cacao en grano – Muestreo, esta norma establece el procedimiento para la toma de muestra del cacao en grano. Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 175 Cacao en grano – Ensayo de corte, esta norma tiene por objeto establecer el método para realizar el ensayo de corte en una muestra de cacao en grano.

2.12.1. Normas Internacionales para el Cacao

En la Oficina Internacional de Normalización (ISO), la norma ISO 2451 “Granos de cacao – especificaciones”, se define todas los requerimientos de los granos de cacao y esta se encuentran: ISO 1114 Granos de cacao – Prueba de corte, ISO 2291 Determinación del contenido de humedad, e ISO 2292 – Muestreo.

Estas normas indican que los granos de cacao deben:










- | | | |
|---|---|---|
|  Ser fermentados, y luego secados hasta que el contenido de humedad deje de superar el 7,5%, fracción de masa. |  Estar libres de toda evidencia de adulteración. |  Estar prácticamente libres de insectos vivos y otras infestaciones. |
|  Estar libres de contaminación con olores indeseados. |  Estar prácticamente libres de materia extraña. |  Estar razonablemente libres de granos rotos, fragmentos y trozos de cáscara. |
|  Estar conformes a las especificaciones para granos violáceos, típicas para el grado u origen especificado. |  Ser de un tamaño razonablemente uniforme, aptos para la producción de un alimento, y; |  Estar libres de granos aglomerados, granos aplanados, granos germinados, residuos y desechos del cribado. |

Figura 13. Normas Internacionales para el cacao

Fuente: (FCC Federation of Cocoa Commerce LTD., 2012)

2.13. Transferencia de calor

Transferencia de calor es la energía en tránsito debido a una diferencia de temperatura (Incropera & De Witt, 1999). Para disminuir el contenido de humedad en los granos de cacao ocurren dos procesos simultáneos: transferencia de calor y masa entre el contenido de humedad y el agua removida.

Existen tres tipos de transferencia de calor:

2.13.1. Conducción

Es cuando la transferencia de energía ocurre en un medio estacionario, el cual puede ser un sólido o fluido, en un gradiente de temperatura. La ecuación que rige este tipo de transferencia de calor es (Incropera & De Witt, 1999):

$$q_x'' = -k \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

Dónde:

q_x'' : Flujo de calor por conducción $\left[\frac{W}{m^2}\right]$,

K: Conductividad térmica $\left[\frac{W}{m K}\right]$,

$\frac{dT}{dx}$: Gradiente de temperatura.

2.13.2. Convección

Ocurre cuando la transferencia de calor es entre una superficie y un fluido en movimiento por diferencia de temperatura, la ecuación que rige este modo de transferencia es (Incropera & De Witt, 1999):

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \quad (2)$$

Dónde:

q'' : Flujo de calor por convección $\left[\frac{W}{m^2}\right]$,

h : Coeficiente de transferencia de calor por convección $\left[\frac{W}{m^2 K}\right]$,

T_s : Temperatura de la superficie, [$^{\circ}C$ o K],

T_{∞} : Temperatura del fluido, [$^{\circ}C$ o K].

2.13.3. Radiación

En ausencia de un medio físico, existe una transferencia de energía (emitida en forma de ondas electromagnéticas) entre dos superficies a diferentes temperaturas, y se expresa con la siguiente ecuación (Incropera & De Witt, 1999):

$$q''_{\text{rad}} = \varepsilon E_b(T_s) - \alpha G = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{\text{alr}}^4) \quad (3)$$

Dónde:

q''_{rad} : Flujo de calor por radiación $\left[\frac{W}{m^2}\right]$,

ε : Emisividad [adimensional],

$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 K^4}\right]$ constante de Stefan-Boltzmann,

E_b : Potencia emisiva superficial, $\left[\frac{W}{m^2}\right]$,

α : Absortividad $0 \leq \alpha \leq 1$,

G : Irradiación $\left[\frac{W}{m^2}\right]$,

T_s : Temperatura de la superficie [K],

T_{alr} : Temperatura de los alrededores [K].

En los secadores indirectos el modo predominante de transferencia de calor es la conducción, en secadores directos es por convección (Nonhebel & Moss, 1979). La radiación se presenta en todos los tipos de secadores.

2.14. Coeficiente global de transferencia

El coeficiente global de transferencia de calor (U_o), es la intensidad resultante de la transferencia de calor a través de una pared, este coeficiente es proporcionalmente igual al recíproco de la suma de las resistencias térmicas que influyen en un sistema (Pitts & Sissom, 1979).

Pared Plana:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{L}{K} + \frac{1}{h_o}} \quad (4)$$

Dónde:

U: Coeficiente global de transferencia $\left[\frac{W}{m^2 K} \right]$,

h_i : Coeficiente de convección interna $\left[\frac{W}{m^2 K} \right]$,

L: Longitud de la placa [m],

K: Conductividad térmica $\left[\frac{W}{m K} \right]$,

h_o : Coeficiente de convección externa $\left[\frac{W}{m^2 K} \right]$.

Pared cilíndrica:

$$U_o = \frac{1}{\frac{r_o}{r_i h_i} + \frac{r_o \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{k} + \frac{1}{h_o}} \quad (5)$$

$$U_i = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{r_i \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{k} + \frac{r_i}{r_o h_o}} \quad (6)$$

Dónde

r_i : Radio interno [m],

r_o : Radio externo [m].

Para la pared cilíndrica el (U_o) es el coeficiente para el exterior de la pared y (U_i) para el interior de la pared. Este coeficiente es utilizado para determinar el calor perdido por paredes en el sistema térmico.

$$Q_p = U * A * \Delta T \quad : \text{ Para pared plana} \quad (7)$$

$$Q_p = U_o * A_o * \Delta T = U_i * A_i * \Delta T : \text{ Para pared cilíndrica} \quad (8)$$

2.15. Transferencia de calor por convección natural

La transferencia de calor se produce debido al movimiento de energía de las moléculas internas y el movimiento global del fluido.

Existe convección natural o libre cuando el flujo es inducido bajo las fuerzas de empuje originadas por los cambios de densidad (Pitts & Sissom, 1979) y por variaciones de temperatura en el fluido (Incropera & De Witt, 1999).

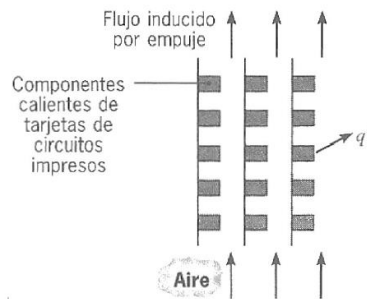


Figura 14. Transferencia por convección natural
Fuente: (Incropera & De Witt, 1999)

El problema más común de convección natural se presenta al poner en contacto una superficie plana vertical con un fluido más frío (o más caliente). La figura 15 muestra la capa límite adyacente a una superficie plana vertical caliente.

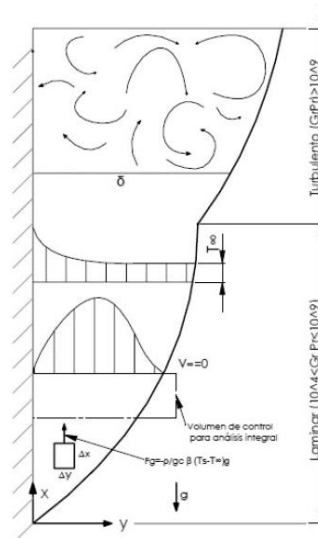


Figura 15. Capa límite en una placa plana vertical
Fuente: (Pitts & Sissom, 1979)

La convección libre en zonas cerradas es generada por superficies que se encuentren relativamente cerca a la superficie que producen las corrientes de calor que generan la convección (Pitts & Sissom, 1979).

L. B. Evans y N. E. Stefany demostraron que el calentamiento o enfriamiento inestable por convección libre en espacios cilíndricos cerrados, horizontales o verticales, se correlaciona mediante:

$$\frac{\bar{h}D}{k} = 0.55(Gr_L Pr)^{1/4} \quad (9)$$

$$Gr_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu^2} \quad (10)$$

Para determinar Gr_L y Pr , se consideran todas las propiedades constantes a la temperatura promedio de película $T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2}$

Dónde:

β : Coeficiente de expansión volumétrica [K^{-1}],

T_s : Temperatura superficial [K],

T_∞ : Temperatura del ambiente [K],

ν : Viscosidad del fluido [$\frac{m^2}{s}$],

L : Longitud de la pared [m].

2.16. Aislamiento térmico

El aislamiento térmico es un material instalado en una zona determinada de un equipo o sistema térmico para evitar pérdidas de calor por conducción con el objetivo de disminuir la transferencia de calor al ambiente u otros elementos del equipo.

En el mercado existen muchos materiales aislantes diferenciándose entre sí según su conductividad térmica.

2.16.1. Lana de roca

Este aislamiento térmico es de tipo mineral a base de roca volcánica y basalto, internamente posee aire seco y en estado estable actúa como una barrera a la transferencia de calor por su baja conductividad térmica, ver tabla 6.



Figura 16. Lana de roca
Fuente: (Aisla en verde, 2013)

Tabla 6.

Propiedades térmicas de la lana de roca

Propiedad	Valor
Conductividad térmica	0.031-0.05 $\left[\frac{W}{m K}\right]$
Densidad	70 $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
Calor específico (Cp)	840 $\left[\frac{J}{kg K}\right]$

Fuente: (Rockwool, 2016)

2.16.2. Lana de vidrio

La estructura de este aislante está formada por finas fibras de vidrio unidas por una resina térmicamente fraguada. La lana de vidrio ofrece un menor consumo energético disminuyendo los puentes térmicos, sus propiedades se describen en la tabla 7.



Figura 17. Lana de vidrio
Fuente: (Aisla en verde, 2013)

Tabla 7.*Propiedades térmicas de lana de vidrio*

Propiedad	Valor
Conductividad térmica	0.035-0.040 $\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$
Densidad	32 $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
Calor específico (Cp)	670 $\left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$

Fuente: (Atepa, s.f.)

2.17. Requerimientos energéticos

2.17.1. Condiciones del medio externo

El sistema térmico-energético operará en condiciones ambientales, las pruebas se realizarán en la ciudad de Quito, los parámetros de condiciones ambientales se detallan en la tabla 8.

Tabla 8.*Condiciones termofísicas del medio externo*

Parámetro	Valor	Unidad
Humedad Relativa, HR	76	%
Temperatura, T	22	°C
Altura, H	2.810	m
Presión, P	548	mbar

Fuente: (Atlas ambiental del Distrito Metropolitano de Quito, 2008)

2.17.2. Propiedades termofísicas del grano

Las características del grano son importantes para que no exista excesiva deshidratación y para el balance energético.

Para el cálculo de la conductividad térmica se utiliza la ecuación (Sweat, 1974):

$$k_{p_{cacao}} = 0.48 + 0.00493X_{wi} \left[\frac{W}{kg^{\circ}C}\right] \quad (11)$$

Dónde:

X_{wi} : Humedad inicial del cacao [%].

Para el cálculo del calor específico se utiliza la ecuación (Dickerson, 1968):

$$C_{p_{\text{cacao}}} = 1.657 + 0.025X_{wi} \left[\frac{\text{KJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \right] \quad (12)$$

Tabla 9.

Densidad del cacao

Tipo de cacao	Densidad [kg/m ³]
Cacao en baba	900
Cacao húmedo fermentado	775
Cacao grano seco	635

Fuente: (FAO, 2018)

2.17.3. Medición de humedad en el grano de cacao

El contenido de humedad es el porcentaje de masa de agua que contiene los granos respecto a la masa total, para realizar la medición de humedad en el grano es necesario especificar los conceptos de contenido de humedad en base seca y base húmeda.

Contenido de humedad en base húmeda se define como el cociente entre la masa de agua en los granos y la masa total.

$$X_{bh} = \frac{m_{wh}}{m_{wh} + m_s} \quad (13)$$

Dónde:

X_{bh} : Contenido de humedad en base húmeda [fracción],

m_{wh} : Masa del agua contenida en los granos [kg],

m_s : Masa seca de los granos [kg].

Contenido de humedad en base seca compara la masa de agua que contiene los granos de cacao respecto a su masa seca.

$$X_{bs} = \frac{m_{wh}}{m_s} * 100\% \quad (14)$$

Dónde:

X_{bs} : Contenido de humedad en base seca [fracción].

Finalmente en la ecuación 15 se determina el flujo másico del vapor de agua que es extraído de los granos de cacao, (Orozco & Bedoya, 2007).

$$\dot{m}_w = \frac{m_c(X_{wi} - X_{wf})}{t_{sec}} \quad (15)$$

Dónde:

\dot{m}_w : Flujo másico de vapor de agua $\left[\frac{\text{kg}}{\text{h}}\right]$,

m_c : Masa del cacao [kg],

X_{wi} : Contenido de humedad inicial [%],

X_{wf} : Contenido de humedad final [%],

t_{sec} : Tiempo de secado [h].

2.17.4. Tiempo de secado

El tiempo de secado con máquinas artificiales del cacao se reducirá con respecto al secado natural que es de 4 a 6 días, sin afectar sus propiedades organolépticas.

La ecuación para el cálculo del tiempo secado de granos a velocidad constante es (Cabe, Smith, & Harriott, 1991):

$$t_{sc} = \frac{MS}{A_{tc} * R_c} \left(X_{wi} - X_c + X_c * \ln \frac{X_c}{X_{wf}} \right) \quad (16)$$

Dónde:

t_{sc} : Tiempo de secado a velocidad constante [s],

MS: Masa de cacao seco [kg],

A_{tc} : Área total de cacao [m^2].

R_c : Velocidad de secado en período constante [kg/m^2s],

X_{wi} : Humedad inicial del cacao [%],

X_c : Humedad crítica del cacao [%],

X_{wf} : Humedad final deseada [%].

2.17.5. Humedad relativa del aire

Es una relación entre la cantidad de humedad que contiene el aire y la máxima cantidad que puede contener el aire a igual temperatura (Cengel, 1996).

$$\phi = \frac{m_v}{m_g} = \frac{P_v}{P_g} \quad (17)$$

Dónde:

ϕ : Humedad relativa [adimensional],

m_v : Masa de vapor de agua [kg],

P_v : Presión de vapor de agua [kPa].

2.17.6. Humedad Absoluta

Es la masa de vapor de agua que se encuentra presente en una masa unitaria de aire seco (Cengel, 1996), que se define por:

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} \quad (18)$$

$$\omega = 0.622 \frac{P_v}{P_a} = 0.622 \frac{P_v}{P - P_v} \quad (19)$$

Dónde:

ω : Humedad absoluta [kg de vapor/kg en aire seco],

m_a : Masa de aire seco [kg],

P_a : Presión de aire seco [kPa],

P : Presión atmosférica [kPa].

2.17.7. Velocidad de secado

La velocidad del secado del grano de cacao está relacionada con varios factores como: tamaño del grano donde la velocidad de secado es inversamente proporcional, si la temperatura del aire incrementa la velocidad de secado aumenta, la composición del cacao es otra variable que afecta a la velocidad de secado.

2.17.8. Higroscopia de los granos de cacao

Los granos de cacao son productos higroscópicos por lo que la humedad contenida en ellos está presente como agua, la misma que se presenta de tres formas, en la figura 18 se muestra los tipos de agua que tienen los granos de cacao que son:

Agua libre, esta se encuentra libremente en los poros de los granos de cacao por fuerzas capilar, la presencia de esta agua ayuda al desarrollo de hongos y bacterias. El agua libre se evapora fácilmente con un secado solar (Nonhebel & Moss, 1979).

Agua higroscópica, este tipo de agua se evapora mediante un secado artificial, pero debido a que los granos de cacao son higroscópicos, pueden rehidratarse de esta agua si se encuentran en un ambiente con un alto contenido de humedad (Nonhebel & Moss, 1979).

Agua de constitución, esta se encuentra presente en forma de OH^- o H^+ . Se forma después de procesos de combustión.

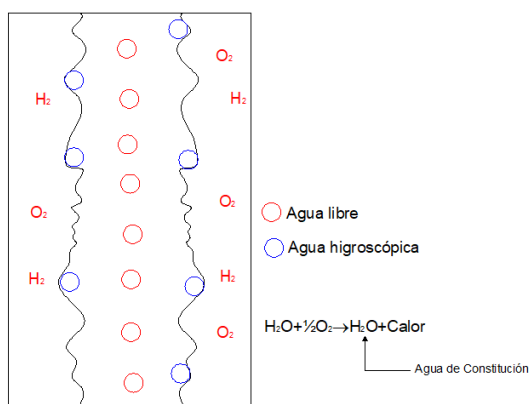


Figura 18. Tipos de agua en los granos de cacao

En la figura 19 se muestra el esquema del proceso de secado por efecto de la temperatura, en condiciones normales (CN) a temperatura ambiente y presión atmosférica internamente las moléculas de agua se encuentran entrelazadas entre sí por una fuerza (F_0), después de alterar las condiciones es decir al aumentar la temperatura ambiente a la temperatura de secado, las moléculas de agua se deforman y se empiezan a separar por fuerzas de repulsión (F_1 y F_2), este incremento de temperatura hace que el agua se desprenda de los granos de cacao por evaporación y por efectos de la gravedad condensación.

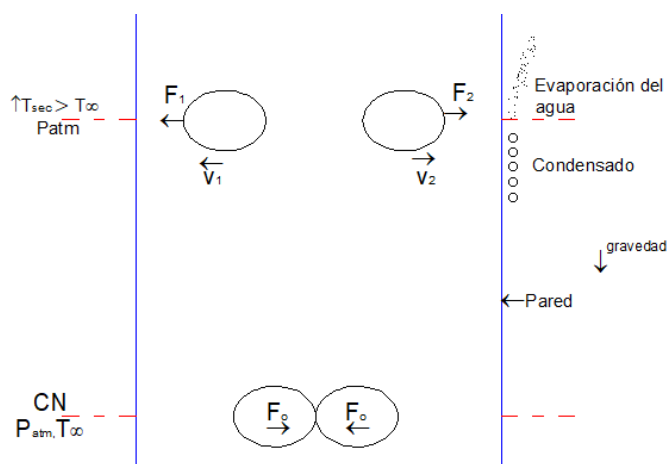


Figura 19. Fuerzas y velocidades en el proceso de secado convencional

CAPÍTULO III

3. DISEÑO DEL SISTEMA TÉRMICO-ENERGÉTICO

El objetivo de este proyecto es evaluar las condiciones óptimas de secado en los granos de cacao tipo CCN-51 y nacional mediante un sistema térmico-energético. Para la construcción del mismo se empleará la metodología de diseño de la ingeniería concurrente, este se centra en integrar simultáneamente herramientas que ayudan a facilitar el desarrollo del proyecto asegurando la calidad, (ver figura 20). La ingeniería concurrente incorpora una variedad de metodologías en relación a proyecto (Ferreyra, 2016):

- *DFM*: Diseño para la fabricación
- *DFA*: Diseño para el montaje
- *DFQ*: Diseño para la calidad
- *DFMT*: Diseño para el mantenimiento

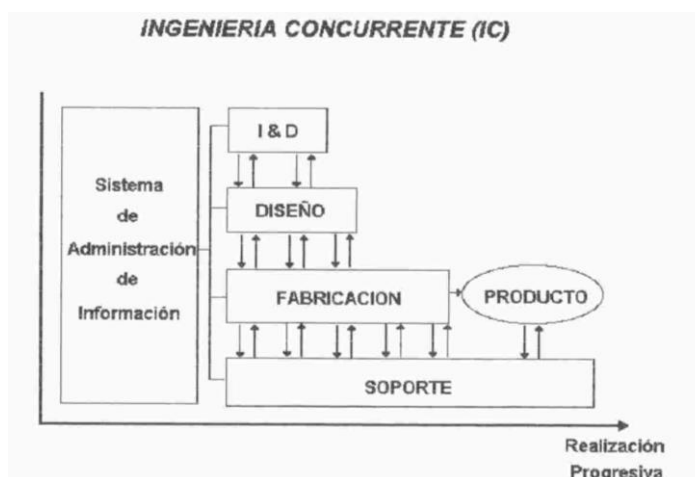


Figura 20. Ingeniería Concurrente

Fuente: (Oportus, 1995)

3.1. Cuadro de situaciones

En la figura 21 se presenta un cuadro de situaciones iniciales y finales del presente proyecto denominado “Caja negra del sistema térmico - energético para el secado de los granos de cacao”.

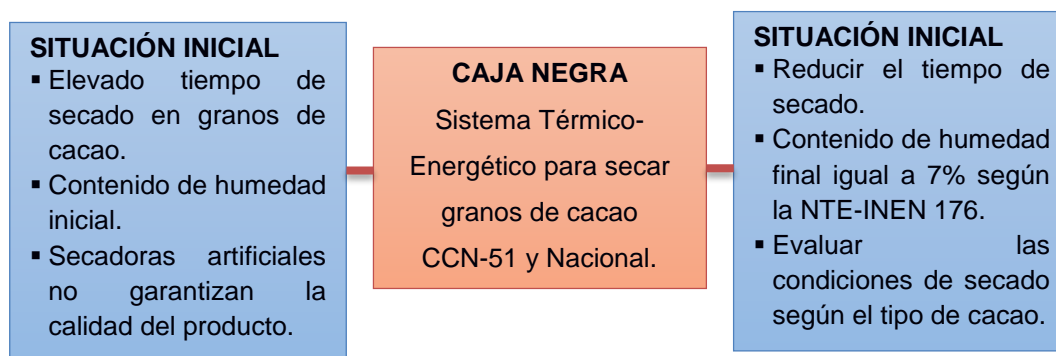


Figura 21. Cuadro de situaciones para el sistema térmico-energético

3.2. Alternativas de diseño

Para el diseño del sistema térmico-energético se considerará tres aspectos relevantes como es el tipo de secador, la forma de la cámara y el sistema de calentamiento, en la tabla 10 se presentan alternativas para realizar las pruebas de secado de los granos de cacao tipo CCN-51 y nacional, para alcanzar una temperatura de 60°C a 70°C de esa manera reducir el porcentaje de humedad de los granos a 7% como recomienda la norma NTE INEN 176 evaluando las condiciones de secado y manteniendo su calidad.

Tabla 10.
Matriz de Alternativas de Selección

Sistema	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Tipo de secador	Secador de Bandejas	Secador Rotativo	Secador al vacío
Sistema de calentamiento	Combustible (GLP)	Biomasa	Eléctrico
Forma de la cámara	Circular	Poliédrico	Rectangular

3.2.1. Propuestas de tipo de secadores

3.2.1.1. Secador de bandejas

El secador de bandejas consiste en una cámara con bandejas apiladas y se usa un ventilador para recircular aire calentado con vapor paralelamente sobre la superficie de las bandejas. También se usa calor eléctrico, sobre todo cuando el calentamiento es bajo. El 80% al 90% del aire recircula a través de la cámara, y el resto del aire que pasa sobre las bandejas es nuevo.



Figura 22. Secador de bandejas
Fuente: (Apinorte, 2015)

3.2.1.2. Secador rotativo

Esta máquina es ideal para secar granos. Consiste en un tambor rotatorio inclinado, donde se inyecta aire caliente, mediante un ducto principal que permite que el aire

caliente sea homogéneo en toda la máquina, se utiliza para grandes cosechas de cacao.



Figura 23. Secador Rotativo

Fuente: (Penagos, 2017)

3.2.1.3. Secador al vacío

Es un secador que consiste de un cilindro metálico presurizado, una bomba de vacío, en su interior consta de paletas que rotan para remoción del producto. Los granos de cacao ingresan al cilindro, la bomba de vacío empieza a succionar el aire dentro del cilindro para obtener una presión interna menor que la presión atmosférica de esa manera disminuir la temperatura de saturación del agua (Direct Industry, 2018). La caldera produce vapor para que circule dentro de las chaquetas alrededor del cilindro presurizado, para calentar la superficie y transferir el calor hacia el grano. Por último el eje con las paletas, dentro de la cámara de secado, comienzan a rotar secando de manera uniforme los granos. En la figura 24 se muestra el sistema de secador al vacío.

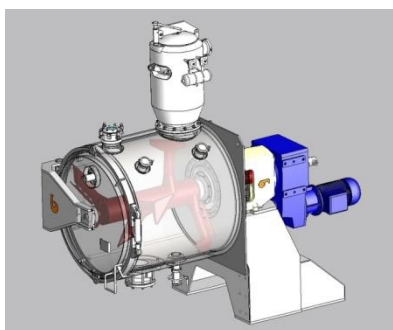


Figura 24. Secador al vacío

Fuente: (Direct Industry, 2018)

En la tabla 11 se presenta una matriz comparativa de los tipos de secador:

Tabla 11.

Matriz comparativa de tipos de secador

Aspecto	Tipos de secador		
	Secador de Bandejas	Secador Rotativo	Secador al vacío
Ventajas	Se disminuye el peso hasta su quinta parte Sistema simple para carga y descarga. Fácil funcionamiento y mantenimiento.	Gran capacidad de producción y un continuo funcionamiento. Flexibilidad en su funcionamiento, permite un secado homogéneo en todos los granos.	Deshidratación homogénea y uniforme de los granos. Se reduce los tiempos de secado. Previene oxidación que puede ocurrir en ciertos productos.
Desventajas	Se usa en pequeñas instalaciones. La eliminación del agua debe hacerse de manera que el producto no pierda sus propiedades organolépticas.	Alto costo de implementación. Disminución de la calidad de los granos por el movimiento rotatorio. Pérdida de calor, baja eficiencia térmica.	Alto costo de fabricación. Riesgo de alteración organoléptica. Consumo notable de energía.

3.2.2. Propuestas de sistemas de calentamiento

3.2.2.1. Combustible (GLP)

En el empleo del gas licuado de petróleo (GLP), requiere de un sistema de combustión, que son: válvulas, elementos de seguridad, manómetros y llaves. Entre los principales países importadores de cacao como Suiza se prohíbe el empleo de

combustibles líquidos para el secado de granos de cacao, por lo cual se utiliza intercambiadores de calor para impedir la combustión directa (Penagos, 2017), es decir la mezcla de los gases con el aire de secado dentro de la cámara.

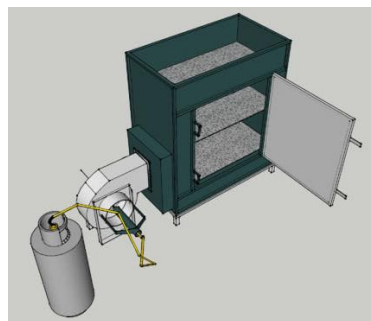


Figura 25. Secador con GLP

Fuente: (Penagos, 2017)

3.2.2.2. Biomasa

La biomasa es un combustible renovable, natural, económico y de fácil combustión, se debe trabajar la biomasa de forma indirecta como combustible para impedir que el aire permanezca impregnado de hollín, que transmite a los granos de cacao olor y gusto desagradables.

La mayoría de este tipo de hornos pueden quemar materias vegetales, como cascarilla de arroz, madera, aserrín, cáscara de maní y muchos otros.



Figura 26. Secador con combustión de biomasa

3.2.2.3. Eléctrico

Mediante las resistencias eléctricas se calentará el aire que circula dentro de la cámara, las resistencias eléctricas tienen formas espirales de diferentes diámetros, las que se calientan mediante el efecto Joule para producir la transferencia de calor a través de la radiación.



Figura 27. Secadora de cacao con resistencias eléctricas
Fuente: (Máquina Perú S.A., 2016)

Tabla 12.
Matriz comparativa de Sistema de calentamiento

Aspecto	Sistema de calentamiento			
	Alternativa	Combustible (GLP)	Biomasa	Eléctrico
Ventajas		Bajo costo, su utilización disminuyen los gastos de energía. Disminución de contaminación en los granos durante el proceso de secado. Modulación variable del quemador.	Funciona con combustibles basados en desechos naturales, incluso con basura orgánica.	Energía limpia, asegurando las propiedades organolépticas de los granos. No necesita un mantenimiento a corto plazo.
Desventajas		Mayor mantenimiento y costo de implementación. Continuo cambio del recipiente de GLP.	Generan una gran cantidad de humo lo que es perjudicial para las propiedades organolépticas.	Alta inversión en las resistencias. Bajo poder calorífico. Mayor costo en consumo eléctrico.

3.2.3. Propuestas de tipo de secadores

3.2.3.1. Cámara poliédrica

Es poco común encontrar cámaras de secadoras con esta forma, debido a su complejidad en su construcción, pero con esta forma se obtiene una mayor área de transferencia de calor haciendo que el producto reciba más radiación de diferentes puntos de las paredes de la cámara.



Figura 28. Cámara de forma poliédrica
Fuente: (Meythaler & De Guzmán, 2007)

3.2.3.2. Cámara rectangular

Para la construcción de la cámara la cantidad de acero es menor comparada con una cámara poliédrica, pero también se debe considerar que radiación incidirá sobre los granos de cacao solo de cuatro caras que forman el secador.



Figura 29. Cámara rectangular
Fuente: (Ironfort, 2016)

Tabla 13.*Matriz comparativa de la forma de la cámara*

Aspecto	Forma de la cámara		
	Alternativa	Circular	Poliédrica
Ventajas	Secador de contacto directo.	Mayor área de transferencia de calor. Los granos de cacao reciben mayor radiación.	Fácil construcción. Secado más eficiente que un secado convencional.
Desventajas	Alto costo de fabricación. Menor área de transferencia de calor.	Mayor dificultad en su construcción. Elevado costo en material.	La radiación incide desde cuatro caras del secador hacia el producto.

3.3. Matriz de decisión

Para la decisión de la mejor alternativa en el diseño, seleccionaremos los criterios de decisión y la ponderación de cada uno de ellos, con la finalidad de cumplir con los objetivos planteados en el proyecto. Estos criterios serán divididos en tres grupos: técnicos, económicos y complementarios, cada criterio de decisión tendrá un porcentaje según el rango de importancia y requerimientos en el proyecto (ver tabla 14).

3.3.1. Aspectos Técnicos

- Disponibilidad de materiales en el mercado.
- Factibilidad de fabricación.
- Factibilidad de montaje.
- Factibilidad de operación.
- Factibilidad de mantenimiento.

3.3.2. Aspectos económicos (costo)

- Fabricación.
- Montaje.

- Mantenimiento.
- Movilidad.

3.3.3. Otros complementarios

- Calidad del producto final.
- Seguridad.

Tabla 14.

Ponderación de parámetros

Parámetros	Ponderación
Aspectos Técnicos	
Disponibilidad de materiales en el mercado	15%
Factibilidad de fabricación	15%
Factibilidad de montaje	5%
Factibilidad de operación	5%
Factibilidad de mantenimiento	5%
Aspectos económicos	
Costo de fabricación	15%
Costo de montaje	5%
Costo de mantenimiento	5%
Costo de movilidad	5%
Otros aspectos	
Calidad final del producto	20%
Seguridad	5%
TOTAL	100%

En las siguientes tablas de decisión evaluaremos cada componente del sistema térmico-energético con las diferentes alternativas propuestas para su construcción.

Tabla 15.

Pautas de valoración

Pautas de Valoración	1	2	3	4	5
	Deficiente	Regular	Moderado	Aceptable	Aceptable

Tabla 16.

Matriz de decisión para el tipo de secador

Parámetros	Tipo de secador			
	%	Bandejas	Rotativo	Al vacío
Aspectos Técnicos	45%			
Disponibilidad de materiales en el mercado	15%	4	4	2
Facilidad de fabricación	15%	4	3	2
Facilidad de montaje	5%	5	3	3
Facilidad de operación	5%	3	4	3
Facilidad de mantenimiento	5%	5	3	2
Aspectos económicos	30%			
Costo de fabricación	15%	3	3	1
Costo de montaje	5%	5	3	3
Costo de mantenimiento	5%	4	3	1
Costo de movilidad	5%	4	3	3
Aspectos complementarios	25%			
Calidad final del producto	20%	4	3	5
Seguridad	5%	4	3	2
Total	100%	79%	64%	52%



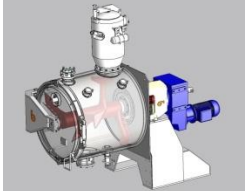
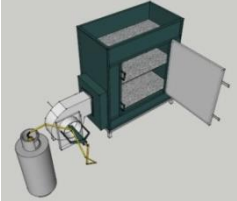





Tabla 17.

Matriz de decisión para el sistema de calentamiento

Parámetros	Sistema de calentamiento			
	%	GLP	Biomasa	Eléctrico
Aspectos Técnicos	45%			
Disponibilidad en el mercado	15%	5	4	3
Rendimiento energético	15%	4	2	3
Facilidad de implementación	5%	3	2	5
Facilidad de operación	5%	3	3	5
Facilidad de mantenimiento	5%	3	3	4
Aspectos económicos	30%			
Costo de fabricación	15%	4	2	4
Costo de montaje	5%	3	2	5
Costo de mantenimiento	5%	3	4	5
Costo de movilidad	5%	3	1	4
Aspectos complementarios	25%			
Calidad final del producto	20%	4	1	5
Seguridad	5%	2	3	4
Total	100%	75%	46%	82%

3.4. Matriz morfológica

Tabla 18.
Matriz Morfológica de selección

Sistema	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Tipo de secador	Bandejas 	Rotativo 	Al vacío 
Sistema de calentamiento	GLP 	Biomasa 	Eléctrico 
Forma de la cámara	Circular 	Poliédrica 	Rectangular 

3.4.1. Descripción del sistema térmico- energético

El sistema escogido para evaluar las condiciones óptimas de secado en cacao nacional y CCN-51 será un secador de bandejas con una cámara de forma rectangular y un sistema de calentamiento mediante resistencias eléctricas con convección natural.

Para efectuar las pruebas en el equipo se debe alcanzar una temperatura de secado promedio de 60 °C hasta 70 °C mediante las resistencias eléctricas, con el objetivo de disminuir el contenido de humedad de los granos de cacao tipo CCN-51 y nacional a 7% (NTE INEN 176, 2018), por lo que el sistema debe ser de fácil manejo y seguridad de operación, cumpliendo con todos parámetros que se establecerán en el diseño mecánico y térmico.

3.4.2. Especificaciones de diseño

Para establecer las especificaciones de diseño en el equipo se debe considerar algunas variables propias del proceso de secado de cacao, las mismas que se describen a continuación:

- Temperatura de secado.
- Temperatura y humedad del ambiente, datos propios del sitio donde opere el sistema.
- Contenido de humedad inicial del cacao.
- Contenido de humedad final del cacao.
- Tiempo de secado.
- Masa de los granos de cacao.
- Potencia de resistencias eléctricas.

3.4.3. Componentes del sistema térmico-energético

- Cámara de secado
- Bandejas para el producto
- Estructura soporte de la cámara
- Resistencias eléctricas
- Aislante térmico requerido para el proceso
- Sistema de adquisición de datos y componente electrónico

3.5. Diseño mecánico

3.5.1. Cámara del secador

Para el diseño de la cámara se utilizará acero inoxidable AISI 304 debido a su alta resistencia a la corrosión, alta resistencia a variaciones térmicas y no aporta partículas por desprendimiento evitando la contaminación de los granos de cacao (Dipac, 2016).

En el sistema térmico-energético la masa de los granos de cacao a secar será de 12 kg, para el dimensionamiento del sistema se considera el volumen de la cámara y según INCOMAQ el volumen de la cámara es igual a 4 veces el volumen del producto como se indica en la fórmula:

$$V = 4V_p \quad (20)$$

Dónde

V_p : Volumen del producto [m^3],

V : Volumen de cámara calculado [m^3].

Para calcular el volumen del producto se considera la cantidad de masa de producto húmedo que se ingresa a la cámara y la densidad.

$$V_p = \frac{MH}{\rho_{cacao}} \quad (21)$$

Dónde

MH : Masa del cacao [kg],

ρ_{cacao} : Densidad del cacao [$\frac{kg}{m^3}$].

$$V_p = \frac{12}{775}$$

$$V_p = 0.015 \text{ [m}^3\text{]}$$

Utilizando la ecuación 20 se calcula el volumen de la cámara:

$$V = 4 * 0.015$$

$$V = 0.06 \text{ [m}^3\text{]}$$

Para el dimensionamiento de la cámara se utiliza las siguientes dimensiones:

a_c : Base de la cámara 0.38 [m],

b_c : Altura de la cámara 0.42[m],

c_c : Profundidad de la cámara 0.64[m].

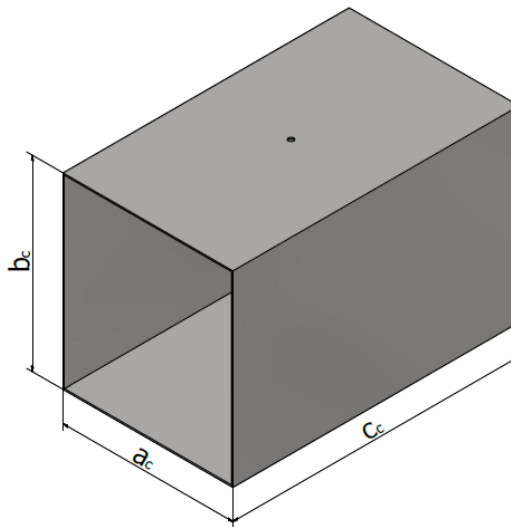


Figura 30. Dimensiones de la cámara de secado

Con las dimensiones de la cámara se calcula el volumen total de la cámara:

$$V_c = a_c * b_c * c_c \quad (22)$$

$$V_c = 0.38 * 0.42 * 0.64$$

$$V_c = 0.102 \text{ [m}^3\text{]}$$

Comparando el volumen según INCOMAQ con el volumen con las dimensiones propuestas se observa que $V_C > V$, se concluye que las dimensiones propuestas para la cámara de secado son las correctas para el diseño.

La cámara interna se formará de 5 placas de acero inoxidable AISI 304 de 2 mm de espesor, para el cálculo de la masa de la cámara se prosigue a calcular el volumen de las paredes:

$$V_{pc} = A_c * e_{inox} \quad (23)$$

Dónde:

V_{pc} : Volumen de las paredes de la cámara interna [m³],

A_c : Área lateral de las paredes de la cámara [m²],

e_{inox} : Espesor del acero inoxidable [m].

$$V_{pc} = [2(b_c * c_c) + 2(a_c * c_c) + (a_c * b_c)] * e_{inox}$$

$$V_{pc} = [2(0.42 * 0.64) + 2(0.38 * 0.64) + (0.38 * 0.42)] * 0.002$$

$$V_{pc} = 2.376 * 10^{-3} \text{ [m}^3\text{]}$$

En el cálculo de la masa se considera la densidad del acero inoxidable y el volumen de las paredes que conforman la cámara.

$$m_c = \rho_{inox} * V_{pc} \quad (24)$$

Dónde:

m_c : Masa de las placas que conforman la cámara de secado [kg],

$\rho_{inox} = 7817 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$ densidad del acero inoxidable austenítico (Pitts & Sissom, 1979).

$$m_c = 7817 * 2.376 * 10^{-3}$$

$$m_c = 18.573 \text{ [kg]}$$

3.5.2. Aislante térmico

La cámara será recubierta con aislante térmico denominado lana de vidrio para disminuir la pérdida de calor hacia el exterior, se considera un espesor de pared de 0,05 m como se indica en la figura 31.

Características Técnicas

Descripción	Espesor	Resistencia Térmica (m ² .K/W)	Resistencia Térmica (pie ² h°F/BTU)	Resistencia Térmica (m ² . h°C/kcal)
ISOAIR (NO APTO PARA TENSAR)	38	0,9	5,2	1,1
ISOAIR (NO APTO PARA TENSAR)	50	1,2	6,8	1,4

Figura 31. Características técnicas de aislante térmico: Lana de vidrio
Fuente: (Isover, 2018)

En la figura 32 se indica la conformación del acero inoxidable, aislante térmico y el acero galvanizado.

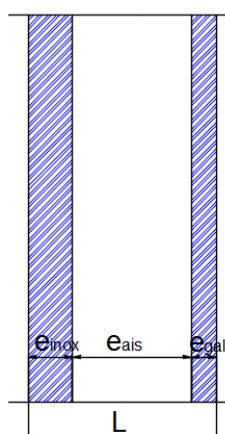


Figura 32. Conformación del sistema térmico energético

3.5.3. Cubierta de la cámara

Para la cubierta exterior de la cámara se utilizará acero galvanizado de 0.75 mm de espesor. Las dimensiones de la cubierta de la cámara son:

h_c : Altura de la cubierta de la cámara 0.522[m],

b_c : Base de la cubierta de la cámara 0.483[m],

p_c : Profundidad de la cubierta de la cámara 0.722[m].

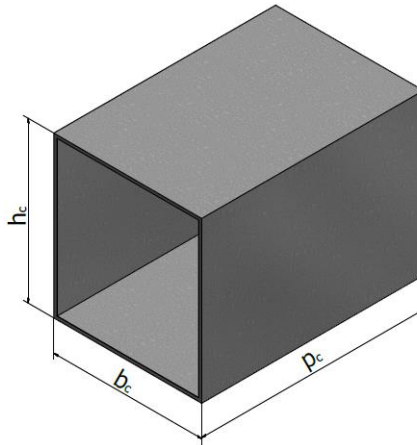


Figura 33. Cubierta de la cámara

La cubierta de la cámara está compuesta de 5 placas y para el cálculo del volumen se considera el área de la sección transversal de las placas y el espesor del material.

$$V_{cc} = A_{cc} \cdot e_{agal} \quad (25)$$

Dónde:

V_c : Volumen de la cubierta de la cámara [m^3],

A_c : Área lateral de las paredes de la cubierta de la cámara [m^2],

e_{agal} : Espesor del acero galvanizado [m].

$$V_{cc} = [2(b_c \cdot p_c) + 2(h_c \cdot p_c) + (b_c \cdot h_c)] \cdot e_{agal}$$

$$V_{cc} = [2(0.483 \cdot 0.722) + 2(0.522 \cdot 0.722) + (0.483 \cdot 0.522)] \cdot 0.00075$$

$$V_{cc} = 1.277 \cdot 10^{-3} [m^3]$$

La masa de la cubierta de la cámara se calcula con la siguiente fórmula:

$$m_{cc} = \rho_{agal} * V_{cc} \quad (26)$$

Dónde:

m_c : Masa de las placas que conforman la cubierta de la cámara [kg],

ρ_{agal} : Densidad del acero galvanizado $7850 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$ (Pitts & Sissom, 1979).

$$m_{cc} = 7850 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] * 1.277 * 10^{-3} [\text{m}^3]$$

$$m_{cc} = 10.024 [\text{kg}]$$

3.5.4. Estructura de la cámara

En la estructura de la cámara se utilizará 8 canales en U de acero inoxidable (4 canales U de 50x20x2 mm, longitud de 0.52m y 4 canales U de 50x20x2mm longitud de 0.380 m) y 4 tubos estructurales rectangulares de 40x20x2, longitud de 0.6 m

Para el cálculo del área se considera los dos tipos de canales en U que conformarán la estructura de la cámara.

$$A_{cu} = N_{cu} * b_{cu1} (h_{cu1} + h_{cu2}) \quad (27)$$

Dónde:

A_{cu} : Área del canal en U [m^2],

N_{cu} : Número de canales (4),

b_{cu1} : Base de la sección transversal del canal 0.09 [m],

h_{cu1} : Altura de la sección transversal del canal 0.52 [m],

h_{cu2} : Altura de la sección transversal del canal 0.38 [m].

$$A_{cu} = 4 * 0.09 * (0.52 + 0.38)$$

$$A_{cu} = 0.324 [\text{m}^2]$$

Para el cálculo del volumen de la estructura de la cámara se utilizará la siguiente fórmula:

$$V_{cu} = A_{cu} * e_{inox} \quad (28)$$

Dónde:

V_{cu} : Volumen de los canales en U que conforman la estructura de la cámara [m^3].

$$V_{cu} = 0.324 * 0.002$$

$$V_{cu} = 6.48 * 10^{-4} m^3$$

Para el cálculo de la masa de la cubierta:

$$m_{cu} = \rho_{inox} * V_{cu} \quad (29)$$

Dónde:

m_{cu} : Masa de los canales que conforman la estructura de la cámara [kg].

$$m_{cu} = 7817 * 6.48 * 10^{-4}$$

$$m_{cu} = 5.065 \text{ [kg]}$$

El peso del tubo estructural rectangular que conforman la estructura de la cámara se obtiene del catálogo de Dipac 1.78 kg/m y longitud de 0.60 m (Dipac, 2016).

El cálculo de la masa se realiza con la siguiente fórmula:

$$m_{tr} = N_{tr} * L * m_{trm} \quad (30)$$

Dónde:

m_{tr} : Masa del tubo estructural rectangular [kg].

N_{tr} : Número de tubos (4),

L: Longitud del tubo 0.6 [m],

m_{trm} : Masa del tubo por metro 1.78 [kg/m].

$$m_{tr} = 4 * 0.6 * 1.78$$

$$m_{tr} = 4.272 \text{ [kg]}$$

Para el cálculo de la masa de la estructura de la cámara:

$$m_{ec} = m_{cu} + m_{tr} \quad (31)$$

$$m_{ec} = 5.065 + 4.272$$

$$m_{ec} = 9.337 \text{ [kg]}$$

La estructura soporta las placas internas y externas que conforman el sistema energético, mediante un software CAD se realizó el análisis de tensión y desplazamiento, donde se aplicará una fuerza de 280.54 N considerando el peso de la cámara (18.573 kg) y de la cubierta (10.024 kg).

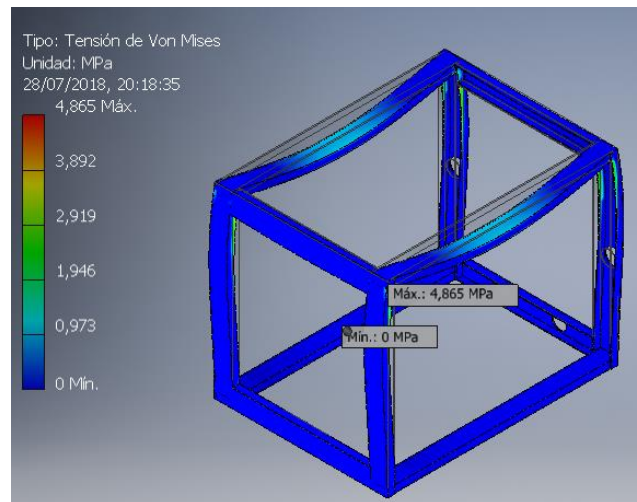


Figura 34. Esfuerzos de Von Mises de la estructura de la cámara de secado

En la figura 34 se observa que el esfuerzo máximo de Von Mises es de 4.865 MPa con un coeficiente de seguridad de 15, lo cual asegura el diseño con los materiales seleccionados para la estructura.

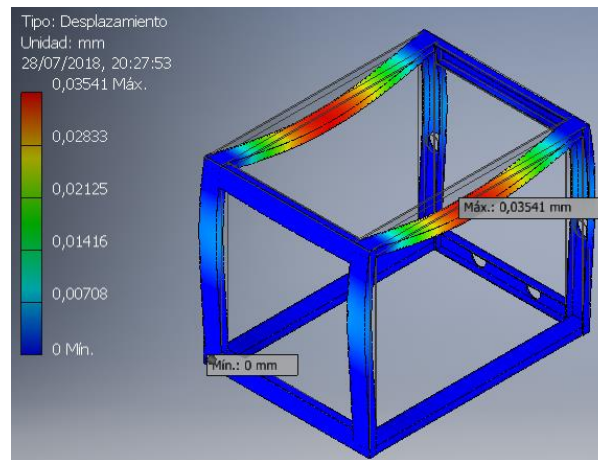


Figura 35. Desplazamientos de la estructura para la cámara

El desplazamiento máximo en la estructura es de 0.03541 mm como se observa en la figura 35, con lo cual se asegura el diseño.

3.5.5. Bandejas

Para el diseño de las bandejas se utilizará malla mesh 10 y plancha de acero inoxidable AISI 304, la masa de producto húmedo a secar es de 12 kg y se distribuirá de forma uniforme en 4 bandejas ubicando en cada bandeja de 3 [kg].

La altura del producto se calcula mediante la siguiente formula:

$$h_p = \frac{V_{pb}}{b_b p_b} \quad (32)$$

Dónde:

h_p : Alto del producto [m],

b_b : Base de la bandeja 0.30 [m],

p_b : Profundidad de la bandeja 0.60 [m],

V_{pb} : Volumen del producto por bandeja 0.0038 [m³].

$$h_p = \frac{0.0038}{0.3 * 0.6}$$

$$h_p = 0.021 \text{ [m]}$$

La bandeja se diseñará con una altura de $h_{pt}=0.03$ m, base de 0.3 m y profundidad de 0.6 m como se indica en la figura 36.

Con las dimensiones establecidas de las bandejas, se calculará el volumen de los lados laterales como se indica en la ecuación 33.

$$V_b = e(2Al_1 + 2Al_2) \quad (33)$$

Dónde:

V_b : Volumen de la bandeja [m^3],

e : Espesor de la plancha de acero inoxidable 0.0008 [m],

A_{base} : Área de la base de la bandeja [m^2],

Al_1 : Área lateral 1 de la bandeja [m^2],

Al_2 : Área lateral 2 de la bandeja [m^2].

$$V_b = 0.0008 * [2(p_b * 2 * h_{pt}) + 2(b_b * 2 * h_{pt})]$$

$$V_b = 0.0008 * [2(0.6 * 2 * 0.03) + 2(0.3 * 2 * 0.03)]$$

$$V_b = 8.64 \times 10^{-5} \text{ [m}^3\text{]}$$

La masa de la base en la bandeja se calcula considerando del catálogo de Filtra Vibración $m=3.23$ kg/ m^2 (Filtra Vibración, 2017) y las dimensiones de la malla 0.62x0.32 m, se tiene:

$$m_m = 0.64 \text{ [kg]}$$

La masa de las bandejas se calcula con el volumen de la bandeja, la densidad del acero inoxidable y la masa de la malla:

$$m_b = m_m + V_b * \rho_{inox} \quad (34)$$

Dónde:

m_b : Masa de la bandeja [kg].

m_m : Masa de la malla de acero inoxidable [kg].

$$m_b = 0.64 + 8.64 \times 10^{-5} * 7817$$

$$m_b = 1.32 \text{ [kg]}$$

Para el cálculo de la masa total de las bandejas se multiplica por el número de bandejas (4).

$$m_{tb} = 4 * 1.32$$

$$m_{tb} = 5.28 \text{ [kg]}$$

Cada bandeja soportará 3 kg de masa húmeda de cacao, el análisis se realiza mediante un software CAD para obtener resultados de esfuerzos y desplazamientos.

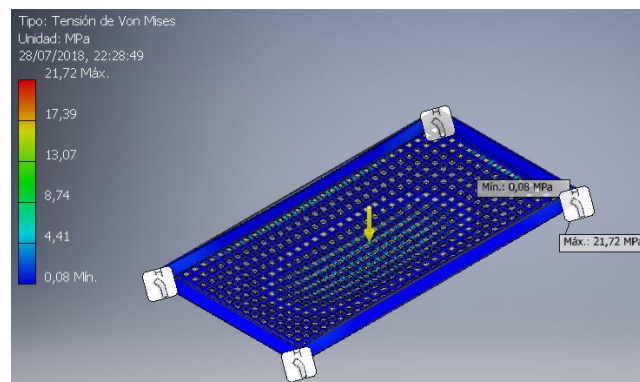


Figura 36. Esfuerzos de Von Mises de bandejas

En la figura 36 se observa que el esfuerzo máximo de Von Mises es de 21.72 MPa con un coeficiente de seguridad de mínimo de 11,51 y máximo de 15, lo cual asegura el diseño con los materiales seleccionados para las bandejas.

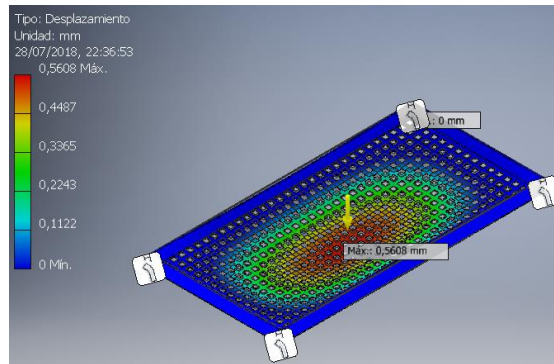


Figura 37. Desplazamientos de bandejas

El desplazamiento máximo en la estructura es de 0.5608 mm como se observa en la figura 37, con lo cual se asegura el diseño.

3.5.6. Soporte de bandejas

Para el diseño de soporte de bandejas se utilizará: perfil L de acero inoxidable AISI 304 debido a su contacto con los granos de cacao, las dimensiones del perfil son: son $a_L=50\text{mm}$, $b_L=40\text{ mm}$, 2 mm de espesor y longitud $l=0.6\text{ m}$.

En el cálculo del volumen se considera el número de perfiles, el espesor del acero inoxidable y el área del perfil.

$$V_{sb} = N * A_{sb} * e_{inox} \quad (35)$$

Dónde:

V_{sb} : Volumen del soporte [m^3],

N: Número de perfiles,

A_{sb} : Área del perfil [m^2].

$$V_{sb} = N * (a_L + b_L) * l * e_{inox}$$

$$V_{sb} = 6 * (0.05 + 0.04) * 0.6 * 0.002$$

$$V_{sb} = 6.48 * 10^{-4} [\text{m}^3]$$

Para el cálculo de la masa se utilizará la densidad del acero inoxidable y el volumen del soporte como se indica:

$$m_{sb} = \rho_{inox} * V_{pb} \quad (36)$$

Dónde:

m_{sb} : Masa del soporte [m^3].

$$m_{sb} = 7817 * 6.48 * 10^{-4}$$

$$m_{sb} = 5.065 \text{ [kg]}$$

La fuerza aplicada al soporte de bandejas es de 21.19 [N] considerando el peso de la masa húmeda (3 kg) y de cada bandeja (1.32 kg) distribuido en cada uno de los perfiles.

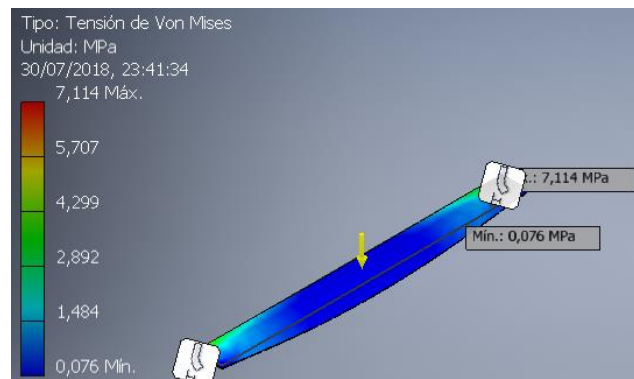


Figura 38. Esfuerzos de Von Mises del soporte de bandejas

En la figura 38 se observa que el esfuerzo máximo de Von Mises es de 7.114 MPa con un coeficiente de seguridad de 15, lo cual asegura el diseño con los materiales seleccionados para el soporte de las bandejas.

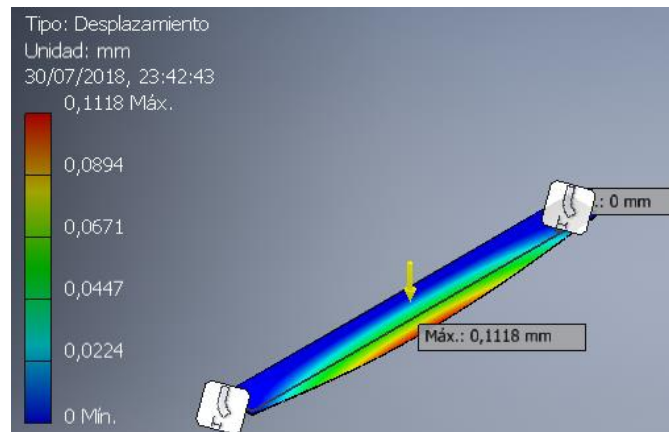


Figura 39. Desplazamientos del soporte de bandejas

En la figura 39 se muestra el desplazamiento máximo que es de 0.1118 mm, con lo cual se asegura el diseño.

3.5.7. Puerta

La puerta del sistema se realizará con una placa de acero inoxidable AISI 304 de 2 mm de espesor y estará sujeta a la cámara con bisagras de compresión, las dimensiones después del proceso de doblado son:

h_p : Altura de la puerta del sistema 0.52[m],

b_p : Base de la puerta del sistema 0.45[m],

p_p : Profundidad de la puerta del sistema 0.045[m],

a_p : Ancho de la puerta del sistema 0.043[m],

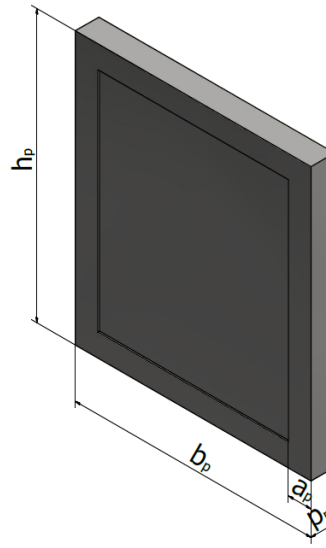


Figura 40. Puerta para el sistema

Para el cálculo de la masa de la puerta se calcula el volumen de las paredes:

$$V_p = A_p \cdot e_{inox} \quad (37)$$

Dónde:

V_p : Volumen de la puerta [m^3],

A_p : Área de las placas que conforman la puerta [m^2].

$$V_p = [h_p \cdot b_p + 2 \cdot p_p \cdot (b_p + h_p) + 2 \cdot a_p \cdot (b_p + h_p)] \cdot e_{inox}$$

$$V_p = [0.52 \cdot 0.45 + 2 \cdot 0.045 \cdot (0.45 + 0.52) + 2 \cdot 0.043 \cdot (0.45 + 0.52)] \cdot 0.002 \text{ m}$$

$$V_p = 8.094 \cdot 10^{-4} \text{ [m}^3\text{]}$$

En el cálculo de la masa se considera la densidad del acero inoxidable y el volumen de la puerta.

$$m_p = \rho_{inox} \cdot V_p \quad (38)$$

Dónde:

m_p : Masa de las placas que conforman la puerta [kg].

$$m_p = 7817 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] * 8.094 * 10^{-4} [\text{m}^3]$$

$$m_p = 6.327 [\text{kg}]$$

3.5.8. Cubierta de la puerta

La cubierta se diseñará con acero galvanizado de 0.75 mm de espesor, está compuesta de una placa de 0.542x0.612 mm, para el cálculo del volumen se utilizara el área de la placa y espesor.

$$V_{cp} = A_{cp} \cdot e_{agal}$$

Dónde:

V_{cp} : Volumen de la cubierta de la puerta [m^3],

A_{cp} : Área de la cubierta de la puerta [m^2].

$$V_{cp} = (0.542 * 0.612) * 0.00075$$

$$V_{cp} = 2,488 * 10^{-4} [\text{m}^3]$$

La masa de la cubierta de la puerta se calcula con la siguiente fórmula:

$$m_{cp} = \rho_{agal} * V_{cp}$$

Dónde:

m_c : Masa de las placas que conforman la cubierta de la puerta [kg].

$$m_{cp} = 7850 * 2,488 * 10^{-4}$$

$$m_{cp} = 1.953 [\text{kg}]$$

3.5.9. Soporte para el sistema

En base a Specification for Structural Steel Buildings ANSI/AISC 360 se determinará la sección y dimensiones de los perfiles para el diseño del soporte.

Para la estructura se utilizará tubo estructural cuadrado ASTM A-500 (ver figura 41) y perfil estructural ángulo “L” (ver figura 42).



Dimensiones			Área	Ejes X-Xe Y-Y		
A mm	Espesor mm (e)	Peso Kg/m	Área cm ²	I cm ⁴	W cm ³	i cm ³
20	1,2	0,72	0,90	0,53	0,53	0,77
20	1,5	0,88	1,05	0,58	0,58	0,74
20	2,0	1,15	1,34	0,69	0,69	0,72
25	1,2	0,90	1,14	1,08	0,87	0,97
25	1,5	1,12	1,35	1,21	0,97	0,95
25	2,0	1,47	1,74	1,48	1,18	0,92

Figura 41. Dimensiones disponible y propiedades de la sección
Fuente: (Dipac, 2016)

3.5.8.1. Propiedades de la sección- Tubo estructural cuadrado

A: Dimensión del tubo cuadrado 25 [mm],

e: Espesor de la sección 1.2[mm],

r: Radio de giro de la sección 0.97 [cm],

L_C : Longitud del tubo estructural cuadrado 80 [cm].

Propiedades del material ASTM A – 500

F_y : Tensión mínima de fluencia 317.159 [MPa],

F_u : Resistencia a tracción mínima 400[MPa].

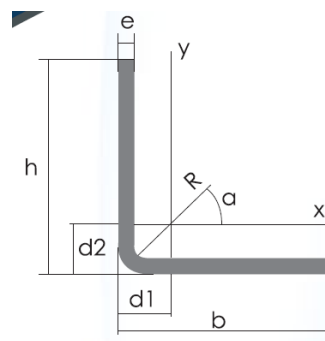


Figura 42. Perfil estructural ángulo “L”

Fuente: (Dipac, 2016)

Ángulos de alas iguales																				
Descripción	b	h	e	Masa	Área	d1	d2	Ángulo a	Eje X - X			Eje Y - Y			Eje U - U			Eje V - V		
	mm	mm	mm	Kg/m	cm ²	cm	cm	(°)	I _x	W _x	r _x	I _y	W _y	r _y	I _u	W _u	r _u	I _v	W _v	r _v
L 20x 2	20	20	2	0,57	0,73	0,60	0,60	45,00	0,28	0,20	0,62	0,28	0,20	0,62	0,46	0,32	0,79	0,10	0,14	0,37
L 20 x 3	20	20	3	0,81	1,03	0,65	0,65	45,00	0,38	0,28	0,60	0,38	0,28	0,60	0,63	0,45	0,78	0,12	0,17	0,34
L 25x 2	25	25	2	0,73	0,93	0,72	0,72	45,00	0,56	0,32	0,78	0,56	0,32	0,78	0,92	0,52	1,00	0,20	0,23	0,41
L 25x 3	25	25	3	1,05	1,33	0,78	0,78	45,00	0,78	0,45	0,77	0,78	0,45	0,77	1,30	0,74	0,99	0,26	0,30	0,45
L 30 x 2	30	30	2	0,88	1,13	0,85	0,85	45,00	1,00	0,46	0,94	1,00	0,46	0,94	1,63	0,77	1,20	0,37	0,35	0,57
L 30x 3	30	30	3	1,28	1,63	0,90	0,90	45,00	1,40	0,67	0,93	1,40	0,67	0,93	2,32	1,09	1,19	0,49	0,46	0,55

Figura 43. Dimensiones disponible y propiedades de la sección
Fuente: (Dipac, 2016)

3.5.8.2. Propiedades de la sección- perfil estructural ángulo “L”

A: Dimensión del perfil estructural ángulo “L” 25 [mm],

A_g : Área de la sección transversal del perfil estructural ángulo “L” 0.93 [cm²],

e: Espesor de la sección 2 [mm],

$r_x = r_y$: Radio de giro de la sección 0.78 [cm],

L_A : Longitud del perfil estructural ángulo “L” 48 [cm].

Propiedades del material ASTM A – 36

F_y : Tensión mínima de fluencia 248.211 [MPa],

F_u : Resistencia a tracción mínima 400[MPa].

3.5.8.3. Carga viva

La carga viva del sistema térmico energético será el peso del producto húmedo (MH) y de las bandeja (m_{tb}), considerando que las cargas estarán en movimiento al ingreso y salida del producto.

$$L = (MH + m_{tb}) * g \quad (39)$$

$$L = (12 + 5.28) * 9.81$$

$$L = 169.517 \text{ N}$$

Dónde:

L: Carga viva del sistema [N],

g: Aceleración de la gravedad $\left[\frac{m}{s^2}\right]$.

3.5.8.4. Carga permanente o muerta

Las cargas permanentes están constituidas por los pesos de todos los elementos de sistema térmico-energético que actúan en permanencia sobre la estructura (NEC-SE-CG, 2014).

$$D = (m_c + m_{cc} + m_{ec} + m_{sb} + m_p + m_{cp}) * g \quad (40)$$

Dónde:

D: Carga muerta del sistema [N].

$$D = (18.573 + 10.024 + 9.337 + 5.065 + 6.327 + 1.953) * 9.81$$

$$D = 503.047 \text{ N}$$

Cálculo de las fuerzas requeridas:

LRFD

$$P_u = 1.2 * D + 1.6 * L$$

$$P_u = 1.2 * 503.047 + 1.6 * 169.517$$

$$P_u = 0.875 \text{ [kN]}$$

ASD

$$P_a = D + L$$

$$P_a = 503.047 + 169.517$$

$$P_a = 0.673 \text{ [kN]}$$

Dónde:

P_u : Resistencia axial en compresión requerida LRFD [kN],

P_a : Resistencia axial en compresión requerida ASD [kN].

3.5.8.5. Diseño a compresión

Para una condición de rotación y traslación fijas que se encuentran

$K = 2$ Factor de longitud efectiva, (ver figura 44):

Tabla C-C.2-1
Valores de K para columnas

	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
La forma de pandeo se indica en línea de puntos						
Valores teóricos de K	0,5	0,7	1,0	1,0	2,0	2,0
Valores recomendados de proyecto para condiciones reales	0,65	0,80	1,2	1,0	2,10	2,0
Condiciones de vínculo						

Figura 44. Valores de k para columnas
Fuente: (AISC, 2010)

$$\frac{KL_c}{r} = \frac{2 * 80\text{cm}}{0.97 \text{ cm}} = 164.948 < 200 \therefore \text{Si cumple}$$

Para elementos diseñados a compresión se recomienda que la relación $\frac{KL_c}{r}$ no sea mayor a 200

3.5.8.6. Cálculo de la esbeltez

Para elementos a compresión las secciones pueden ser esbeltas y no esbeltas. Para elementos con sección no esbelta la razón ancho espesor no debe exceder los valores del parámetro limitante de esbeltez. De la tabla B4.1a de Specification for Structural Steel Buildings ANSI/AISC 360-10 (ver figura 45) se tiene:




TABLE B4.1a Width-to-Thickness Ratios: Compression Elements Members Subject to Axial Compression				
Case	Description of Element	Width-to-Thickness Ratio	Limiting Width-to-Thickness Ratio λ_r (nonslender/slender)	Examples
5	Webs of doubly-symmetric I-shaped sections and channels	h/t_w	$1.49 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	 
6	Walls of rectangular HSS and boxes of uniform thickness	b/t	$1.40 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	

Figura 45. Relación Ancho-espesor: Elementos a compresión
Fuente: (AISC, 2010)

Se escoge el caso 6 y se tiene:

$$\lambda_r = 1.4 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (41)$$

Dónde:

λ_r : Parámetro limitante de esbeltez,

E: Módulo de elasticidad del acero 200000 [MPa].

$$\lambda_r = 1.4 \sqrt{\frac{200000}{317.159}}$$

$$\lambda_r = 35.156$$

Cálculo de las relaciones de $\frac{\text{ancho [b]}}{\text{espesor [e]}}$:

$$b = A - 2 * e$$

$$b = 25 - 2 * 1.2 = 22.6 \text{ [mm]}$$

$$\frac{b}{e} = \frac{22.6}{1.2} = 18.833$$

Como $\lambda_r > \frac{b}{e}$; el elemento a compresión no es esbelto

La tensión de pandeo de flexión, se determina de la siguiente manera:

$$\text{Si } \frac{KL_c}{r} \geq 4.71 \sqrt{\frac{E}{F_y}} \therefore F_{cr} = 0.877F_e \quad (42)$$

$$164.948 \geq 4.71 \sqrt{\frac{200000}{317.159}}$$

$$164.948 \geq 118.306 \therefore \text{Si cumple con la ecuación (42)}$$

La tensión de pandeo de flexión F_{cr} se determina de acuerdo a la ecuación 43:

$$F_{cr} = 0.877F_e \quad (43)$$

La tensión de pandeo elástico F_e se determina de acuerdo a la ecuación 44:

$$F_e = \frac{\pi^2 * E}{\left(\frac{KL_c}{r}\right)^2} \quad (44)$$

Dónde:

F_e : Tensión de pandeo elástico [MPa].

$$F_e = \frac{\pi^2 * 200000}{(164.948)^2}$$

$$F_e = 72.55[\text{MPa}]$$

Una vez obtenida la tensión de pandeo se utiliza la ecuación 43 para calcular la tensión crítica:

$$F_{cr} = 0.877 * 72.55$$

$$F_{cr} = 63.626 [\text{MPa}]$$

La resistencia de compresión nominal P_n , se determina basada en el estado límite de pandeo por flexión:

$$P_n = F_{cr} * A_g \quad (45)$$

Dónde:

P_n : Resistencia de compresión nominal [kN],

A_g : Área de la sección transversal del tubo 1.14 [cm²].

$$P_n = 63.626 * 114$$

$$P_n = 7.253 \text{ [kN]}$$

La resistencia de diseño a compresión LRFD se determina de la siguiente manera:

$$\Phi_c * P_n > P_u \quad (46)$$

Dónde:

$\Phi_c = 0.9$ Factor de resistencia por compresión,

$$\Phi_c * P_n = 0.9 * 7.253$$

$$6.528 \text{ [kN]} > 0.875 \text{ [kN]} \therefore \text{Si cumple}$$

La resistencia admisible en compresión ASD se determina de la siguiente manera:

$$\frac{P_n}{\Omega_c} > P_a \quad (47)$$

$\Omega_c = 1.67$ Factor de seguridad por compresión,

$$\frac{7.253}{1.67} > P_a$$

$$4.343 \text{ [kN]} > 0.673 \text{ [kN]} \therefore \text{Si cumple}$$

En los dos casos (LRFD y ASD) las resistencias de diseño en compresión son mayores a las resistencias requeridas, con lo que se asegura el diseño del soporte del sistema.

La fuerza aplicada al soporte del sistema es de 673 [N], para el análisis de la estructura se simulará en un software CAD para obtener esfuerzos y desplazamientos.

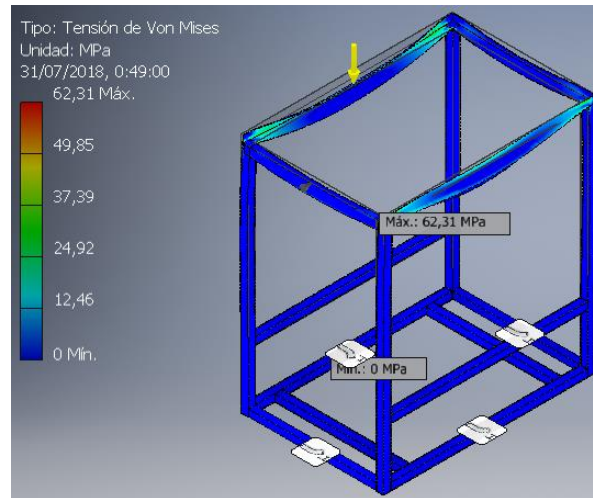


Figura 46. Esfuerzos de Von Mises del soporte para el sistema

En la figura 46 se observa que el esfuerzo máximo de Von Mises es de 62.31 MPa con un coeficiente de seguridad de máximo de 15 y mínimo de 3.32, lo cual asegura el diseño con los materiales seleccionados para el soporte del sistema.

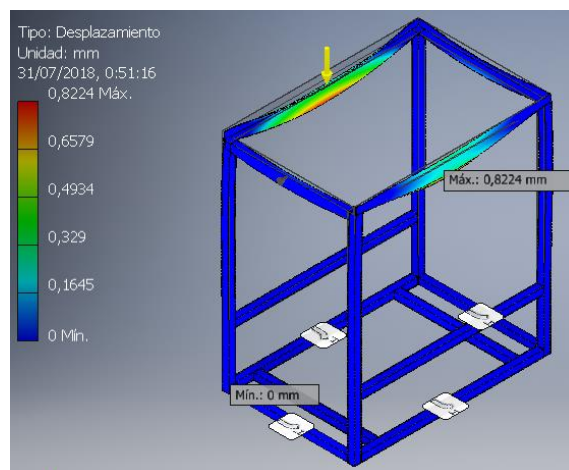


Figura 47. Desplazamientos del soporte para el sistema

En la figura 47 se muestra el desplazamiento máximo que es de 0.8224 mm, con lo que se asegura el diseño.

3.6. Diseño térmico

3.6.1. Condiciones psicrométricas del ambiente

Para determinar la densidad de aire de secado (ρ_{airsec}), utilizamos los datos descritos en la tabla 8. Condiciones termofísicas del medio externo, mediante estas variables iniciales, se determinará las variables psicrométricas del aire donde opera el sistema térmico-energético. Para efectuar este cálculo se utilizará un programa informático ingenieril de cálculos psicrométricos, en el que se debe ingresar la altitud en [msnm] igual a 2810, en la figura 48 se muestra la carta psicrométrica para este cálculo a una presión atmosférica de 71.819 kPa:

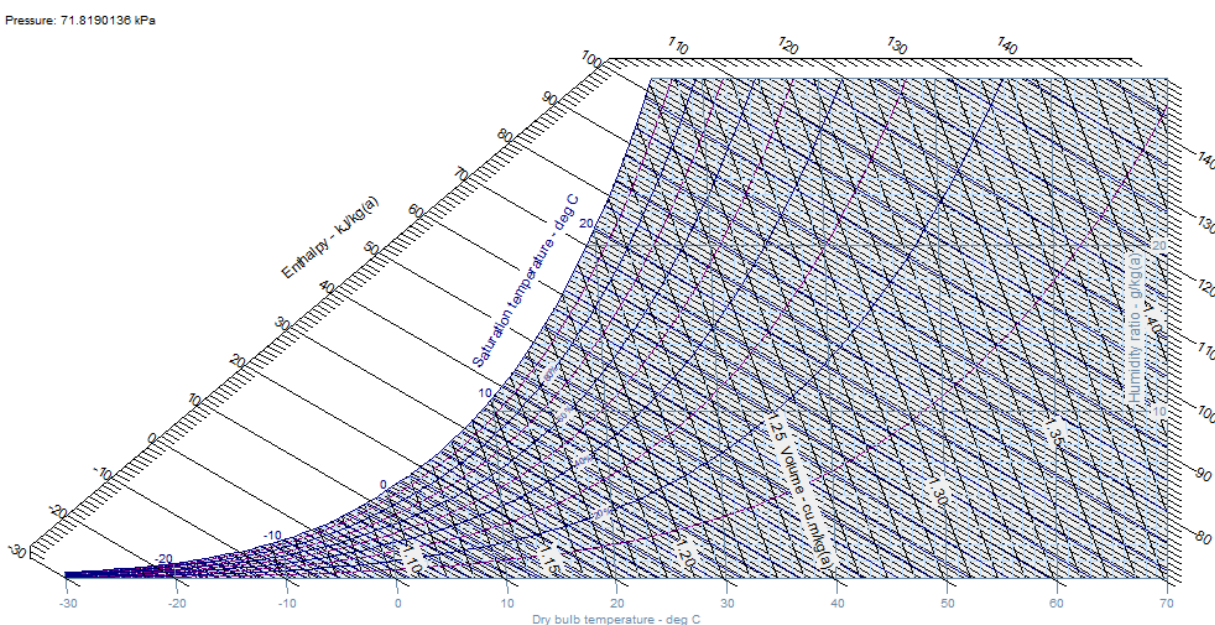


Figura 48. Carta psicrométrica del sistema térmico-energético

En la tabla 19 se muestra los resultados del cálculo psicrométrico para las variables iniciales del aire en la ciudad de Quito.

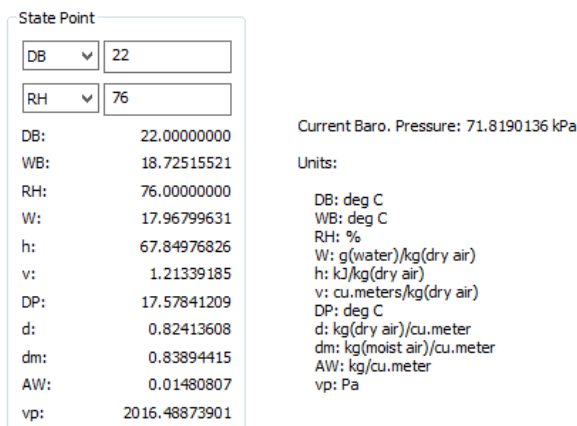


Figura 49. Propiedades psicrométricas del ambiente

Tabla 19.
Resultados psicrométricos del aire en el ambiente

Propiedad	Valor	Unidad
Presión atmosférica	71.819	[kPa]
Temperatura del aire	22	[°C]
Humedad relativa	76	[%]
Humedad específica	0.01796	$\left[\frac{\text{kg}_{\text{agua}}}{\text{kg}_{\text{aire seco}}} \right]$
Volumen específico	1.213	$\left[\frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right]$
Entalpía	67.85	$\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$
Temperatura de bulbo húmedo	18.72	[°C]
Temperatura de rocío	17.58	[°C]

En calentamientos simples donde no existe proceso de humidificación o deshumidificación, se determina que la humedad absoluta del ambiente es igual a la humedad absoluta del aire de secado (Corvalan, Horn, Roman, & Saravia, 2000). Iniciando de esto se tiene que la humedad absoluta o específica del aire de secado es igual a $0.01796 \left[\frac{\text{kg}_{\text{agua}}}{\text{kg}_{\text{aire seco}}} \right]$, y una presión atmosférica de 71.81 [kPa]. En el interior de la cámara el aire de secado se encontrará a 70 °C y la superficie inferior a 90 °C, así que

para determinar las propiedades del aire al interior de la cámara se utilizará la temperatura de película que es el promedio de la suma de las temperaturas anteriores igual a 80 °C, en la tabla 20 se muestra los resultados del cálculo psicrométrico.

Tabla 20.

Resultados psicrométricos del aire de secado en la cámara

Propiedad	Valor	Unidad
Presión atmosférica	71.819	[kPa]
Temperatura del aire	80	[°C]
Humedad relativa	6.4338	[%]
Humedad específica	0.01796	$\left[\frac{\text{kg}_{\text{agua}}}{\text{kg}_{\text{aire seco}}} \right]$
Volumen específico	1.411	$\left[\frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right]$
Entalpía	117.783	$\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$
Temperatura de bulbo húmedo	28.47	[°C]
Temperatura de rocío	17.58	[°C]

3.6.2. Contenido de humedad inicial

Los granos de cacao están rodeados por una pulpa mucilaginosa, de color blanco que pueden ser dulces o amargas, y estas poseen un contenido de humedad puede variar desde 40% al 60% en su base húmeda, (Ospina, 2001). Para el diseño se tomará el mayor valor del contenido de humedad.

$$X_{wi} = 60\%$$

A partir de este dato se iniciará con los cálculos térmicos que ocurren en el sistema térmico-energético y la transferencia de energía en los granos de cacao durante el proceso de secado.

3.6.3. Masa seca del cacao

Utilizando los datos obtenidos del contenido de humedad y masa inicial de los granos de cacao o masa húmeda, en la ecuación 48 se determina la masa seca que se obtiene al final del proceso de secado.

$$MS = MH \left(\frac{100 - X_{wi}}{100} \right) \quad (48)$$

$$MS = 12 \text{ kg} \left(\frac{100 - 60}{100} \right)$$

$$MS = 4.8 \text{ [kg]}$$

3.6.4. Cantidad de agua a remover

Según la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 176 indica que el contenido de humedad final para granos de cacao debe ser de 7%, para lo cual en la ecuación 49 expresa la cantidad de agua a remover (ΔW) o agua de remoción del producto.

$$\Delta W = MS \left(\frac{X_{wi}}{100 - X_{wi}} - \frac{X_{wf}}{100 - X_{wf}} \right) \quad (49)$$

$$\Delta W = 4.8 \left(\frac{60}{100 - 60} - \frac{7}{100 - 7} \right)$$

$$\Delta W = 6.839 \text{ [kg]}$$

3.6.5. Tiempo de secado

Para determinar el tiempo de secado de los granos de cacao se determinará mediante el tiempo de secado de granos a velocidad constante.

Si la velocidad del aire de secado (V_{sec}) es de 0.5 m/s, determinamos la velocidad másica del aire de secado (G_v):

$$G_v = V_{\text{sec}} * 3600 * \rho_{\text{airsec}} \quad (50)$$

Con los valores obtenidos del aire de secado en la tabla 20, calculamos la densidad de aire de secado que es igual a:

$$\rho_{\text{airsec}} = \frac{1}{V_{\text{esp}}} = \frac{1}{1.411}$$

$$\rho_{\text{airsec}} = 0.709 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

Reemplazando valores en la velocidad másica del aire de secado (G_v):

$$G_v = V_{\text{sec}} * 3600 * \rho_{\text{airsec}}$$

$$G_v = 0.5 * 3600 * 0.709$$

$$G_v = 1276.2 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}} \right]$$

El área de secado (A_{tc}), que es igual a la superficie de los granos de cacao que están en contacto con flujo de secado es:

$$A_{\text{tc}} = \frac{MH}{\rho_{\text{cacao}} h_b} \quad (51)$$

$$A_{\text{tc}} = \frac{12}{775 * 0.03}$$

$$A_{\text{tc}} = 0.516 \text{ [m}^2\text{]}$$

Dónde:

$$\rho_{\text{cacao}} = 775 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \text{ densidad aparente del cacao,}$$

h_b : Altura de la bandeja.

Si el flujo de aire es paralelo a las bandejas, el coeficiente por convección (h_c) es igual a:

$$h_c = (0.0735 * G_v)^{0.8} \quad (52)$$

$$h_c = (0.0735 * 1177.92)^{0.8}$$

$$h_c = 37.812 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}} \right]$$

La velocidad de secado (R_c) a período constante es igual:

$$R_c = h_c * \frac{T_{\text{sec}} - T_{\text{gcacao}}}{h_{\text{fg}}} \quad (53)$$

$$R_c = 37.812 * \frac{70 - 22}{2333}$$

$$R_c = 0.778 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}} \right]$$

Dónde:

T_{gcacao} : Temperatura de los granos de cacao [$^{\circ}\text{C}$],

$h_{\text{fg}} = 2333 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$ Calor latente de vaporación del agua (Cengel, 1996).

Para el cálculo del tiempo de secado de los granos de cacao se utiliza la ecuación 16 donde la humedad crítica del cacao depende según la temperatura de secado para 70°C la humedad crítica es igual a 31% (Oke & Omotayo, 2012):

$$t_{\text{sc}} = \frac{MS}{A_{\text{tc}} * R_c} \left(X_{\text{wi}} - X_c + X_c * \ln \frac{X_c}{X_{\text{wf}}} \right)$$

$$t_{\text{sc}} = \frac{4.8}{0.516 * 0.778} \left[60 - 31 + 31 \ln \left(\frac{31}{7} \right) \right]$$

$$t_{\text{sc}} = 8.981 \text{ [h]}$$

3.6.6. Calor útil de secado

Para determinar el calor útil necesario para el proceso de secado de los granos de cacao (Ver figura 50), se emplea la siguiente formulación:

$$Q_{\text{útil}} = Q_{\text{Scacao}} + Q_{\text{SH}_2\text{O}} + Q_{\text{LH}_2\text{O}} + Q_{\text{Sbandejas}} \quad (54)$$

Donde

$Q_{\text{útil}}$: Calor útil de secado [kJ],

Q_{Scacao} : Calor sensible para el cacao [kJ],

$Q_{\text{SH}_2\text{O}}$: Calor sensible de agua [kJ],

$Q_{\text{LH}_2\text{O}}$: Calor latente de agua [kJ],

$Q_{\text{Sbandejas}}$: Calor sensible de las bandejas [kJ].

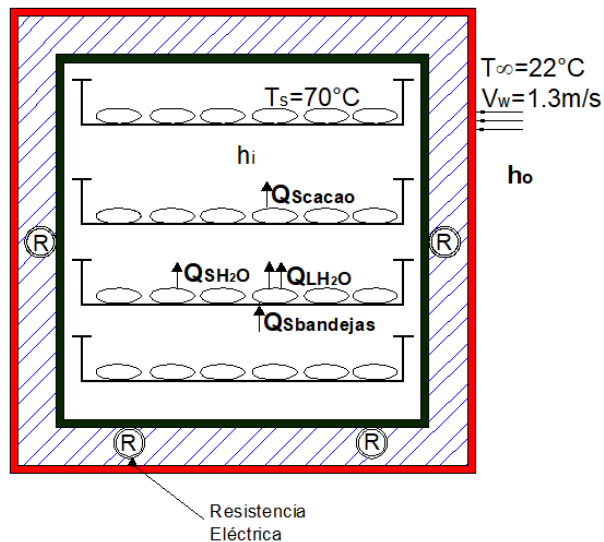


Figura 50. Esquema del calor útil en la cámara de secado

3.6.6.1. Calor sensible para el cacao

Es el calor necesario recibido por los granos de cacao para elevar su temperatura, este calor se determina usando la siguiente ecuación:

$$Q_{Scacao} = MS * cp_{cacao} * (T_{sec} - T_{\infty}) \quad (55)$$

Para calcular el calor específico de los granos de cacao se utiliza la ecuación 12:

$$cp_{cacao} = 1.657 + 0.025X_{wi}$$

$$cp_{cacao} = 1.657 + 0.025(60)$$

$$cp_{cacao} = 3.157 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}^{\circ}\text{C}} \right]$$

Por lo tanto el calor sensible para el cacao es:

$$Q_{Scacao} = MS * Cp_{cacao} * (T_{sec} - T_{gcacao})$$

$$Q_{Scacao} = 4.8 * 3.157 * (70 - 22)$$

$$Q_{Scacao} = 727.373 \text{ [kJ]}$$

3.6.6.2. Calor sensible de agua

Para determinar el calor sensible del agua se utiliza la siguiente expresión:

$$Q_{SH_2O} = \Delta W * Cp_{H_2O} * (T_{sec} - T_{\infty}) \quad (56)$$

El calor específico del agua (cp_{H_2O}) varía dependiendo la temperatura instantánea, por lo que se calcula la temperatura promedio (\bar{T}) del proceso de secado:

$$\bar{T} = \frac{T_{sec} + T_{gcacao}}{2} \quad (57)$$

$$\bar{T} = \frac{70 + 22}{2}$$

$$\bar{T} = 46[{}^{\circ}\text{C}] = 319 \text{ [K]}$$

Por lo tanto el calor específico del agua a la temperatura promedio igual a 319 K (Cengel, 1996) es de:

$$cp_{H_2O} = 4.580 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \right]$$

Reemplazando en la ecuación de calor sensible del agua resulta:

$$Q_{SH_2O} = \Delta W * C_{p_{H_2O}} * (T_{sec} - T_{\infty})$$

$$Q_{SH_2O} = 6.839 * 4.180 * (70 - 22)$$

$$Q_{SH_2O} = 1372.177 [kJ]$$

3.6.6.3. Calor latente de agua

Es la cantidad de calor que se necesita para que el agua contenida en los granos de cacao se evapore, es decir cambie de fase líquida a vapor.

$$Q_{LH_2O} = \Delta W * h_{fg} \quad (58)$$

El calor latente de vaporación del agua (h_{fg}) se determinó en cálculos anteriores y es igual a $2333 \frac{[kJ]}{[kg]}$:

$$Q_{LH_2O} = \Delta W * h_{fg}$$

$$Q_{LH_2O} = 6.839 * 2333$$

$$Q_{LH_2O} = 15955.387 [kJ]$$

3.6.6.4. Calor sensible de las bandejas

Las bandejas colocadas dentro de la cámara de secado son afectadas por los cambios de temperatura, generando un calor sensible que se transmite a los granos de cacao, para determinar el calor se utiliza la expresión:

$$Q_{Sbandejas} = n_{bandejas} * m_{bandejas} * C_{p_{inox}} * (T_{sec} - T_{gcacao}) \quad (59)$$

$$Q_{Sbandejas} = 4 * 1.32 * 0.5 * (70 - 22)$$

$$Q_{Sbandejas} = 126.720 [kJ]$$

$n_{bandejas}$: Número de bandejas (4),

$m_{\text{bandejas}} = 1.32[\text{kg}]$ masa de cada bandeja,

$cp_{\text{inox}} = 0.5 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \right]$ calor específico del acero inoxidable (Pitts & Sissom, 1979).

Reemplazando el resultado de los calores calculados anteriormente en la ecuación 54, determinamos el calor útil del proceso de secado.

$$Q_{\text{útil}} = Q_{\text{Scacao}} + Q_{\text{SH}_2\text{O}} + Q_{\text{LH}_2\text{O}} + Q_{\text{Sbandejas}}$$

$$Q_{\text{útil}} = 727.373 + 1372.177 + 15955.387 + 126.720$$

$$Q_{\text{útil}} = 18181.657 [\text{kJ}]$$

Finalmente para determinar la potencia térmica útil (Q_u) se la obtiene de:

$$Q_u = \frac{Q_{\text{útil}}}{t_{\text{sec}}} \quad (60)$$

$$Q_u = \frac{18181.657 [\text{kJ}]}{9 * 3600}$$

$$Q_u = 0.561[\text{kW}]$$

$$Q_u = 561[\text{W}]$$

3.6.7. Coeficiente global de transferencia de calor

El coeficiente global de transferencia de calor (U_o), se utiliza para calcular el calor perdido en paredes de la cámara de secado por conducción. En la figura 51 se presenta un esquema de los componentes que conforman la pared del sistema y mediante estos determinar el coeficiente global de transferencia.

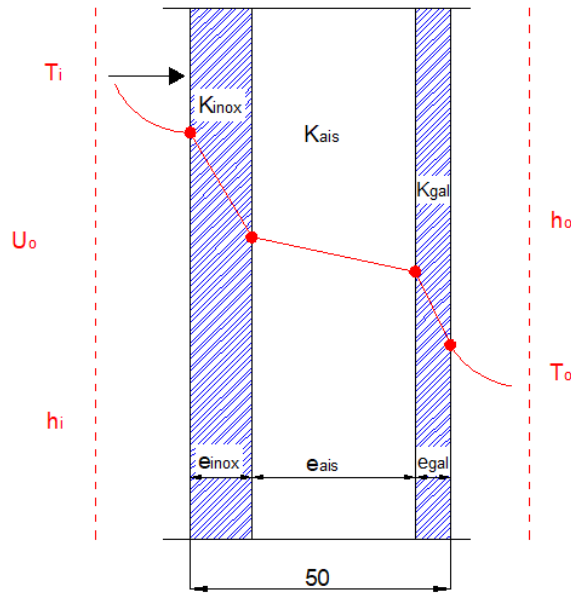


Figura 51. Esquema de la pared del secador

Para el cálculo del coeficiente global de transferencia de calor (U_o), se utiliza la siguiente expresión:

$$U_o = \frac{1}{\frac{1}{h_i + h_r} + \frac{e_{inox}}{k_{inox}} + \frac{e_{ais}}{k_{ais}} + \frac{e_{agal}}{k_{agal}} + \frac{1}{h_o}} \left[\frac{W}{m^2 K} \right] \quad (61)$$

Dónde:

h_i : Coeficiente de convección interna $\left[\frac{W}{m^2 K} \right]$,

h_r : Coeficiente de radiación interna $\left[\frac{W}{m^2 K} \right]$,

h_o : Coeficiente de convección externa $\left[\frac{W}{m^2 K} \right]$,

e_{inox} : Espesor del acero inoxidable [m],

e_{ais} : Espesor de aislamiento térmico [m],

e_{agal} : Espesor del acero galvanizado [m],

k_{inox} : Conductividad térmica del acero inoxidable $\left[\frac{W}{m K}\right]$,

k_{ais} : Conductividad térmica del aislamiento térmico $\left[\frac{W}{m K}\right]$,

k_{agal} : Conductividad térmica del acero galvanizado $\left[\frac{W}{m K}\right]$.

En donde los valores de cada elemento a emplear en el sistema térmico energético son:

1) *Material:* Acero Inoxidable,

Espesor: 0.002[m],

Conductividad térmica: $16.3 \left[\frac{W}{m K}\right]$.

2) *Material:* Lana de vidrio,

Espesor: 0.04725[m],

Conductividad térmica: $0.0377 \left[\frac{W}{m K}\right]$.

3) *Material:* Acero Galvanizado,

Espesor: 0.00075[m],

Conductividad térmica: $52.34 \left[\frac{W}{m K}\right]$.

Los valores de la conductividad térmica de los diferentes materiales fueron tomados de la tabla de propiedades de los metales y no metales (Pitts & Sissom, 1979).

3.6.7.1. Coeficiente de convección interna

Para determinar este coeficiente de convección interna (h_i) consideramos que en el interior de la cámara de secado ocurre el fenómeno de convección natural o libre, debido a que el fluido se desplaza bajo la influencia de las fuerzas de empuje originadas por los cambios de densidad (Pitts & Sissom, 1979). En la figura 52 se

observa un esquema de la cámara de secado, donde la placa inferior está a mayor temperatura que la placa superior, y es representado por el número de Grashof (Gr) que es proporcional al cociente entre las fuerzas de empuje y las fuerzas viscosas.

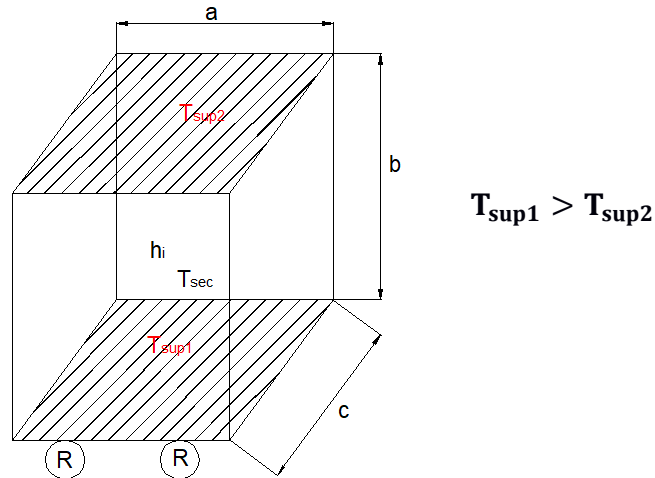


Figura 52. Esquema de la cámara de secado

$$Gr_b = \frac{g\beta(T_{sup} - T_{sec})b^3}{\nu^2} \quad (62)$$

$$\beta = \frac{1}{T_{sec}}$$

Dónde:

g : Aceleración de la gravedad $\left[\frac{m}{s^2}\right]$,

β : Coeficiente de expansión volumétrica $\left[\frac{1}{^\circ C}\right]$,

T_{sup} : Temperatura de la superficie inferior $[^\circ C]$,

T_{sec} : Temperatura de secado $[^\circ C]$,

b : Longitud característica, distancia entre superficie 1 y 2 (figura 52) [m],

ν : Viscosidad cinemática $\left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}}\right]$ a una temperatura de secado igual a 70 °C es de $1.995 \times 10^{-5} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}}\right]$ (Cengel, 1996).

$$\beta = \frac{1}{T_{\text{sec}}}$$

$$\beta = \frac{1}{70}$$

$$\beta = 0.0143 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$\text{Gr}_b = \frac{g\beta(T_{\text{sup}} - T_{\text{sec}})b^3}{\nu^2}$$

$$\text{Gr}_b = \frac{9.81 * 0.0143(90 - 70)(0.42)^3}{(1.995 \times 10^{-5})^2}$$

$$\text{Gr}_b = 5.222 \times 10^8$$

En la cámara de secado la placa inferior está más caliente produciendo una condición inestable y ocurre convección, debido a que el número de Grashof es $\text{Gr}_b > 10^4$ la convección es predominante (Pitts & Sissom, 1979). El menor intervalo para la ecuación 63, corresponde a un proceso ordenado, en el que el fluido circula en pequeñas celdas hexagonales, llamadas celdas de Benard ver figura 53, la misma que sube por el centro de cada celda y desciende por su contorno (Pitts & Sissom, 1979).

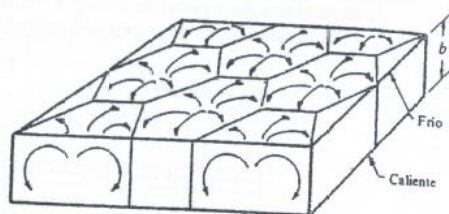


Figura 53. Celdas de Benard

Fuente: (Pitts & Sissom, 1979)

$$\overline{Nu}_b = (0.195)Gr_b^{1/4} \quad (63)$$

$$\text{Si } 10^4 < Gr_b < 4 \times 10^5$$

$$\overline{Nu}_b = (0.068)Gr_b^{1/3} \quad (64)$$

$$\text{Si } Gr_b > 4 \times 10^5$$

Como el número de Grashof es mayor a 4×10^5 , para determinar el número de Nusselt (\overline{Nu}_b) se utiliza la ecuación 64.

$$\overline{Nu}_b = (0.068)(5.222 \times 10^8)^{1/3}$$

$$\overline{Nu}_b = 54.761$$

3.6.7.2. Diámetro hidráulico

Este término se utiliza cuando el fluido (aire) fluye por un conducto que tiene sección diferente a la circular, en este caso la forma de la cámara de secado es rectangular. Para calcularlo se debe determinar el área y perímetro de convección.

$$D_H = \frac{4 A_H}{P_H}$$

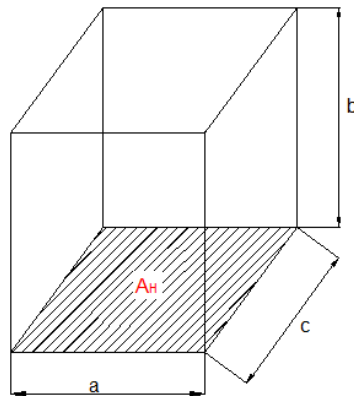


Figura 54. Diámetro hidráulico

Reemplazando se tiene:

$$D_H = \frac{4 a c}{2(a + c)}$$

$$D_H = \frac{2 a c}{a + c}$$

$$D_H = \frac{2 * 0.38 * 0.64}{0.38 + 0.64}$$

$$D_H = 0.477 \text{ [m]}$$

Según la ecuación de Evans y Stefany, demostraron que el calentamiento o enfriamiento inestable por convección libre en espacios cilíndricos cerrados, se correlaciona mediante:

$$\overline{Nu_b} = \frac{h_i D_H}{k_{air}} = (0.55)(Gr_b * Pr)^{\frac{1}{4}} \quad (65)$$

$$\text{Si } 0.75 < \frac{b}{D_H} < 2.0$$

$$\frac{b}{D_H} = \frac{0.42 \text{ m}}{0.477 \text{ m}} = 0.882 \quad \therefore \text{ si cumple}$$

La conductividad térmica del aire (k_{air}) a 70 °C es de $0.02948 \left[\frac{W}{m K} \right]$, y el número de Prandtl (Pr) es de 0.6985, según la tabla de propiedades de los gases a la presión atmosférica (Pitts & Sissom, 1979).

Reemplazando se tiene:

$$\overline{Nu_b} = \frac{h_i D_H}{k_{air}} = (0.55)(Gr_b * Pr)^{\frac{1}{4}}$$

$$\frac{h_i * 0.477}{0.02948} = (0.55)(5.222 \times 10^8 * 0.6985)^{\frac{1}{4}}$$

$$h_i = 4.698 \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$$

3.6.7.3. Coeficiente de radiación interna

Para determinar la radiación interna en el sistema térmico energético se emplea la fórmula general:

$$h_{\text{rad}} = 4 * \varepsilon_{\text{inox}} * \sigma * T_m^3$$

Dónde:

$\varepsilon = 0.40$ Emisividad del acero inoxidable (Wilson, 1985),

$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4} \right]$ Constante de Stefan-Boltzmann,

T_m : Temperatura media.

$$T_m = \frac{T_{\text{sup}} + T_{\text{sec}}}{2}$$

$$T_m = \frac{90 + 70}{2}$$

$$T_m = 80 + 273$$

$$T_m = 353 \text{ K}$$

Por lo tanto el coeficiente de radiación interna es:

$$h_{\text{rad}} = 4 * 0.4 * 5.67 \times 10^{-8} * (353)^3$$

$$h_{\text{rad}} = 3.99 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} \right]$$

3.6.7.4. Coeficiente de convección externa (h_o)

Para determinar el coeficiente de convección externa se calcula mediante la fórmula de Watmuff:

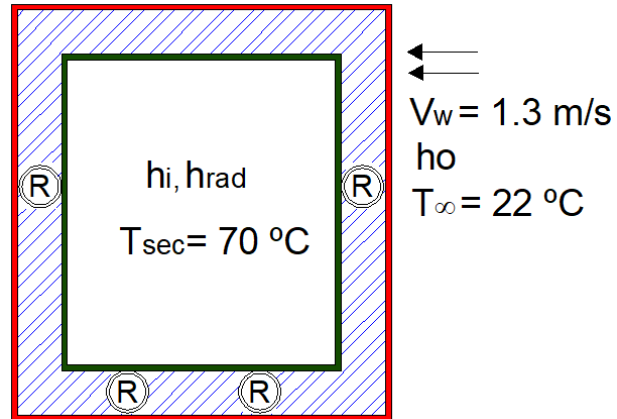


Figura 55. Coeficiente de convección externa

$$h_o = 2.8 + 3V_w \left[\frac{W}{m^2\text{°C}} \right] \quad (66)$$

$$h_o = 2.8 + 3(1.3)$$

$$h_o = 6.7 \left[\frac{W}{m^2\text{°C}} \right]$$

3.6.7.5. Determinación del coeficiente global

$$U_o = \frac{1}{\frac{1}{h_i + h_r} + \frac{e_{inox}}{k_{inox}} + \frac{e_{ais}}{k_{ais}} + \frac{e_{agal}}{k_{agal}} + \frac{1}{h_o}}$$

$$U_o = \frac{1}{\frac{1}{4.698 + 3.99} + \frac{0.002}{16.3} + \frac{0.04725}{0.0377} + \frac{0.00075}{52.34} + \frac{1}{6.7}}$$

$$U_o = 0.659 \left[\frac{W}{m^2\text{ K}} \right]$$

3.6.8. Calor perdido por paredes del secador

Para determinar el calor perdido por paredes (Q_{pp}) se utiliza la ecuación propuesta en la Ley de Fourier, el mismo que relaciona el coeficiente global de transferencia, el

área externa de la cámara y la diferencia de temperatura entre el interior y exterior de la cámara, ver figura 56:

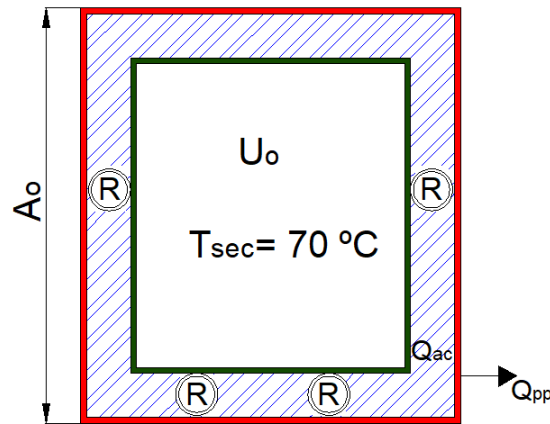


Figura 56. Esquema del Calor perdido por paredes en el sistema

El área externa del sistema térmico-energético [A_o] es:

$$A_o = 2(0.483 * 0.722) + 2(0.522 * 0.722) + 2(0.483 * 0.522)$$

$$A_o = 1.96 \text{ [m}^2\text{]}$$

El calor perdido por paredes del sistema es:

$$Q_{pp} = U_o * A_o * (T_{sec} - T_{\infty}) \quad (67)$$

$$Q_{pp} = 0.659 * (1.96) * (70 - 22)$$

$$Q_{pp} = 61.99 \text{ [W]}$$

3.6.9. Calor perdido por cambios de aire

Este calor perdido por cambios de aire (Q_{pca}) se produce dentro del sistema térmico-energético debido a las aperturas de la puerta de la cámara. Según la norma ASHRAE recomienda que la cámara de secado deba abrirse una vez por hora.

$$Q_{pca} = \frac{N}{t_{sec}} * C_{p_{aire}} * V_i * \rho_{aire} * (T_{sec} - T_{\infty}) \quad (68)$$

Dónde:

N: cambios de aire (9),

$C_{p_{aire}}$: Calor específico del aire a 70 °C $\left[\frac{J}{kg K}\right]$,

V_i : Volumen interno de la cámara $[m^3]$,

ρ_{aire} = Densidad del aire a 70 °C $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$.

Reemplazando se tiene:

$$Q_{pca} = \frac{9}{9 * 3600} * 1.0079 \times 10^3 * (0.42 * 0.38 * 0.64) * 1.0231 * (70 - 22)$$

$$Q_{pca} = 1.404 \text{ W}$$

3.6.10. Calor acumulado en paredes

Para determinar el calor acumulado en paredes (Q_{ap}), se emplea la fórmula de (Pitts & Sissom, 1979)

$$Q_{ap} = \frac{m_{Tinox}}{t_{sec}} * c_{p_{inox}} * (T_{sec} - T_{\infty}) \quad (69)$$

Dónde:

m_{Tinox} : Masa total del acero inoxidable de la cámara de secado.

$$V_{inox} = A_t * e_{inox}$$

$$V_{inox} = [2(0.42 * 0.64) + 2(0.38 * 0.64) + 2(0.38 * 0.42)] * (0.002 \text{ m})$$

$$V_{inox} = 0.00269 \text{ [m}^3\text{]}$$

$$m_{inox} = \rho_{inox} * V_{inox}$$

$$m_{\text{inox}} = 7817 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] * 0.00269 [\text{m}^3]$$

$$m_{\text{inox}} = 21.0277 [\text{kg}]$$

$$m_{\text{Tinox}} = m_{\text{inox}} + n_{\text{bandejas}} * m_{\text{bandejas}}$$

$$m_{\text{Tinox}} = 21.0277[\text{kg}] + (4 * 1.32)[\text{kg}]$$

$$m_{\text{Tinox}} = 26.3077 [\text{kg}]$$

Reemplazando los resultados en la ecuación 69, el calor acumulado en las paredes es:

$$Q_{\text{ap}} = \frac{26.3077}{9 * 3600} * 500 * (70 - 22)$$

$$Q_{\text{ap}} = 19.487 [\text{W}]$$

3.6.11. Calor perdido por respiraderos y rejillas

Este calor se pierde durante el proceso de secado por los respiraderos en la cámara de secado, donde existe un intercambio de calor entre el aire de secado y el aire del ambiente exterior

$$V_{\text{resp}} = A_{\text{resp}} \cdot e_{\text{inox}}$$

$$V_{\text{resp}} = \left[2 \left(\pi \cdot \frac{0.014^2}{4} \right) \right] * (0.002)$$

$$V_{\text{resp}} = 6.157 \times 10^{-7} [\text{m}^3]$$

$$V_{\text{rejilla}} = A_{\text{rejilla}} \cdot e_{\text{rejilla}}$$

$$V_{\text{rejilla}} = [(0.42 \times 0.43) + 2(0.38 \times 0.43)] * (0.001)$$

$$V_{\text{rejilla}} = 5.074 \times 10^{-4} [\text{m}^3]$$

$$m_{\text{airsec}} = \rho_{\text{airsec}} * (V_{\text{resp}} + V_{\text{rejilla}})$$

$$m_{\text{airsec}} = 0.709 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] * 5.08 \times 10^{-4} [\text{m}^3]$$

$$m_{\text{airsec}} = 3.602 \times 10^{-4} [\text{kg}]$$

$$Q_{\text{vapor}} = \frac{m_{\text{airsec}}}{t_{\text{sec}}} * C_{p_{\text{airsec}}} * (T_{\text{sec}} - T_{\infty}) \quad (70)$$

$$Q_{\text{vapor}} = \frac{3.602 \times 10^{-4}}{9 * 3600} * 1.0079 \times 10^3 * (70 - 22)$$

$$Q_{\text{vapor}} = 5.378 \times 10^{-4} [\text{W}]$$

El calor total perdido es:

$$Q_{\text{Tper}} = Q_{\text{pp}} + Q_{\text{pca}} + Q_{\text{ap}} + Q_{\text{vapor}} \quad (71)$$

$$Q_{\text{Tper}} = 61.99 + 1.404 + 19.487 + 5.378 \times 10^{-4}$$

$$Q_{\text{Tper}} = 82.882 [\text{W}]$$

3.6.12. Calor Neto

Finalmente el calor neto es igual a la sumatoria del calor útil, calores perdidos y calores acumulados. Este calor neto o total es el requerido por el sistema térmico-energético para realizar el proceso de secado de los granos de cacao.

$$Q_{\text{N}} = Q_{\text{u}} + Q_{\text{Tper}} \quad (72)$$

$$Q_{\text{N}} = 561 + 82.882$$

$$Q_{\text{N}} = 643.882 [\text{W}]$$

3.7. Modelado matemático del sistema térmico-energético

Para observar el perfil de temperaturas en el estado estacionario y transitorio desde el interior de la cámara de secado hacia el exterior se realizará el modelado matemático

para el aislamiento térmico ya que es el elemento de mayor espesor y así se puede presentar una mejor representación de los perfiles temperaturas.

3.7.1. Distribución de temperaturas

El flujo de energía térmica por conducción producido en el aislamiento del sistema, se expresa por:

$$q_x = -k_{\text{ais}} A_{\text{ais}} \frac{\partial T}{\partial x} \quad (73)$$

El incremento de energía al cruzar por el elemento diferencial dx , se convierte en:

$$q_{x+dx} = -k_{\text{ais}} A_{\text{ais}} \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(-k_{\text{ais}} A_{\text{ais}} \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx \quad (74)$$

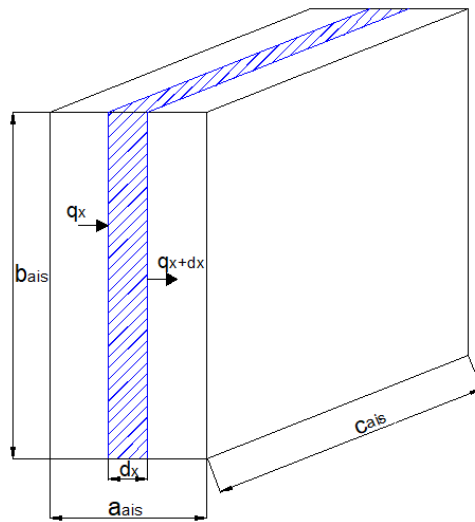


Figura 57. Esquema del aislamiento térmico

Dónde:

$a_{\text{ais}} = 0.05$ [m] ancho del aislamiento térmico,

$b_{\text{ais}} = 0.52$ [m] alto del aislamiento térmico,

$c_{\text{ais}} = 0.64$ [m] profundidad del aislamiento.

Por lo tanto el área del aislamiento térmico en el horno será de:

$$A_{\text{ais}} = b_{\text{ais}} \cdot c_{\text{ais}}$$

$$A_{\text{ais}} = 0.52 \cdot 0.64$$

$$A_{\text{ais}} = 0.3328 \text{ [m}^2\text{]}$$

La acumulación de potencia térmica en las paredes del sistema en el tiempo es:

$$q_{\text{acc}} = \rho_{\text{ais}} \cdot C_{p_{\text{ais}}} \cdot A_{\text{ais}} \cdot dx \frac{\partial T}{\partial t} \quad (75)$$

$$q_{\text{acc}} = \rho_{\text{ais}} \cdot C_{p_{\text{ais}}} \cdot b_{\text{ais}} c_{\text{ais}} \cdot dx \frac{\partial T}{\partial t}$$

En el aislamiento térmico se produce el calor perdido por convección hacia el ambiente, este calor es representado mediante la siguiente formulación:

$$q_{\text{conv}} = h_o \cdot A \cdot dx \cdot (T_{\text{sec}} - T_{\infty}) \quad (76)$$

$$q_{\text{conv}} = h_o \cdot 2c_{\text{ais}} \cdot dx \cdot (T_{\text{sec}} - T_{\infty})$$

En la figura 58 se indica el balance energético en el aislamiento térmico donde:

$$q_e - q_s - q_{\text{conv}} = q_{\text{acc}} \quad (77)$$

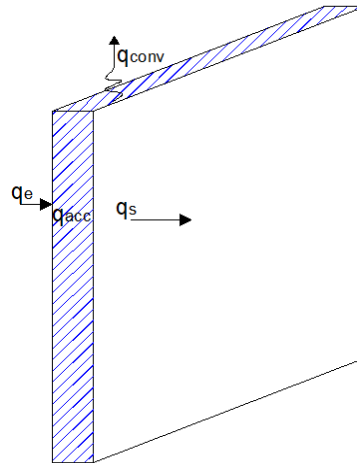


Figura 58. Balance energético para el aislamiento

Reemplazando los factores de la ecuación 77:

$$-kA \frac{\partial T}{\partial x} - \left[-kA \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(kA \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx \right] - h_o \cdot 2c \cdot dx(T_{\text{sec}} - T_{\infty}) = \rho \cdot Cp \cdot bc \cdot dx \frac{\partial T}{\partial t}$$

Simplificando valores en la igualdad

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(kA \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx - h_o \cdot 2c \cdot dx(T_{\text{sec}} - T_{\infty}) = \rho \cdot Cp \cdot bc \cdot dx \frac{\partial T}{\partial t}$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(kA \frac{\partial T}{\partial x} \right) - h_o \cdot 2c(T_{\text{sec}} - T_{\infty}) = \rho \cdot Cp \cdot bc \frac{\partial T}{\partial t}$$

$$k \cdot bc \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - h_o \cdot 2c(T_{\text{sec}} - T_{\infty}) = \rho \cdot Cp \cdot bc \frac{\partial T}{\partial t}$$

Dividiendo la expresión para la conductividad térmica (k) y la sección transversal

(bc):

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{h_o \cdot 2c}{k \cdot bc} (T_{\text{sec}} - T_{\infty}) = \frac{\rho \cdot Cp \cdot bc}{k \cdot bc} \frac{\partial T}{\partial t}$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{h_o \cdot 2}{k \cdot b} (T_{\text{sec}} - T_{\infty}) = \frac{\rho \cdot Cp}{k} \frac{\partial T}{\partial t}$$

Si la difusividad térmica es $\alpha = \frac{k}{\rho \cdot Cp}$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{2h_o}{K \cdot b} (T_{\text{sec}} - T_{\infty}) = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (78)$$

El exceso de temperatura en el aislamiento térmico sobre el aire del ambiente se define como $\theta = (T_{\text{sec}} - T_{\infty})$, reemplazando en la ecuación 78:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} - \frac{2h_o}{k \cdot b} \theta = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (79)$$

Para simplificar $m^2 = \frac{2h_o}{k \cdot b}$ en la ecuación 79, obteniendo una ecuación diferencial parcial de segundo orden que tiene coeficientes constantes.

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} - m^2 \theta = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (80)$$

La expresión 80 se define como “Ecuación diferencial para el aislamiento térmico del sistema”.

3.7.2. Solución para el estado estacionario

En el estado estacionario se tiene que la variación de temperatura respecto al tiempo es igual a cero:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = 0$$

Reemplazando $\frac{\partial \theta}{\partial t} = 0$ en la ecuación 80, el resultante es una ecuación diferencial lineal homogénea de segundo orden con coeficientes constantes:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} - m^2 \theta = 0 \quad (81)$$

Considerando la siguiente expresión y derivando dos veces se tiene:

$$\theta = e^{rx}$$

$$\theta' = re^{rx}$$

$$\theta'' = r^2 e^{rx}$$

Reemplazando en la ecuación 79, se tiene:

$$r^2 e^{rx} - m^2 e^{rx} = 0$$

$$r^2 - m^2 = 0$$

$$r^2 = m^2$$

$$r = \pm m = \sqrt{\frac{2h_o}{k \cdot b}}$$

Por lo tanto la solución general de la ecuación diferencial 81 es:

$$\theta = C_1 e^{mx} + C_2 e^{-mx} \quad (82)$$

Dónde:

C_1 y C_2 : Constantes de integración.

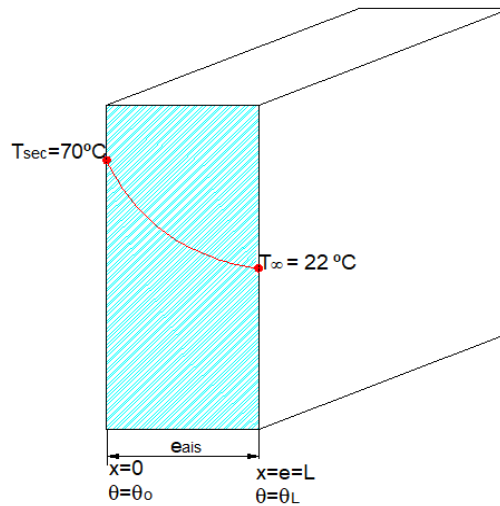


Figura 59. Perfil de temperaturas y condiciones de frontera

Utilizando la primera condición de frontera (ver figura 67), $x = 0$ y $\theta = \theta_0$ y reemplazando en la ecuación 82.

$$\theta_0 = C_1 e^0 + C_2 e^0$$

$$\theta_0 = C_1 + C_2 \quad (83)$$

Esto quiere decir que θ_0 es igual a la sumatoria de las constantes de integración.

La superficie lateral del aislamiento térmico que está en contacto con el acero inoxidable el mismo que es calentado por el fluido de trabajo, se define como:

$$(q)_{x=L} = -kA \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=L} = -kA \left(\frac{d\theta}{dx} \right)_{x=L} \quad (84)$$

Pero el gradiente de temperatura no se considera igual a cero, debido a que el aislamiento térmico presenta un contorno conductivo convectivo que se expresa:

$$(q)_{x=L} = h_o A (T_{x=L}) = h_o A \theta_{x=L} \quad (85)$$

Igualando las expresiones 82 y 83:

$$-k \frac{d\theta}{dt} = h_o \theta_L$$

Despejando θ_L :

$$\theta_L = -\frac{k}{h_o} \frac{d\theta}{dt} \quad (86)$$

Utilizando la segunda condición de frontera, $x = L$, en la ecuación 82.

$$\theta = C_1 e^{mL} + C_2 e^{-mL}$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial L} = m C_1 e^{Lx} - m C_2 e^{-mL}$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial L} = m (C_1 e^{mL} - C_2 e^{-mL})$$

El diferencial en θ_L es:

$$\theta_L = C_1 e^{mL} + C_2 e^{-mL} \quad (87)$$

Reemplazando y resolviendo la ecuación 87:

$$-\frac{k}{h_o} \frac{\partial \theta}{\partial L} = C_1 e^{mL} + C_2 e^{-mL}$$

$$-\frac{k}{h_o} m (C_1 e^{mL} - C_2 e^{-mL}) = (C_1 e^{mL} + C_2 e^{-mL})$$

$$\text{Si } R = \frac{km}{h_o}$$

$$-R \cdot C_1 e^{mL} + R \cdot C_2 e^{-mL} = C_1 e^{mL} + C_2 e^{-mL}$$

$$e^{mL} (R + 1) C_1 = e^{-mL} (R - 1) C_2$$

Despejando C_2

$$C_2 = \frac{e^{mL}(R+1)C_1}{e^{-mL}(R-1)}$$

$$C_2 = \frac{e^{2mL}(R+1)C_1}{(R-1)}$$

Reemplazando el valor de C_2 en la expresión de $\theta_o = C_1 + C_2$ se tiene:

$$\theta_o = C_1 + \frac{e^{2mL}(R+1)C_1}{(R-1)}$$

$$\theta_o = C_1 \left[1 + \frac{e^{2mL}(R+1)}{(R-1)} \right]$$

Despejando C_1 se tiene:

$$C_1 = \frac{\theta_o}{\left[1 + \frac{e^{2mL}(R+1)}{(R-1)} \right]}$$

De igual forma C_2 es:

$$C_2 = \frac{\theta_o}{\left[1 + \frac{e^{2mL}(R+1)}{(R-1)} \right]} \cdot e^{2mL} \left(\frac{R+1}{R-1} \right)$$

Realizando un cambio de variable, $A_o = e^{2mL} \left[\frac{R+1}{R-1} \right]$

$$C_1 = \frac{\theta_o}{[1 + A_o]}$$

$$C_2 = \frac{\theta_o}{[1 + A_o]} \cdot A_o$$

$$\theta = C_1 e^{mx} + C_2 e^{-mx}$$

$$\theta = \frac{\theta_o}{1 + A_o} e^{mx} + \frac{\theta_o A_o}{1 + A_o} e^{-mx}$$

Por lo tanto el perfil de temperatura, para el estado estacionario se puede calcular con la siguiente expresión:

$$\theta = \frac{\theta_0}{1 + A_0} [e^{mx} + A_0 e^{-mx}] \quad (88)$$

Dónde:

$$A_0 = e^{2mL} \left[\frac{R + 1}{R - 1} \right]; R = \frac{km}{h_0}$$

$$h_0 = 6.7 \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$$

$$k_{ais} = 0.0377 \left[\frac{W}{m K} \right]$$

$$L = 0.04725 \text{ m}$$

$$m = \sqrt{\frac{2h_0}{k \cdot b}}$$

$$m = \sqrt{\frac{2 * 6.7}{0.0377 * 0.52}} = 26.144$$

$$R = \frac{km}{h_0} = \frac{0.0541 * 20.945}{6.7}$$

$$R = 0.147$$

$$A_0 = e^{2mL} \left[\frac{R + 1}{R - 1} \right]$$

$$A_0 = 15.911$$

Finalmente realizando el reemplazo de las constantes en la solución para el estado estacionario se tiene:

$$\theta_0 = 70 - 22$$

$$\theta_0 = 48$$

$$\theta = \frac{\theta_0}{1 + A_0} [e^{mx} + A_0 e^{-mx}]$$

$$\theta = \frac{48}{1 + 15.911} [e^{26.144x} + 15.911e^{-26.144x}]$$

Utilizando un software CAD, en la figura 60 se tiene el perfil de temperatura del aislamiento térmico en el sistema térmico-energético según la solución para el estado estacionario.

$$\theta(x) := \frac{\theta_0}{1 + A_0} \cdot (e^{m \cdot x} + A_0 \cdot e^{-m \cdot x})$$

$$x := 0, 0.00000010 .. L$$

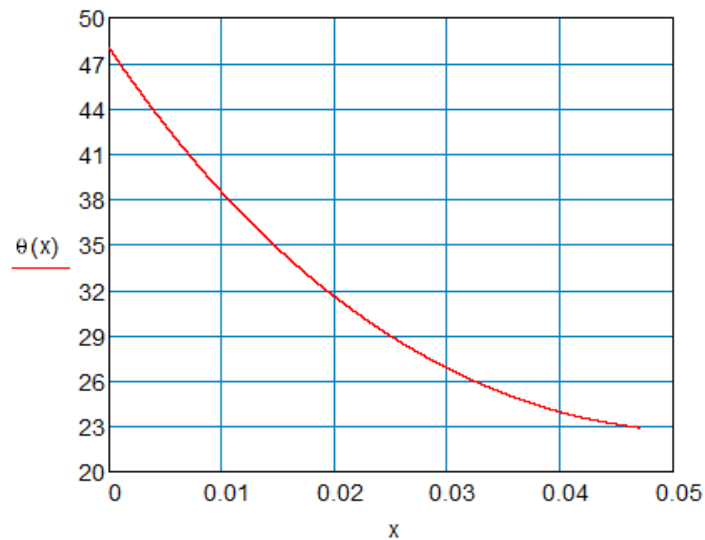


Figura 60. Perfil de Temperatura en el estado estacionario

3.7.3. Solución para el estado transitorio

En el aislamiento térmico se produce una variación del exceso de temperatura con respecto a tiempo. Para el estado transitorio, a partir de la ecuación del diferencial para el aislamiento térmico, ecuación 80:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} - m^2 \theta = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \theta}{\partial t}$$

Para la solución de esta ecuación diferencial se empleará el método de separación de variables, representando la ecuación como un producto de dos funciones que cada una depende de solo una variable independiente (Spiegel, 1975).

Si $\theta = \theta(x, t) = X \cdot T$, derivando esta función:

$$\theta' = X' \cdot T$$

$$\theta'' = X'' \cdot T$$

$$\dot{\theta} = X \cdot T'$$

Reemplazando en la ecuación del diferencial de temperatura:

$$X''T - m^2XT = \frac{1}{\alpha} XT'$$

El resultado inverso de la difusividad térmica para el aislamiento térmico $\frac{1}{\alpha}$, se reemplaza con la constante k_1 :

$$X''T - m^2XT = k_1 XT'$$

Resolviendo la expresión anterior se tiene:

$$X''T = k_1 XT' + m^2XT$$

$$X''T = X(k_1 T' + m^2T)$$

$$\frac{X''}{X} = \frac{k_1 T' + m^2T}{T}$$

Si esta ecuación igualamos a una constante negativa ($-\lambda^2$), porque si se toma positiva, la solución final de esta expresión no verificará la condición de cota para valores reales de λ (Spiegel, 1975), para obtener unas soluciones aproximadas tenemos:

$$\frac{X''}{X} = \frac{k_1 T' + m^2T}{T} = -\lambda^2 \quad (89)$$

Resolviendo cada término independientemente de esta expresión:

$$\frac{X''}{X} = -\lambda^2$$

$$X'' + \lambda^2 X = 0 \quad (\text{Sol 1})$$

$$X = e^{rX}$$

$$X' = re^{rX}$$

$$X'' = r^2 e^{rX}$$

Reemplazando:

$$r^2 e^{rX} + \lambda^2 e^{rX} = 0$$

$$r^2 = -\lambda^2$$

$$r = \pm i\lambda$$

$$x = A_0 e^{rX} + B_0 e^{-rX}$$

Resolviendo la ecuación por Euler:

$$e^{rx} = \cos(rx) + i \operatorname{Sen}(rx)$$

$$e^{-rx} = \cos(rx) - i \operatorname{Sen}(rx)$$

Reemplazando:

$$x = A_0 [\cos(rx) + i \operatorname{Sen}(rx)] + B_0 [\cos(rx) - i \operatorname{Sen}(rx)]$$

$$x = A_1 \cos(\lambda x) + B_1 \operatorname{Sen}(\lambda x) \quad (90)$$

El segundo término de la ecuación 89 es:

$$\frac{k_1 T' + m^2 T}{T} = -\lambda^2$$

$$k_1 T' + m^2 T = -\lambda^2 T$$

$$T' + \frac{m^2 + \lambda^2}{k_1} T = 0$$

Realizando el reemplazo de $k_2 = \frac{m^2 + \lambda^2}{k_1}$.

$$T' + k_2 T = 0 \quad (\text{Sol 2})$$

$$T = e^{rt}$$

$$T' = re^{rt}$$

Reemplazando estos valores en la solución 2:

$$re^{rt} + k_2 e^{rt} = 0$$

$$r = -k_2$$

$$T = C_1 e^{-K_2 t} \quad (91)$$

Las soluciones parciales para la ecuación diferencial 89 son:

$$X = A_1 \cos(\lambda x) + B_1 \sin(\lambda x)$$

$$T = C_1 e^{-K_2 t}$$

Por lo tanto, la solución general de la ecuación diferencial:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} - m^2 \theta = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \theta}{\partial t}$$

Se expresa de:

$$\theta = \theta(x, t) = XT = C_1 e^{-K_2 t} [A_1 \cos(\lambda x) + B_1 \sin(\lambda x)]$$

$$\theta(x, t) = e^{-K_2 t} [A \cos(\lambda x) + B \sin(\lambda x)] \quad (92)$$

Para esta expresión los valores de A y B, son los parámetros a determinar mediante las condiciones de frontera.

Si $\theta(x, 0) = 22^\circ\text{C}$, suponiendo que:

$$\theta(0, t) = 0 \text{ (C.F1)}$$

$$\theta(L; t) = 0 \text{ (C.F2)}$$

Reemplazando la condición de frontera 1 (C.F1) en la ecuación 92 se tiene:

$$\theta(x, t) = 0 = e^{-K_2 t} [A \cos(0) + B \text{sen}(0)]$$

Para que la expresión $e^{-K_2 t} [A \cos(0) + B \text{sen}(0)]$ sea igual a 0 los valores de A y B deben ser:

$$A = 0$$

$$B \neq 0$$

$$\theta(x, t) = e^{-K_2 t} [B \text{sen}(\lambda x)] \quad \textbf{(93)}$$

En la condición de frontera 2 (C.F2), reemplazando en la ecuación 92 se tiene:

$$0 = e^{-K_2 t} [A \cos(L \lambda) + B \text{sen}(L \lambda)]$$

Si A=0:

$$0 = e^{-K_2 t} [B \text{sen}(L \lambda)]$$

$$\text{Sen}(L \lambda) = 0$$

$$\text{Sen}(\alpha) = 0$$

Si:

$$\alpha = r\pi$$

$$L\lambda = r\pi$$

$$\lambda = \frac{r\pi}{L} ; r = 0, \pm 1, \dots, \infty$$

Resolviendo

$$\theta(L, t) = e^{-K_2 t} [B \text{sen}(r\pi)] \quad \textbf{(94)}$$

Teoría de medio intervalo en senos

Para resolver la ecuación 94 se resuelve por medio de:

$$\theta(x, t) = B \text{ Sen } (r\pi x) \cdot e^{-K_2 t}$$

Si $r = 0, \pm 1, \dots, \infty$, se obtiene infinitas soluciones.

$$\theta(x, t) = \sum_{r=0}^{\infty} B \text{ Sen } (r\pi x) \cdot e^{-K_2 t}$$

$$\theta(x, 0) = 22 = \sum_{r=0}^{\infty} B \text{ Sen } (r\pi x)$$

En el intervalo de: $0 < x < L$

Resolviendo por series de Fourier para medio intervalo en senos

$$B_r = \frac{2}{L} \int_0^L f(x) \text{ Sen } (r\pi x) dx$$

Si:

$$\theta(x, 0) = 22 = \sum_{r=0}^{\infty} B \text{ Sen } (r\pi x) = f(x)$$

$$B_r = \frac{2}{L} \int_0^L 22 \text{ Sen } (r\pi x) dx$$

Si se realiza un cambio de variables:

$$\gamma = r\pi x$$

$$d\gamma = r\pi dx$$

$$dx = \frac{d\gamma}{r\pi}$$

$$B_r = \frac{2}{L} \int_0^L 22 \text{ Sen } (\gamma) \frac{d\gamma}{\pi r}$$

$$B_r = \frac{44}{Lr\pi} \int_0^L \text{Sen}(\gamma) d\gamma$$

$$B_r = \frac{44}{Lr\pi} [-\text{Cos}(\gamma)]_0^L$$

$$B_r = \frac{44}{Lr\pi} [-\text{Cos}(\pi r x)]_0^L$$

$$B_r = \frac{44}{Lr\pi} [-\text{Cos}(L r \pi) - (-\text{Cos}(0 \cdot \pi r))]$$

$$B_r = \frac{44}{Lr\pi} [1 - \text{Cos}(L r \pi)]$$

Dónde:

$$\theta(x, t) = \sum_{r=1}^{\infty} \frac{44}{Lr\pi} [1 - \text{Cos}(L r \pi)] \cdot \text{Sen}(\pi r x) \cdot e^{-K_2 t} \quad (95)$$

En la ecuación 95 se muestra la solución para el estado transitorio, dónde:

$$k_2 = \frac{m^2 + \lambda^2}{k_1}; k_1 = \frac{1}{\alpha}; m = \sqrt{\frac{2h_0}{k \cdot b}}; \lambda = \frac{r\pi}{L}$$

$$r = 0, \pm 1, \dots, \infty$$

$$L = 0.04725 \text{ [m]}$$

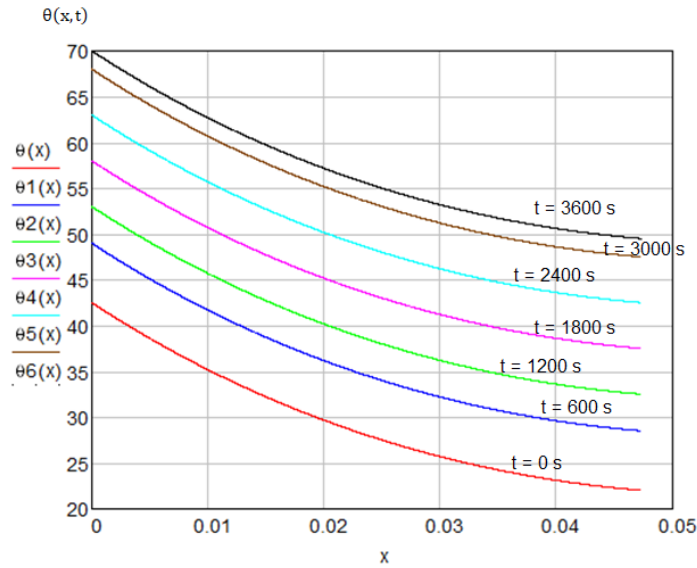


Figura 61. Perfil de temperatura en el estado transitorio

En la figura 61 se indica la gráfica del perfil de temperaturas para el estado transitorio para la ecuación 95 para un tiempo igual a 0 s, 600 s, 1200 s, 1800 s, 2400 s, 3600 s.

3.8. Balance energético

En el sistema térmico-energético se producen fenómenos de convección y radiación para los granos de cacao denominado “producto” y en la cámara de secado, por lo que es necesario realizar un análisis térmico de estos fenómenos presentes en el sistema (Hermosillo, 1995).

En el modelado matemático del sistema térmico-energético se obtuvo la ecuación diferencial, ecuación 80:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} - m^2 \theta = \frac{1}{\alpha_p} \frac{\partial \theta}{\partial t}$$

Donde α_p , es la difusividad térmica para el producto

$$\alpha_p = \frac{k_p}{\rho_p * C_{p_p}}$$

$$m = \sqrt{\frac{h_o}{k_p * A_p}}$$

Los granos de cacao son de forma elíptica, por lo tanto su área se determinará:

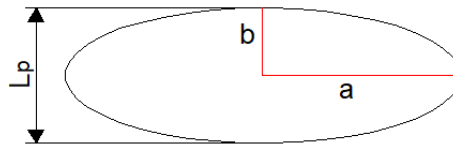


Figura 62. Dimensiones para el producto

$$A_p = \pi * a * b$$

3.8.1. Calor máximo entregado al producto

Este calor es entregado de las bandejas hacia el producto por conducción y es determinado:

$$Q_d = m * \theta_o * A_p * N * K_p * \text{Tanh}(mL_p) \quad (96)$$

Dónde:

$$\theta_o = T_{\text{bandejas}} - T_p$$

N = Cantidad de producto a secar.

3.8.2. Calor perdido por radiación

Este calor es producido desde las paredes de la cámara hacia el producto y viceversa, puede ser determinado mediante la siguiente expresión:

$$Q_{\text{rad}} = h_{\text{rad}} * A_p * (T_{\text{sup}} - T_p)$$

Dónde:

$Q_{\text{rad,c-p}}$: Calor de radiación de la cámara hacia el producto,

$h_{\text{rad,c-p}}$: Coeficiente de radiación,

T_{sup} : Temperatura de las paredes de la cámara.

$$h_{\text{rad}} = 4 * \varepsilon * \sigma * T_m^3$$

ε : Emisividad,

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4} \right] \text{ Constante de Stefan – Boltzmann.}$$

$$T_m = \frac{T_{\text{sup}} + T_p}{2} \text{ [K]}$$

Por lo tanto las ecuaciones para el calor perdido por radiación del producto hacia la cámara y viceversa se expresa en las ecuaciones 97 y 98 respectivamente:

$$Q_{\text{rad,c-p}} = h_{\text{r,c-p}} * A_i * (T_{\text{sup}} - T_p) \quad (97)$$

$$Q_{\text{rad,p-c}} = h_{\text{r,p-c}} * A_p * N * (T_p - T_{\text{sec}}) \quad (98)$$

3.8.3. Calor perdido por convección

Este calor perdido es entregado del producto hacia la cámara:

$$Q_{\text{conv}} = h_{\text{c,p-c}} * A_p * N (T_p - T_{\text{sup}}) \quad (99)$$

3.8.4. Calor perdido por evaporación de agua

Calor entregado por la evaporación del agua contenido en el producto hacia la cámara, donde la potencia de evaporación (PE) es:

$$PE = \frac{\Delta W}{T_{\text{sec}}} * \frac{2500}{3600} \text{ [kW]} \quad (100)$$

3.8.5. Balance energético para el producto

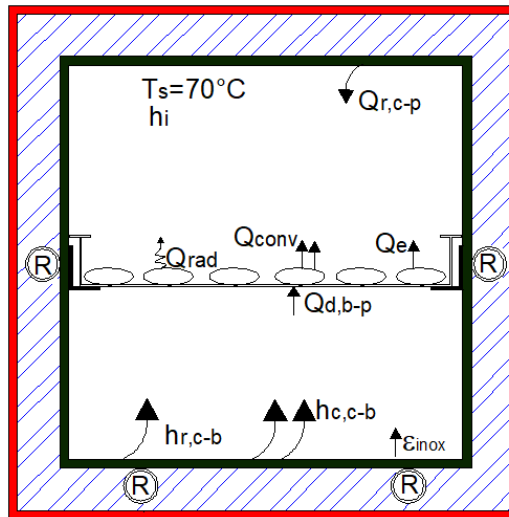


Figura 63. Esquema del balance energético para el producto

Dónde:

$Q_{d,b-p}$: Calor por conducción de la bandeja hacia el producto,

$Q_{r,c-p}$: Calor por radiación de las paredes de la cámara hacia el producto,

Q_{rad} : Calor de radiación del producto hacia la cámara,

Q_{conv} : Calor de convección del producto hacia la cámara ,

Q_e : Calor de evaporación.

Realizando el balance energético se tiene:

$$Q_e = Q_s$$

$$Q_{d,b-p} + Q_{r,c-p} = Q_{rad} + Q_{conv} + Q_e \quad (101)$$

Reemplazando se tiene:

$$m\theta_0 A_p N * K_p * \tanh(mL_p) + h_{r,c-p} * A_p (T_{sup} - T_p) = h_{r,p-c} * A_p * N(T_p - T_{sup}) +$$

$$h_{c,p-c} * A_p * N(T_p - T_{sup}) + \frac{\Delta W}{T_{sec}} * \frac{10000}{3600}$$

3.8.6. Balance energético para la cámara

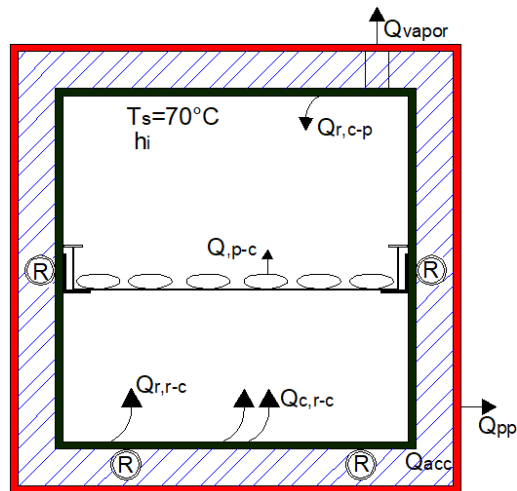


Figura 64. Esquema del balance energético para la cámara

En Forma General

$$Q_{\text{sum}} = Q_{\text{útil}} + Q_{\text{perdido}}$$

$$Q_{\text{conv,R-C}} + Q_{\text{rad,R-C}} = Q_d + Q_{\text{rad,C-P}} + Q_{\text{acc}} + Q_{\text{pp}} + Q_{\text{vapor}} \quad (102)$$

$$Q_{\text{pp}} = U_o * A_o * (T_{\text{sec}} - T_{\infty}) \text{ Calor perdido por paredes}$$

$$Q_{\text{acc}} = \frac{m_{\text{Tinox}}}{t_{\text{sec}}} * c_{p_{\text{inox}}} * (T_{\text{sec}} - T_{\infty}) \text{ Calor acumulado en paredes}$$

$$Q_{\text{vapor}} = \dot{m}_{\text{vap}} * C_{p_{\text{vap}}} * (T_{\text{vap}} - T_{\infty}) \quad (103)$$

$$\begin{aligned} & h_{\text{conv,R-C}} * A_{\text{cam}} (T_R - T_{\text{Cam}}) + h_{\text{rad,R-C}} * A_{\text{cam}} (T_R - T_{\text{cam}}) \\ &= m\theta_0 A_p N * K_p * \text{Tanh}(mL_p) + h_{\text{rad,c-p}} * A_p (T_{\text{sup}} - T_p) \\ &+ \frac{m_{\text{Tinox}}}{t_{\text{sec}}} * c_{p_{\text{inox}}} * (T_{\text{sec}} - T_{\infty}) + U_o A_o (T_{\text{sec}} - T_{\infty}) + \dot{m}_{\text{vap}} * C_{p_{\text{vap}}} (T_{\text{vap}} - T_{\infty}) \end{aligned}$$

3.9. Selección de resistencias eléctricas

Para determinar las resistencias eléctricas que serán utilizadas como el sistema de calentamiento para el sistema térmico-energético que tendrán como función calentar el flujo de aire que recircula el interior de la cámara para el correcto secado de los granos de cacao tipo CCN-51 y nacional. Para cumplir con el objetivo las resistencias eléctricas deben tener una potencia mínima igual al calor neto obtenido anteriormente.

Si el calor neto es igual a 643.882 W, se seleccionará 4 resistencias de 200 W cada una, las cuales estarán con una envoltura cerámica, ver figura 65.



Figura 65. Resistencia con ductos cerámicos
Fuente: (Resistencias Tope S.A., 2014)

Estas resistencias eléctricas permiten el calentamiento de la cámara interna del secador por convección natural y radiación, las envolturas de cerámica de las resistencias posee ductos, que son aisladores de canales abiertos que tiene como función propagar el calor hacia el exterior (Sitec Ingeniería, 2015). En la figura 66 se presenta un esquema de las resistencias eléctricas y en la tabla 21 se presentan las características técnicas de estas resistencias.

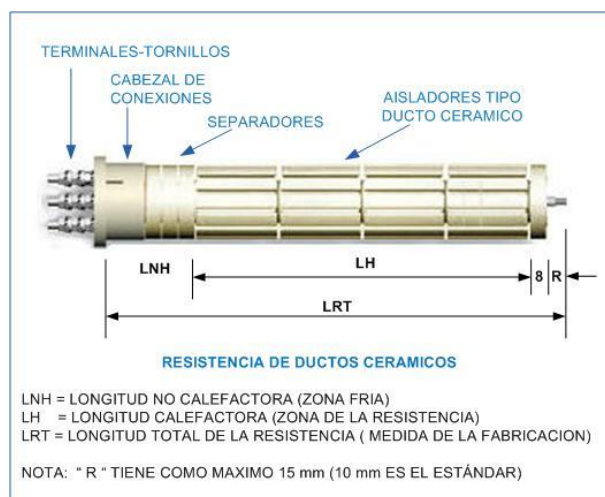


Figura 66. Esquemas de las resistencias eléctricas

Fuente: (Sitec Ingeniería, 2015)

Tabla 21.

Características técnicas de las resistencias eléctricas

Parámetro	
Longitud, LRT	400 hasta 2000 mm
Diámetro	38-51 mm
Potencia	200 W
Voltaje	110 V

Fuente: (Sitec Ingeniería, 2015)

3.10. Diseño del sistema eléctrico/electrónico

En el sistema térmico-energético se implementará un sistema de control para evaluar constantemente los parámetros que influyen a los granos de cacao durante el proceso de secado.

3.10.1. Sensor de temperatura

Para la medición de la temperatura al interior de la cámara se utilizará una termocupla tipo K conectada en la caja de control de temperatura, en la tabla 22 se muestra las especificaciones técnicas de la termocupla tipo k requerida por el sistema térmico-energético.

Tabla 22.*Especificaciones técnicas de la termocupla tipo K*

Modelo	Tipo K
Rango de temperatura	0-400 °C
Diámetro de la rosca	6mmx10 mm/ M6
Interior Aislamiento	Fibra de vidrio
Tipo	Sonda / 1 metro de cable
Terminales	2 hilos

Fuente: (Vistrónica S.A.S., 2016)

**Figura 67.** Termocupla tipo K

Fuente: (Vistrónica S.A.S., 2016)

3.10.2. Sensor DHT 22

Se utiliza para medir la humedad con un sensor capacitivo y la temperatura con un termistor (Techmake, 2017). La función que cumplirá este sensor será entregar el valor de la humedad y temperatura al interior de la cámara.

Tabla 23.*Especificaciones técnicas del sensor DHT22*

Modelo	DHT22/AM2302
Rango de medición de humedad	0 a 100% RH
Precisión de humedad	±2% RH
Rango de medición de temperatura	-40°C a 80 °C
Precisión de temperatura	±0.1 °C
Resolución	2 segundos
Voltaje de operación	5V

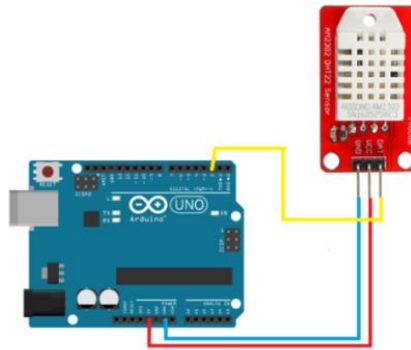


Figura 68. Conexión para el sensor DHT22 y el Arduino

3.10.3. Celda de carga

Para evaluar el contenido de humedad en los granos de cacao durante el proceso de secado y determinar la curva de secado se lo realizará mediante el peso de los granos con la ayuda de una celda de carga que es un transductor que se utiliza para convertir fuerza a una señal eléctrica, la fuerza debe ser aplicada en el sentido de la flecha (figura 69), esta celda mide la elasticidad en la viga y no la flexión (Talos Electronics, 2018), en la tabla 24 se muestran las especificaciones técnicas de una celda de carga de 20 kg.

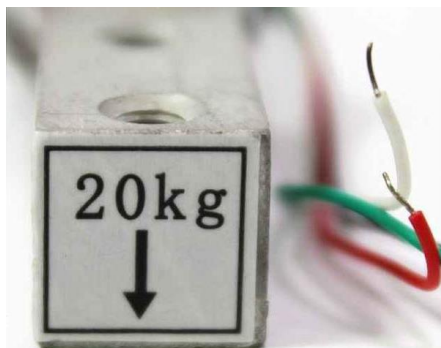


Figura 69. Celda de carga
Fuente: (Talos Electronics, 2018)

Tabla 24.*Especificaciones de la celda de carga*

Rango de carga	20 kg
Voltaje de Operación	5 V DC
Consumo de corriente	menor a 10 mA
Material	Aleación de aluminio
Precisión	0.02% FS
Temperatura de trabajo	-10°C a 50°C
Dimensiones de celda	8.0 x 1.27 x 1.27
Peso	29.7 g la celda

Fuente: (Talos Electronics, 2018)

En la figura 70 se muestra la conexión de la celda de carga y el transmisor Hx711 que sirve para trabajar con las celdas de carga para entregar una salida digital con el arduino (Talos Electronics, 2018).



Figura 70. Conexión de celda de carga en arduino

Fuente: (Msrobotics, 2017)

Para la visualización del peso de los granos de cacao se utilizará una pantalla LCD de 16x2, es decir 2 filas de 16 caracteres cada una.

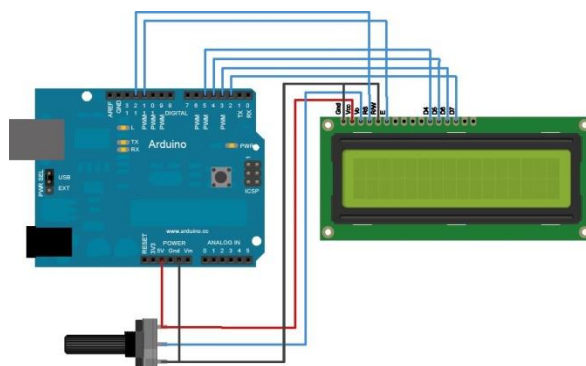


Figura 71. Conexión de la pantalla LCD
Fuente: (Techmake, 2017)

Concluido el diseño mecánico, térmico y la parte electrónica del equipo, en la figura 72 se presenta un bosquejo inicial que se construirá para realizar las pruebas de secado del cacao.

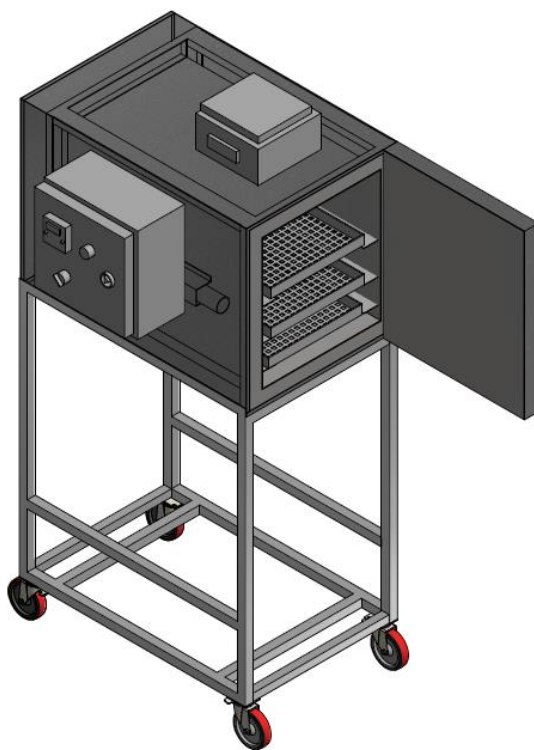


Figura 72. Bosquejo del sistema de secado

CAPÍTULO IV

4. CONSTRUCCIÓN MONTAJE Y PRUEBAS

4.1. Construcción del sistema térmico-energético


Para el proceso de construcción se detallará los materiales, máquinas, instrumentos y herramientas a usar, también se ha elaborado diagramas de proceso los cuales constan de secuencias a seguir para la construcción de los componentes del sistema térmico energético.

4.1.1. Materiales

En la fabricación del sistema se utilizará materiales que se muestran en la tabla 25, para la construcción de la cámara, la puerta y soportes de bandejas se utilizará acero inoxidable AISI 304 de 2 mm de espesor, en la construcción de la estructura se utilizará canales U, para recubrir la estructura se utilizará acero galvanizado de 0,75mm de espesor, para la fabricación de las bandejas se utilizará malla de acero inoxidable mesh 10.

Tabla 25.
Listado de materiales

N°	Descripción	Dimensión	Aplicación
1	Plancha de acero inoxidable AISI 304	1.22mx2.44mx 2mm	Cámara de secado, puerta , soporte para resistencias y soporte de bandejas
2	Plancha de acero galvanizado ASTM A-366	1.22mx2.44mx0.75mm	Recubrimiento de la estructura de la cámara
3	Malla de acero inoxidable AISI 304	2mx2m	Bandejas
4	Tiras de acero inoxidable	2.44mx60mmx0.8mm	Bandejas
5	Tubo estructural rectangular ASTM A-500	40x20x2mm	Estructura de la cámara

CONTINÚA 

6	Tubo estructural cuadrado ASTM A-500	1"x1.2 mm	Mesa soporte para el sistema
7	Perfil estructural Angulo "L" ASTM A-36	1"x2mm	Mesa soporte para el sistema
8	Tubo estructural redondo negro ASTM A-500	1¾" x1.5 mm	Recubrimiento resistencias
9	Alambre ER70S-6	∅ 0.8 mm	Unión de la estructura de la cámara
10	Alambre MIG ER308L para acero inoxidable	∅ 0.9 mm	Unión cámara y puerta
11	Bisagras	2	Sujeción de puertas
12	Remaches	1/8x3/4	Sujeción de recubrimiento
13	Ruedas giratorias (G) y estáticas (E)	2(G)-2(E)	Mesa para el sistema
14	Pintura	Galón	Recubrimiento
15	Aislante térmico	Rollo	Aislante térmico
16	Empaque	-	Ubicado en la puerta y cámara

4.1.2. Máquinas, herramientas e instrumentos

Para la fabricación de los componentes del sistema se utilizará máquinas, herramientas e instrumentos con las características que se presentan en las tablas 26, 27 y 28

Tabla 26.

Listado de máquinas

N°	Máquina	Características	Código
1	Soldadora MIG/MAG	Marca: Cebora Voltaje: 210 V	STE-M1
2	Soldadora TIG	Marca: Miller Voltaje: 210 V	STE-M2
3	Dobladora	Marca: Niagara Peso neto : 1500 kg Capacidad de doblez: Calibre 12	STE-M3
4	Cizalladora	Marca: Niagara Peso neto: 360 kg Capacidad: Calibre 12	STE-M4
5	Amoladora	Marca: Skil Voltaje 110 V velocidad: 6500 rpm	STE-M5
6	Taladro pedestal	Marca: Truper Voltaje: 110 V Potencia: 1045 W	STE-M6
7	Compresor	Marca: Campbell Hausfell	STE-M7

CONTINÚA 

		Voltaje: 120 V Potencia de trab.: 2 HP	
8	Esmeril	Marca: Stanley Potencia: 373 W Velocidad: 3450 rpm	STE-M8
9	Cortadora de Sierra	Marca: DeWalt Potencia: 2200 W Velocidad: 3.800 rpm Tamaño de Disco: 335 mm (14")	STE-M9
10	Taladro de mano	Marca: Bosh Potencia: 2200 W Velocidad: 3.800 rpm Tamaño de Disco: 335 mm (14")	STE-M10

Tabla 27.
Listado de herramientas

N°	Herramientas	Características	Código
1	Remachadora	Marca: Quartz Tipo: 4 boquillas	STE-H1
2	Martillo	Marca: Nupla Máxima dureza: 30 RC Peso: 5.18 kg	STE-H2
3	Entenalla	Marca: Irino	STE-H3
4	Broca HSS	Marca: Irwin Largo: 156 mm	STE-H4
5	Destornillador	Marca: Truper Longitud: 4"	STE-H5
6	Tijera industrial	Marca: Stanley Calibre: 18	STE-H6
7	Trazador	Marca: Acha Longitud: 6"	STE-H7
8	Arco de sierra	Marca: Ingco Longitud: 30mm	STE-H8
9	Disco de desbaste	Marca: Norton Metales-Acero inoxidable Dimensiones: 7"x1/4"x7/8"	STE-H9
10	Disco de corte	Marca: Norton Dimensiones: 7"x1/8"x7/8"	STE-H10
11	Alicate	Marca: Inc-co	STE-H11
12	Sacabocado	-	STE-H12

Tabla 28.*Listado de instrumentos*

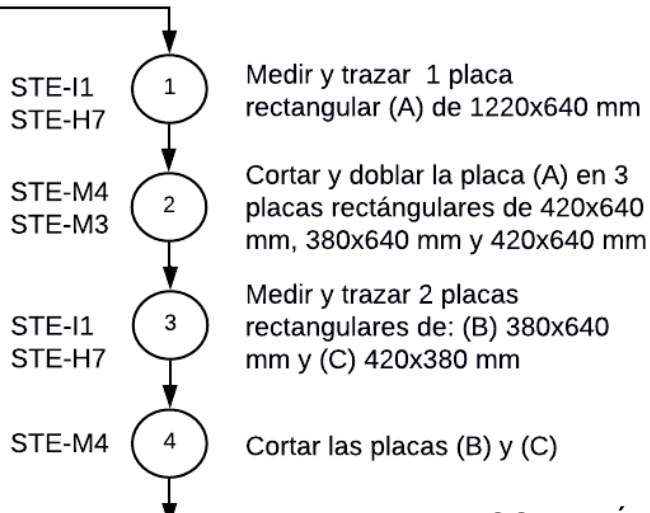
N°	Instrumento	Características	Código
1	Flexómetro	Marca: Stanley Longitud: 8m	STE-I1
2	Calibrador	Marca: Stainless Hardened Apreciación:0,02 mm	STE-I2
3	Escuadra metálica	Marca: Stanley Longitud: 230 mm	STE-I3

4.2. Diagramas de proceso

En los diagramas de proceso se observa el procedimiento para la construcción de cada componente del sistema, cada uno de ellos consta del material, máquinas, herramientas e instrumentos utilizados en cada actividad con el código asignado en las tablas anteriores de este capítulo.

4.2.1. Cámara de secado

Plancha 2440x1220x2mm
Acero inoxidable AISI 304



CONTINÚA



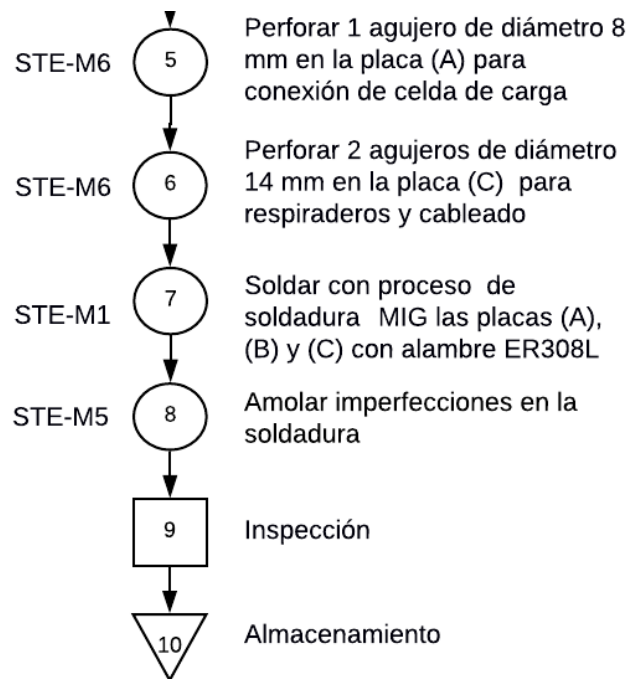


Figura 73. Diagrama de proceso de cámara de secado

Para la optimización del corte de las 3 placas: (A), (B) y (C) en la plancha de acero inoxidable se organizó de tal modo que no haya desperdicio del material. En la figura 74 se indica el corte y doblado de la placa (A) que pertenece a la actividad 2 del diagrama de procesos y en la figura 75 se indica la ubicación de las placas (B) y (C). Las dimensiones para las perforaciones se encuentran detalladas en el anexo 1. Planos mecánicos.

Las placas fueron soldadas entre sí mediante proceso soldadura MIG, se utilizó gas de protección CO₂ y electrodo ER308L $\varnothing = 0.9\text{mm}$, voltaje de 18 V y amperaje de 80 A (Ivan Bohman, 2015).

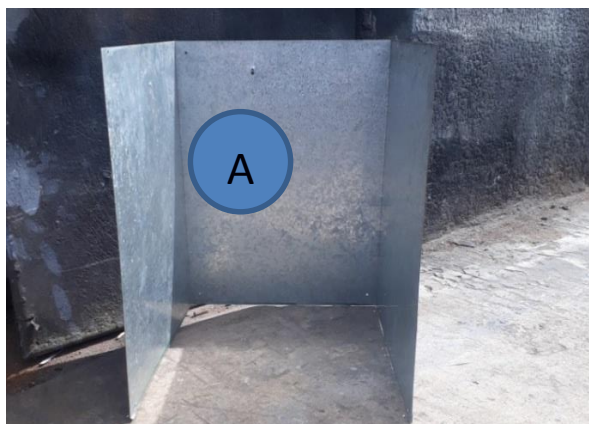


Figura 74. Corte y doblado de la placa A para cámara de secado

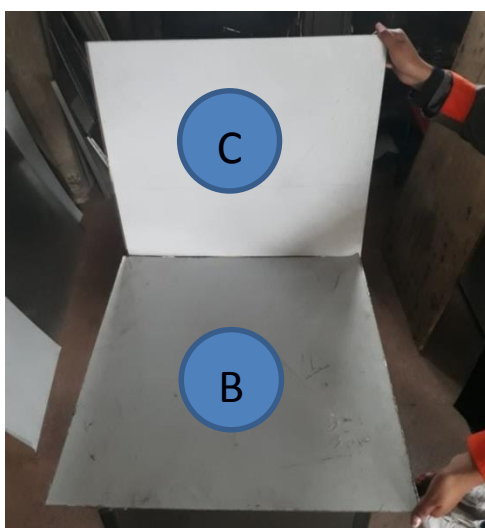


Figura 75. Ubicación de las placas (B) y (C)

4.2.2. Estructura de la cámara

- Plancha 520x360x2 mm
- Acero inoxidable AISI 304
- Tubo estructural rectangular 20x40x2mm
- ASTM A-500

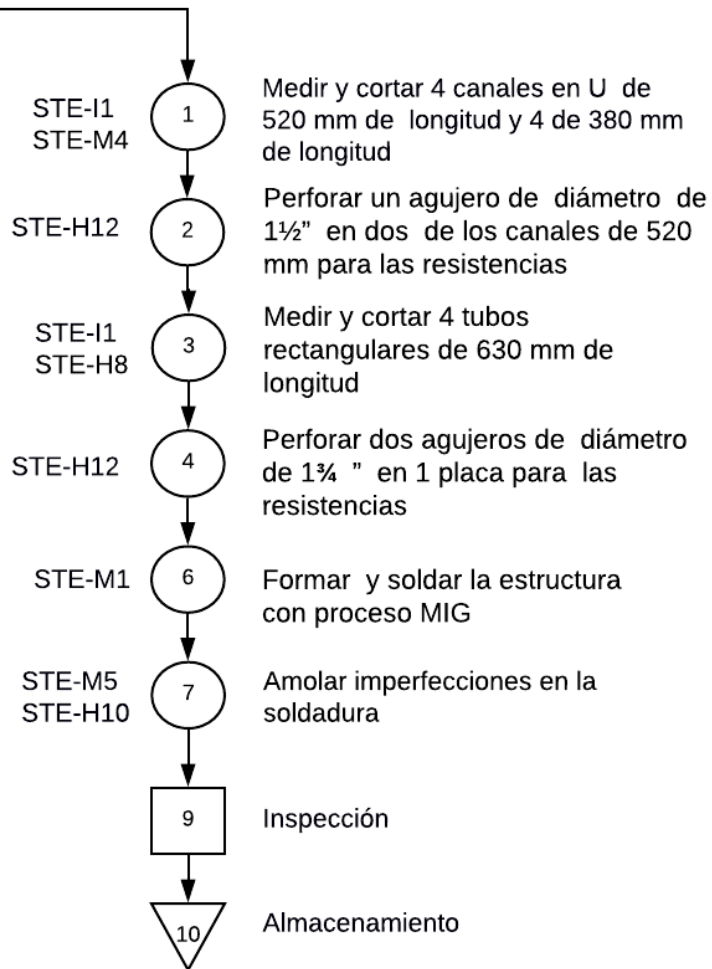


Figura 76. Diagrama de proceso de estructura de la cámara

4.2.3. Tubo para recubrimiento de resistencia

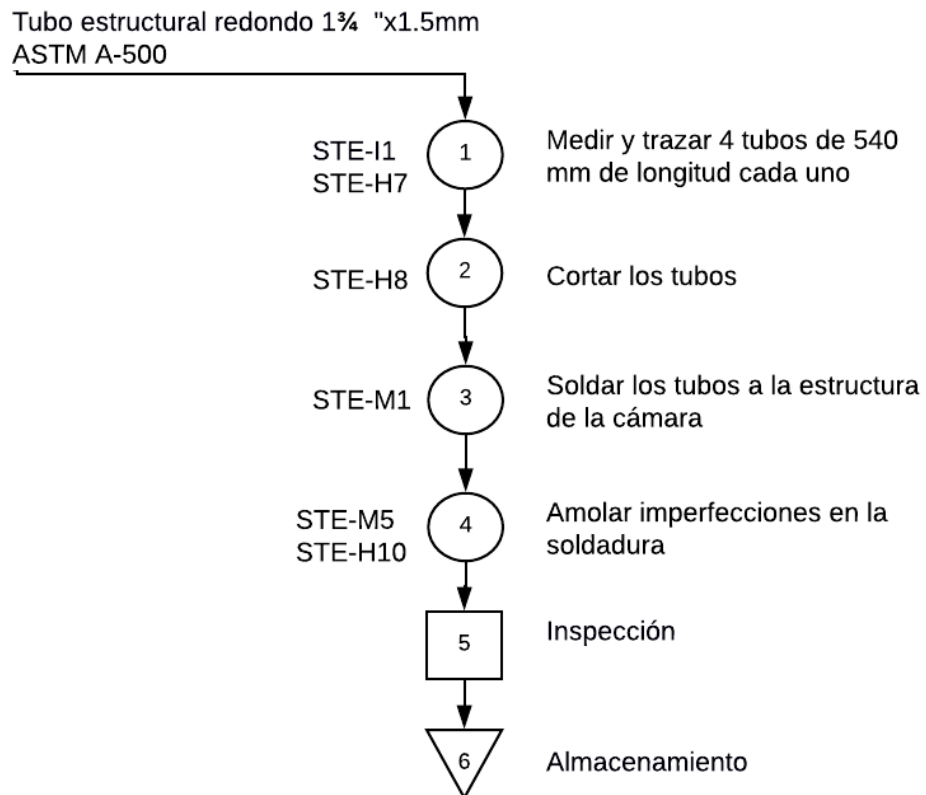


Figura 77. Diagrama de proceso de tubo para recubrimiento de resistencia



Figura 78. Tubo para recubrimiento de resistencia

4.2.4. Soporte de resistencia

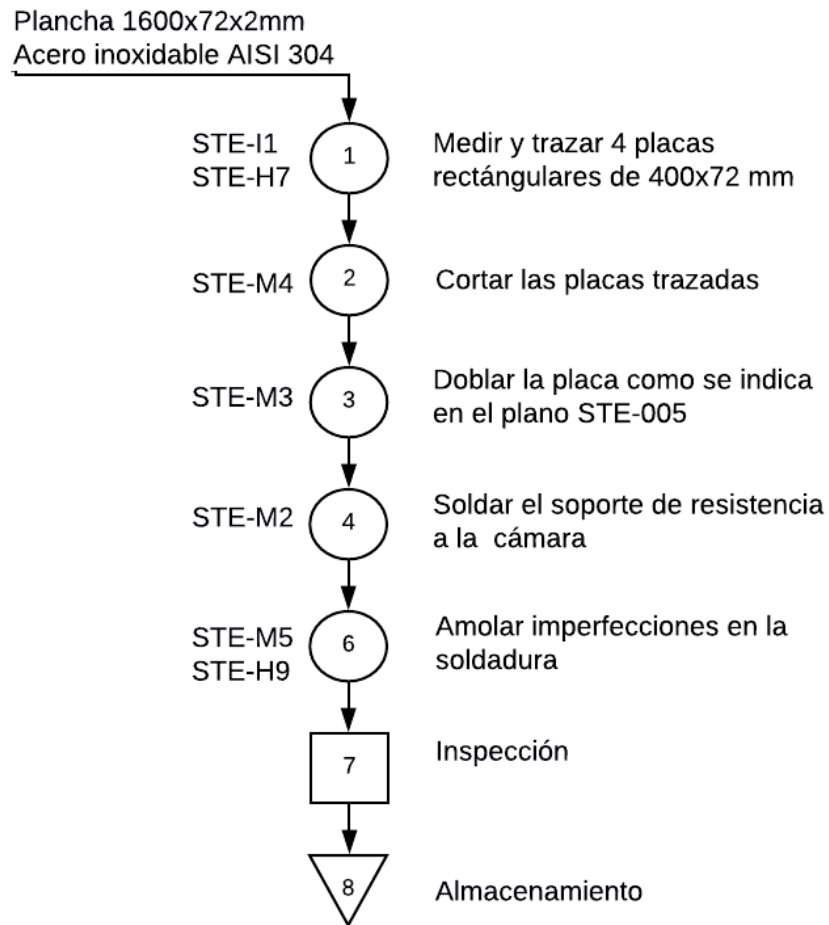


Figura 79. Diagrama de proceso de soporte de resistencia



Figura 80. Soporte de resistencia soldado a la cámara

4.2.5. Cubierta de la cámara

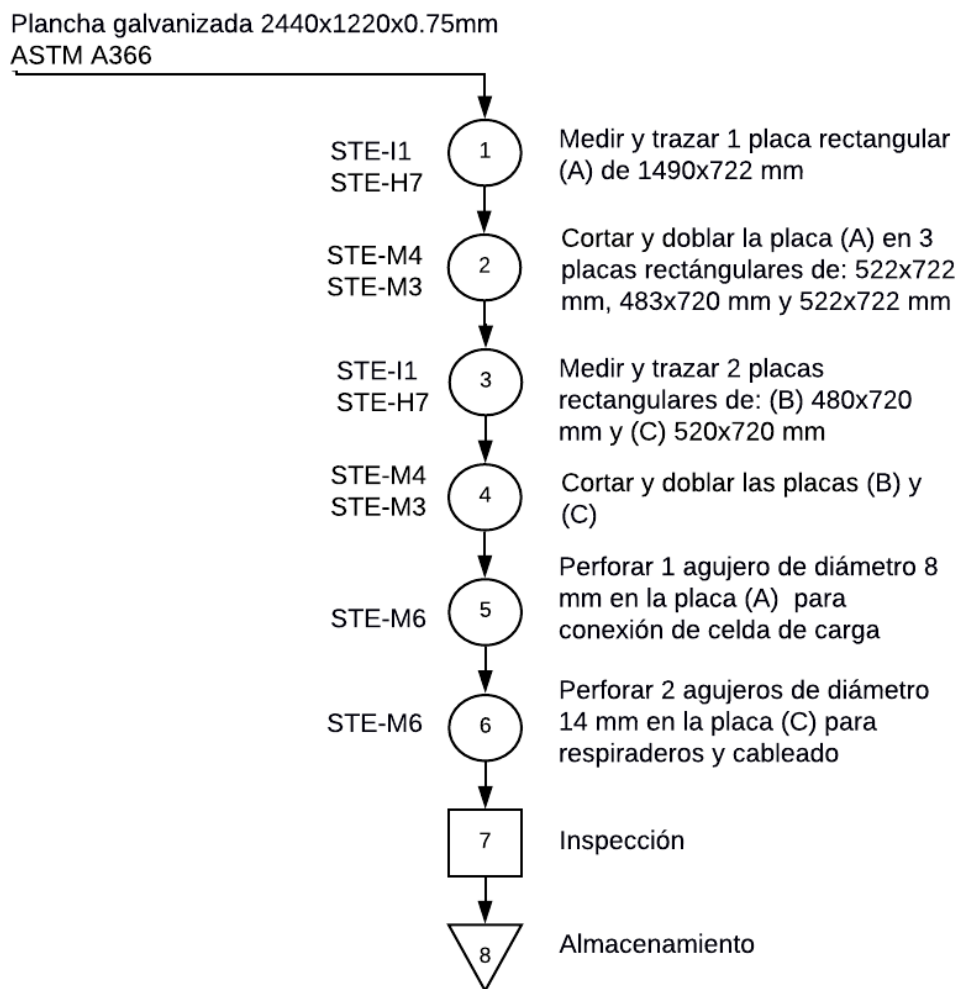


Figura 81. Diagrama de proceso de cubierta de la cámara

En la figura 82 se indica el proceso de doblado de la placa (A) que pertenece a la actividad 2 del diagrama de procesos, en la figura 83 se presenta las perforaciones con el taladro de pedestal para el cableado del sistema de calentamiento y respiradero de la cámara.



Figura 82. Proceso de doblado de la placa (A)



Figura 83. Perforación de la placa (C)

4.2.6. Puerta

Plancha 696*626x2 mm
Acero Inoxidable AISI 304

STE-H7
STE-M4

1

Trazar y cortar un cuadrado de 88x88 mm en cada esquina de la placa

STE-H7
STE-M4

2

Trazar y cortar en cada esquina una distancia 61 mm a una inclinación de 45° (ver plano STE-010)

CONTINÚA



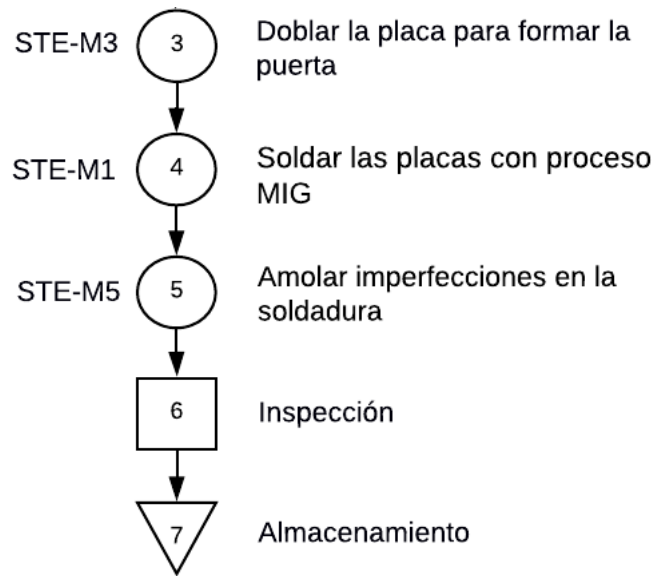


Figura 84. Diagrama de proceso de puerta

Como se puede observar en la figura 85 la puerta está construida de acero inoxidable, la estructura consta de una superficie hueca para colocar el aislante térmico para disminuir pérdidas de calor hacia el exterior.



Figura 85. Puerta

4.2.7. Cubierta de la puerta

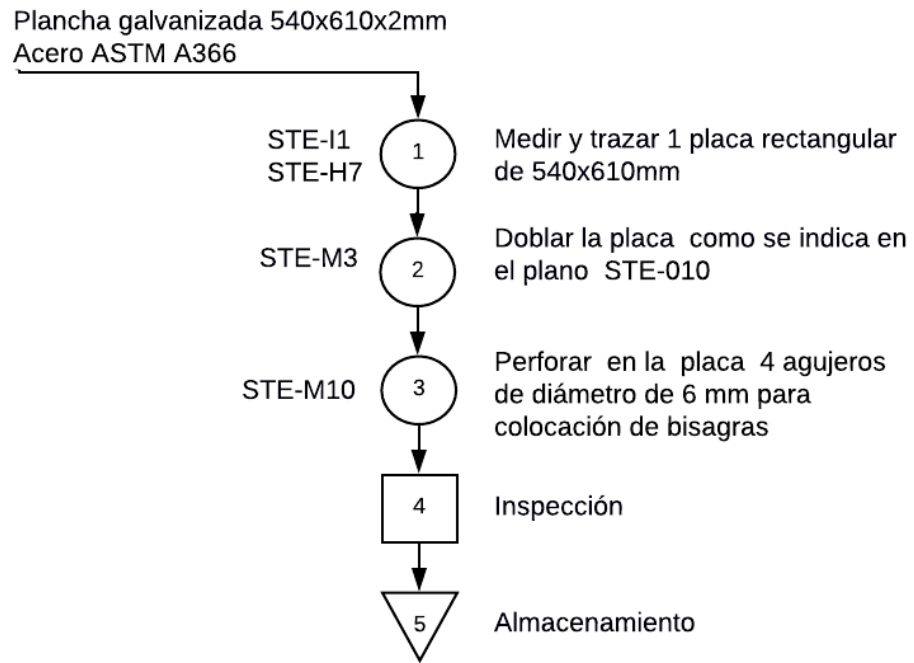


Figura 86. Diagrama de proceso de cubierta de la puerta



Figura 87. Cubierta de la puerta

4.2.8. Bandejas

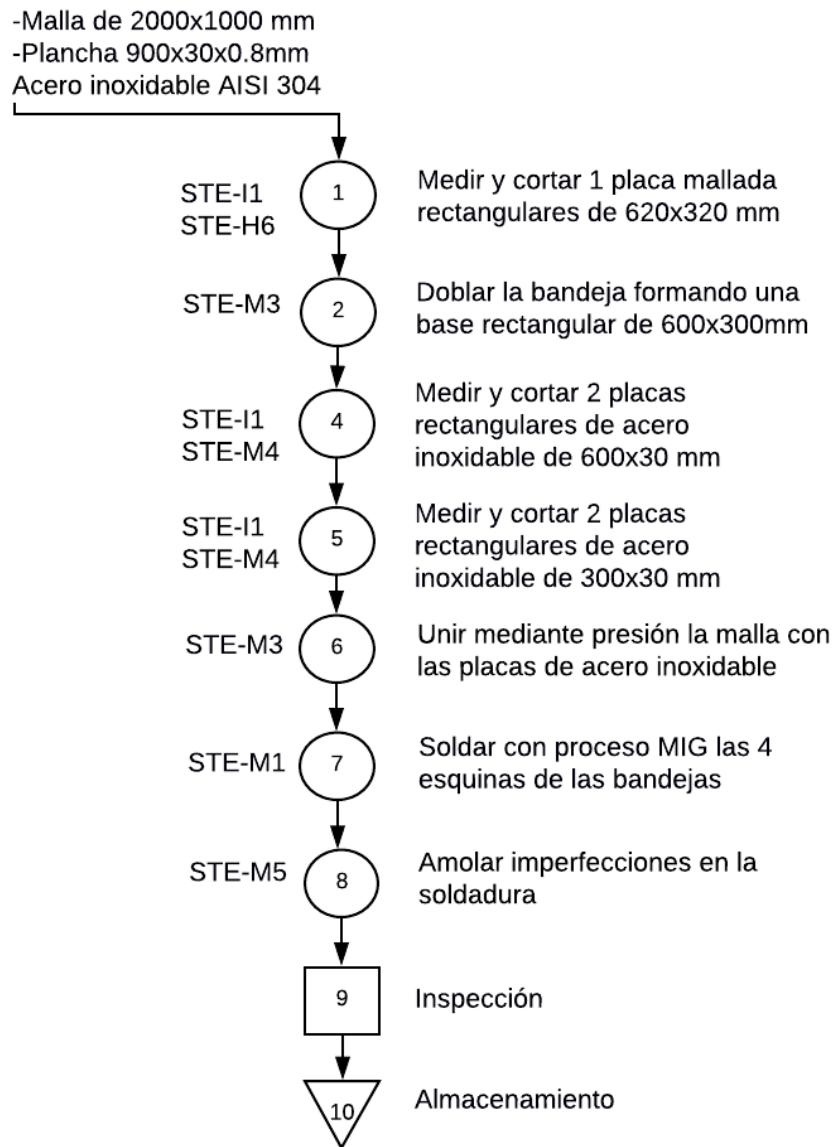


Figura 88. Diagrama de proceso de bandejas

En la figura 89 se muestra el corte de la malla de acero inoxidable en las esquinas, para después realizar el proceso de doblado indicado en la actividad 3 del diagrama de proceso, se realiza el proceso para 4 bandejas.



Figura 89. Corte de la malla de acero inoxidable

En la construcción de las bandejas se utilizó malla de acero de acero inoxidable para la base y para los lados laterales se empleó acero inoxidable AISI 304 (ver figura 90).

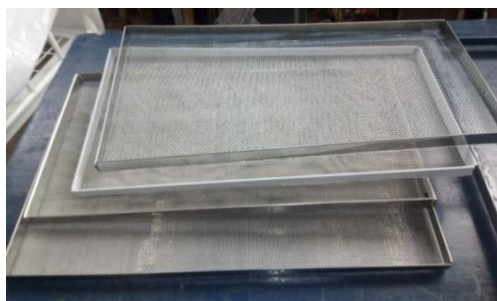


Figura 90. Bandejas

Debido a que en una bandeja se realizará el control constante del peso de los granos de cacao durante el proceso de secado con la celda de carga, en cada esquina de la bandeja se soldará un gancho para sujetar la bandeja a la celda de carga mediante un cable.



Figura 91. Ganchos en la bandeja para el pesaje

4.2.9. Soporte de bandejas

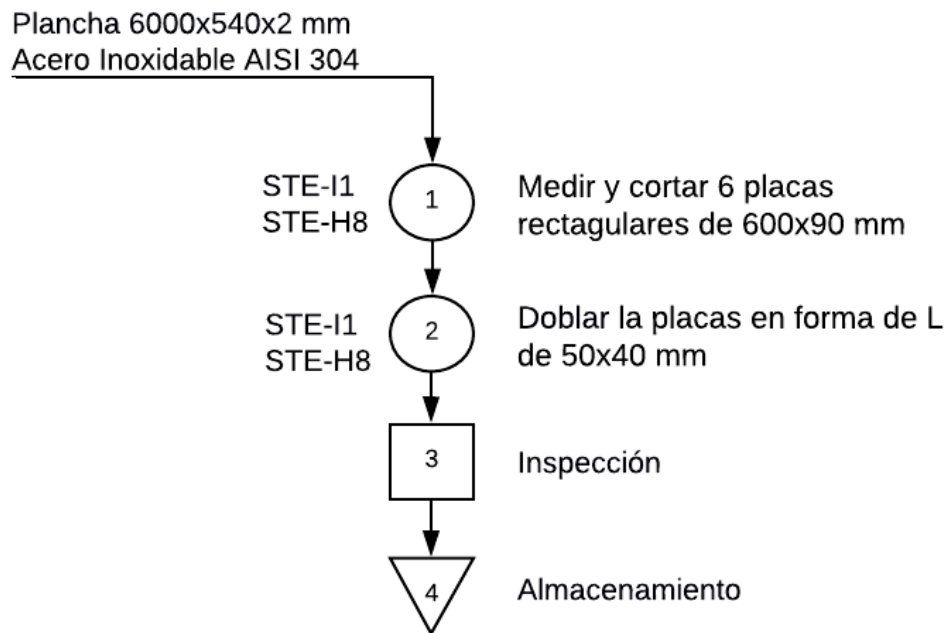


Figura 92. Diagrama de proceso del soporte de bandejas

En la figura 93 se indica un esquema de la disposición de los soportes de bandeja en el interior de la cámara.

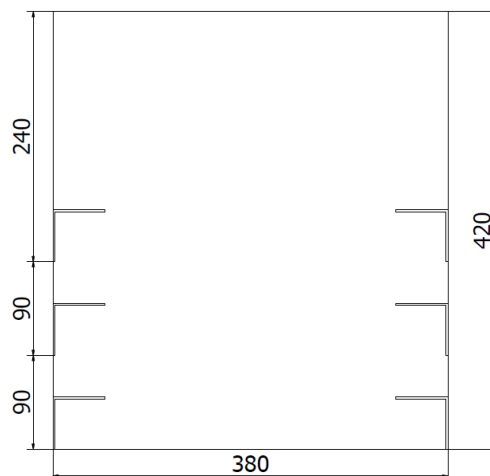


Figura 93. Disposición de soportes de bandejas

4.2.10. Soporte para el sistema

-Tubo estructural cuadrado 1"x1.2 mm
Acero ASTM A-500
-Perfil estructural ángulo "L" 1"x2 mm
Acero ASTM A-36

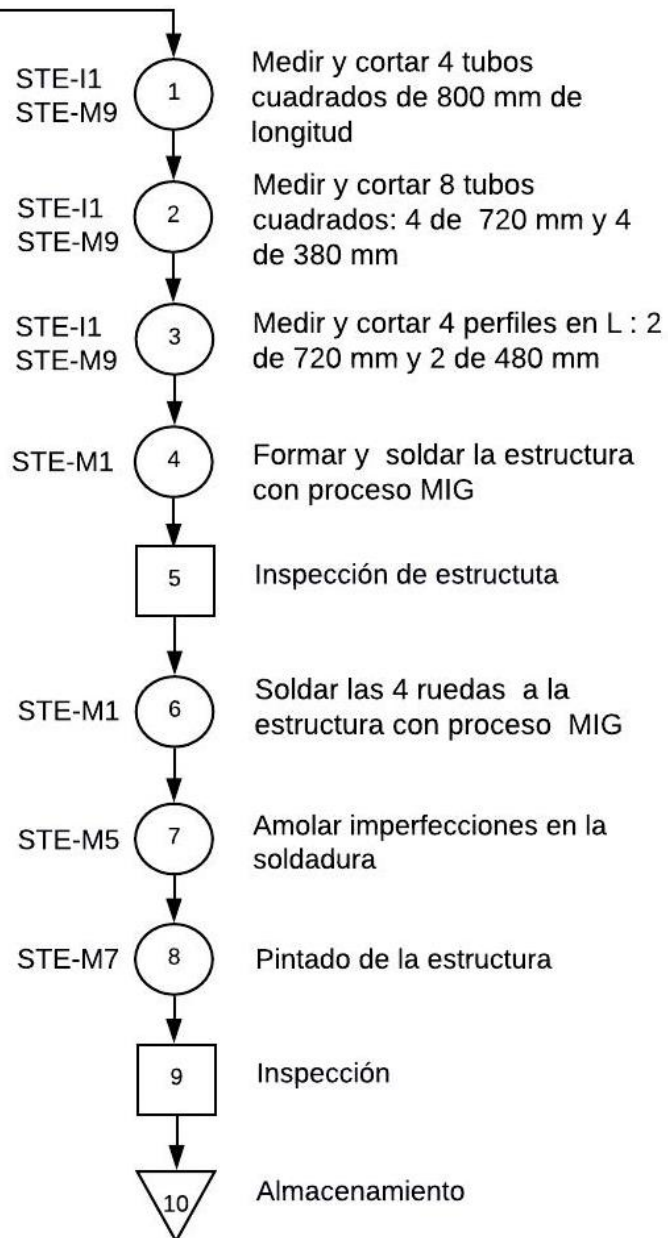


Figura 94. Diagrama de proceso del soporte para el sistema



(a)



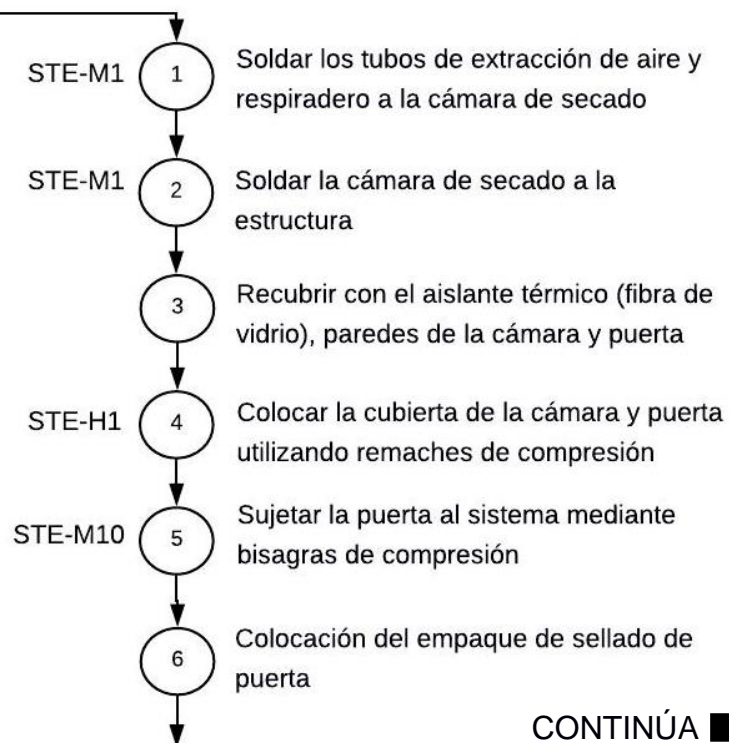
(b)

Figura 95. Soporte del sistema

Nota: (a) vista superior (b) vista lateral

4.2.11. Ensamblaje

Ensamblaje mecánico del sistema

CONTINÚA 

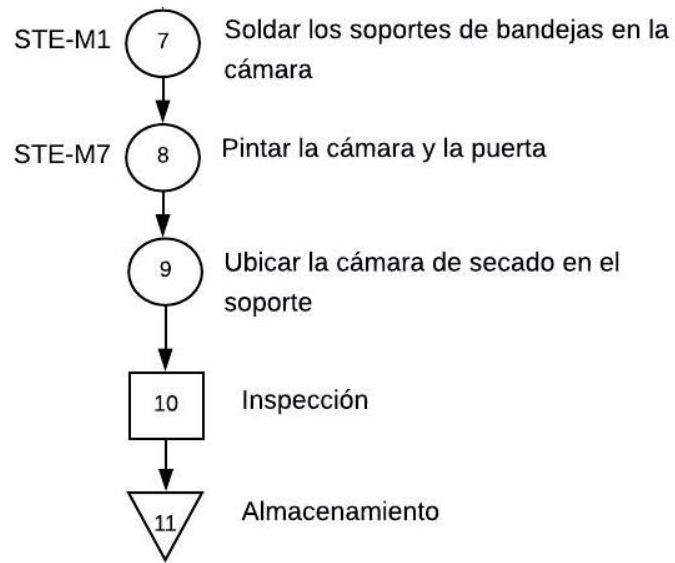


Figura 96. Ensamblaje mecánico del sistema



Figura 97. Colocación de aislante térmico en las paredes de la cámara



Figura 98. Ubicación de la cubierta en la cámara



Figura 99. Sujeción de la puerta a la cámara



Figura 100. Ensamblaje mecánico del sistema térmico energético

4.3. Implementación del sistema eléctrico/electrónico

Para el funcionamiento eléctrico/electrónico del sistema térmico-energético en la tabla 29 se indica el listado de los materiales utilizados y en la figura 101 se presenta el diagrama de proceso del montaje en el sistema.

Tabla 29.

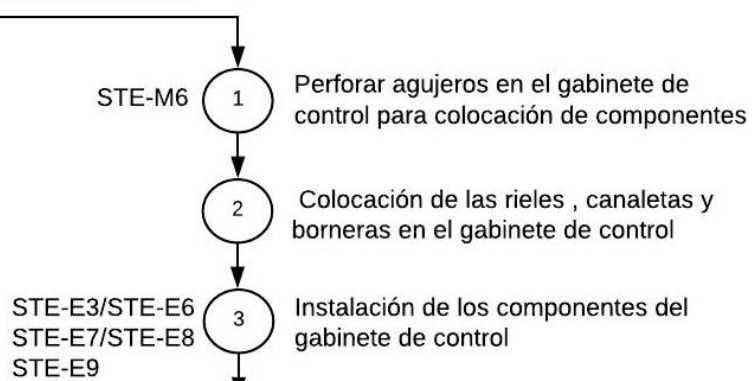
Listado de materiales eléctricos

Nº	Material	Características	Código
1	Resistencias eléctricas	Ductos cerámicos 110 V/200W	STE-E1
2	gabinete de control	Dimensiones:300x300 mm Acero galvanizado	STE-E2
3	Controlador electrónico de temperatura	Pantalla Digital Marca: CAMSCO Tipo: TC-72N Rango de funcionamiento: 0°C a 399°C	STE-E3
4	Bornera de baquelita	6 terminales	STE-E4
5	Enchufe	110 V	STE-E5
6	Switch ON/OFF	Dispositivo para encender las resistencias eléctricas	STE-E6
7	Breaker	Marca: LS Industrial Modelo: BKN-C40	STE-E7

CONTINÚA 

8	Luz piloto verde	-	STE-E8
9	Contactador	Marca: LS Industrial Modelo: MC-9B-AC120 Contacto principal de 3 polos (NO)	STE-E9
10	Cable sólido	1 rollo Cable #12	STE-E10
11	Cable gemelo	Calibre 14AWG	STE-E11
12	Termocupla tipo K	Rango de temperatura: 0 a 400 °C	STE-E12
13	Celda de carga y HX711	Carga: 10 kg Aleación de aluminio	STE-E13
14	Sensor DHT22 y AM2302	Rango de humedad: 0-100%RH Rango de temperatura: -40°C a 80 °C	STE-E14
15	Pantalla LCD	Visualización de datos Medidas:16x2	STE-E15
16	Potenciómetro	Resistencia variable	STE-E16
17	Arduino Mega 260	Modelo: Mega260	STE-E17
18	Cable UTP flexible	Cable de 4 pares calibre 24AW	STE-E18
19	Cables dupont	Cables para conexión con terminales macho hembra	STE-E19
20	Galleta electrónica	----	STE-E20
21	Caja para el sistema de adquisición de datos	Dimensiones: 200x200	STE-E21
22	Taype negro	---	STE-E22
23	Borneras	---	STE-E23
24	Cautín	Para soldar cables electrónicos Potencia: 40 W	STE-E24

Ensamblaje del sistema eléctrico



CONTINUÁ 

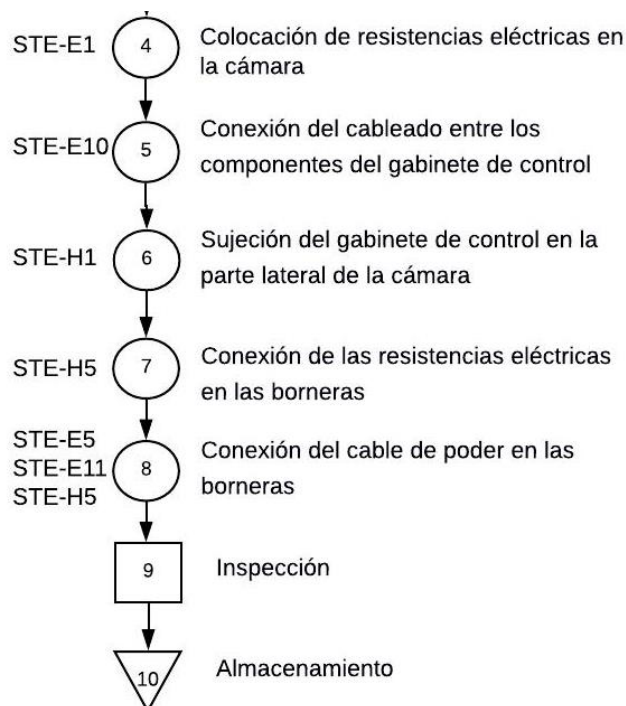


Figura 101. Diagrama de proceso del sistema eléctrico

En la figura 102 y 103 se indica la disposición de los componentes electrónicos en el gabinete del control para el encendido de las resistencias eléctricas y el control de temperatura en el interior de la cámara de secado y en la tabla 30 se presenta el nombre de cada componente.



Figura 102. Exterior del gabinete de control

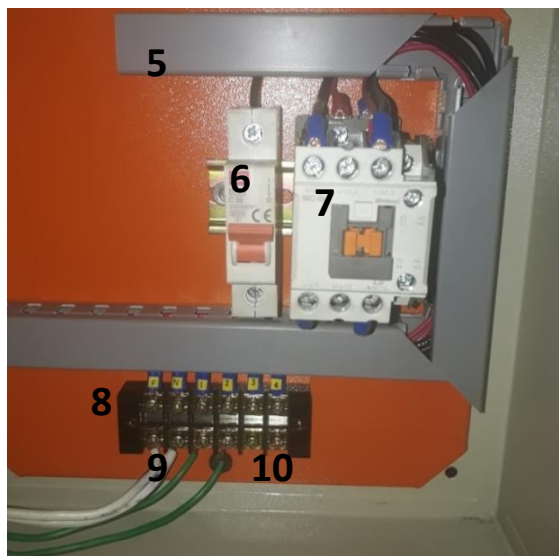


Figura 103. Interior del gabinete de control

Tabla 30.

Componentes del gabinete del control

Nº	Componente
1	Controlador electrónico de temperatura
2	Luz piloto verde
3	Switch ON/OFF
4	Seguro del gabinete del control
5	Canaletas
6	Breaker
7	Contactador
8	Bornera de baquelita
9	Conexión del cable de poder
10	Conexión de las resistencias eléctricas

Para la adquisición de los datos producidos durante el proceso de secado del cacao tipo CCN-51 y nacional se implementará un sistema de instrumentación en el sistema térmico-energético, en la figura 104 se indica el diagrama de proceso de ensamblaje de la instrumentación requerida.

Ensamblaje del sistema electrónico

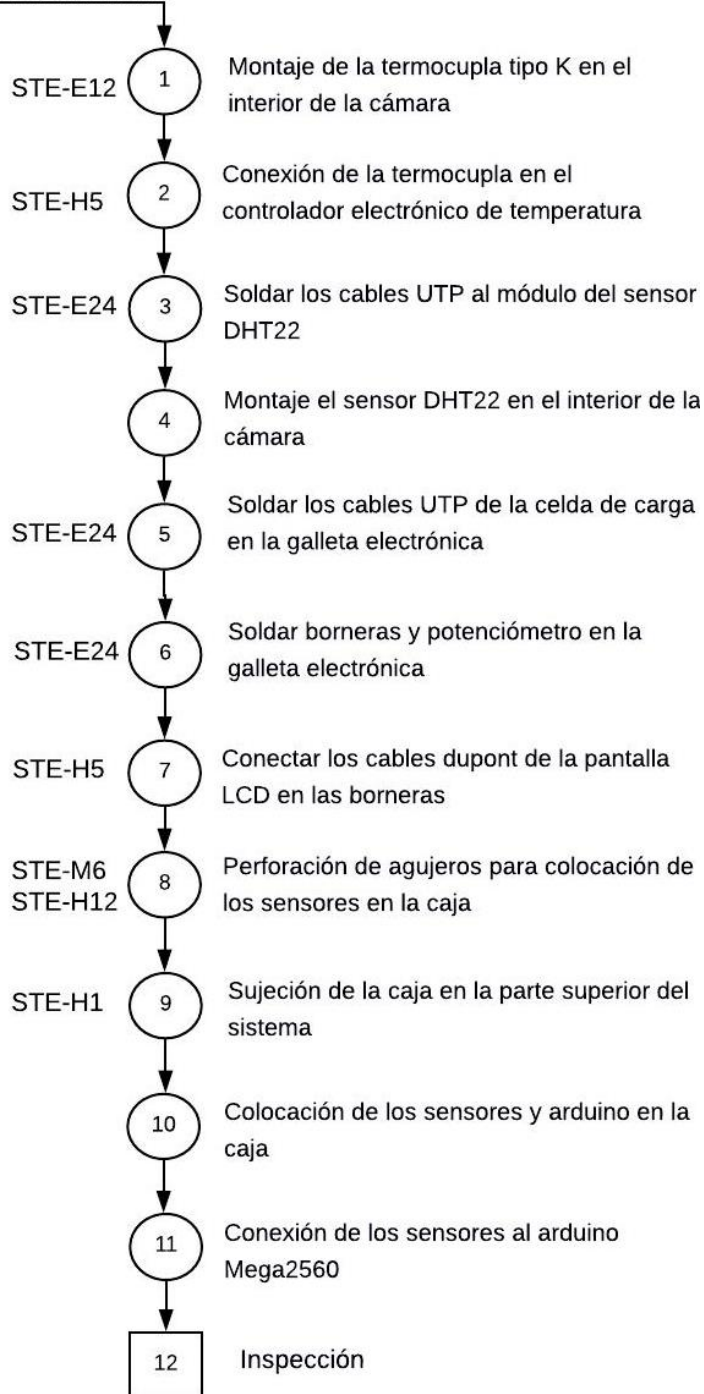


Figura 104. Diagrama de proceso de la instrumentación del sistema

En la figura 105 se indica la conexión de la termocupla tipo k en el controlador electrónico para visualizar en la pantalla la temperatura de las resistencias, conectada al contactor para que este encienda las resistencias hasta alcanzar la temperatura de 70 °C y después apagarlas automáticamente.

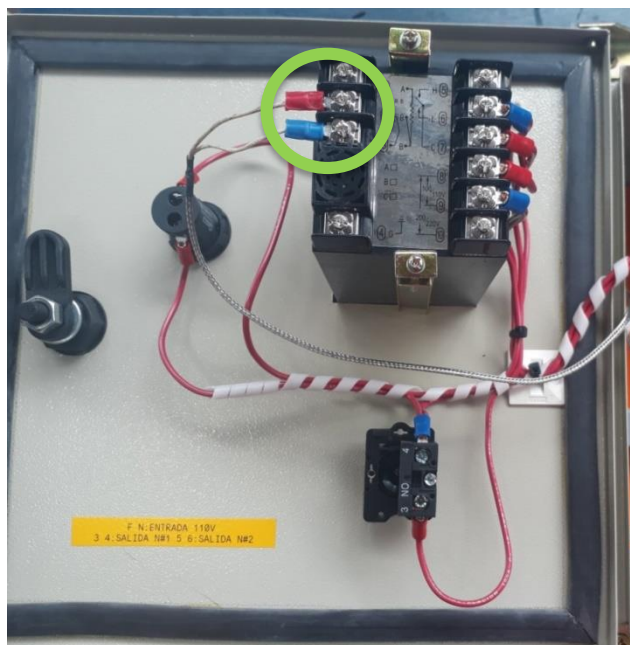


Figura 105. Conexión de la termocupla tipo K

La caja con la instrumentación para la adquisición de datos, figura 106, se colocó en la parte superior de la cámara con la finalidad de que la celda de carga sea la que soporte el peso de la bandeja para controlar el contenido de humedad de los granos de cacao en el interior de la cámara durante todo el proceso, visualizado en la pantalla LCD (figura 107).

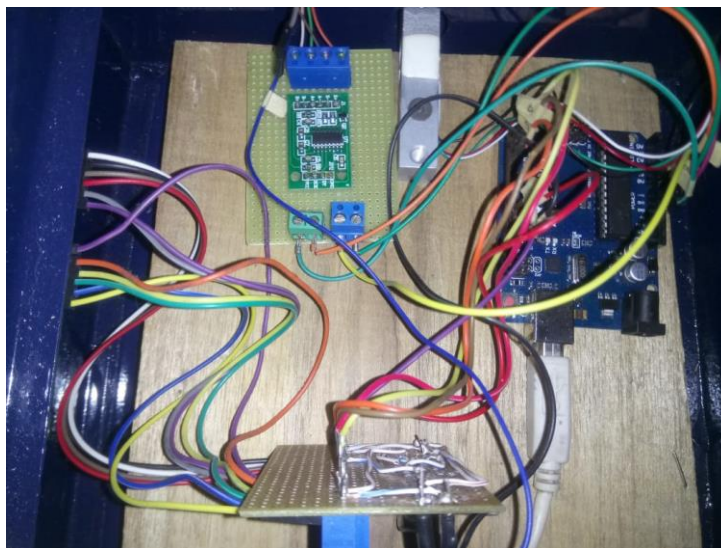


Figura 106. Instrumentación para adquisición de datos



Figura 107. Caja para instrumentos electrónicos

4.4. Pruebas de validación del sistema térmico-energético

Para la validación del sistema de calentamiento se midió la resistencia y amperaje de las resistencias eléctricas y los resultados de estas mediciones se indican en la tabla 31.

Tabla 31.*Medición de las resistencias eléctricas*

No de Resistencias	Amperaje [A]	Resistencia [Ω]	Potencia [W]
1	1.68	63.5	179.22
2	1.66	63.5	174.98
3	1.69	63.5	181.36
4	1.72	63.5	187.86
TOTAL			723.42

Para calcular el calor generado por cada resistencia eléctrica hacia la cámara se utilizará la ecuación 104:

$$Q = 0.24 * P * 3600 \quad (104)$$

$$Q = 0.24 * 723.42 * 3600$$

$$Q = 625.0349 \text{ [Kcal]}$$

$$Q = 726.78 \text{ [W]}$$

El calor entregado por las resistencias hacia la cámara de secado es igual a 726.78 W, el mismo que es mayor al requerido para el proceso de secado.

4.5. Eficiencia del sistema térmico-energético

$$\eta = \frac{Q_N}{Q} * 100 \quad (105)$$

$$\eta = \frac{643.882}{726.78} * 100$$

$$\eta = 88.5\%$$

La eficiencia del equipo para realizar las pruebas de secado en los granos de cacao CCN-51 y nacional es del 88.5%.

Para la validación del sistema se realizó un encendido del equipo en vacío y se comprobó el funcionamiento de los componentes mecánicos, eléctricos y electrónicos mediante un checklist como se observa en la tabla 32.

Tabla 32.

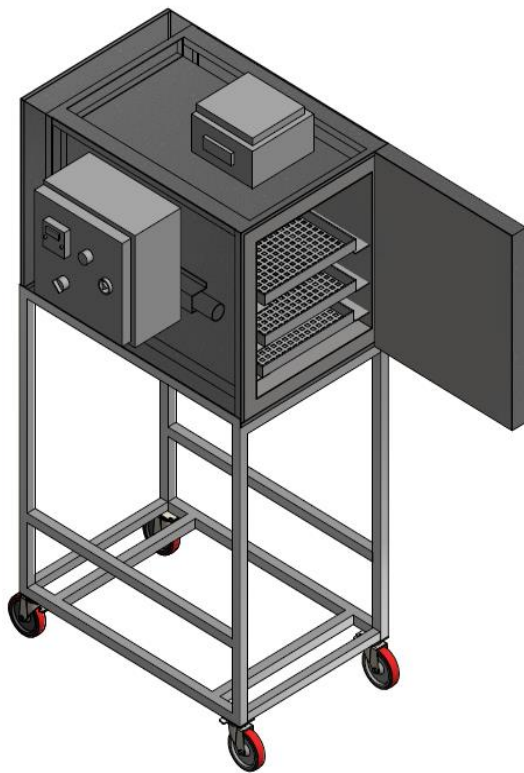
Checklist validación del sistema

VERIFICACIÓN	CONDICIÓN		OBSERVACIONES
	Aceptable	No Aceptable	
CÁMARA DE SECADO			
Posición de bandejas	X		
Soporte de bandejas	X		
Sellado de puerta	X		
Temperatura interna	X		Llega a la temperatura de secado (70°C) en 25 min
Humedad relativa	X		Inicia con una humedad relativa de 12%
GABINETE DE CONTROL			
Encendido del sistema	X		Se debe ubicar el switch en la posición ON
Encendido y apagado automático de resistencias	X		Cuando la temperatura en el interior de la cámara llega a 70°C las resistencias se apagan automáticamente y se encienden al disminuir la temperatura
Encendido de luz piloto	X		Se enciende o apaga dependiendo del estado de las resistencias
Controlador de temperatura	X		
Funcionamiento de termocupla tipo K	X		
Funcionamiento del contactor	X		
SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS			
Celda de carga	X		
Pantalla led	X		



Figura 108. Validación del sistema eléctrico/electrónico

Para tener una mejor perspectiva del desarrollo del sistema se representa el modelo en 3D y el equipo construido (ver figura 109).



(a)



(b)

Figura 109. Sistema
Nota: (a) Modelo en 3D, (b) Equipo construido

CAPÍTULO V

5. PROCESO DE SECADO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. Plan de pruebas

Para evaluar las condiciones óptimas de secado de los granos de cacao CCN-51 y nacional se realizan las pruebas según el método experimental de 3ⁿ (Nonhebel & Moss, 1979), siendo n el número de variables relevantes durante el proceso de secado, estas variables son:

1. Humedad del producto
2. Tiempo de secado

Con n=2, el número de pruebas a realizar por cada tipo de cacao será de 9 ensayos. Durante el funcionamiento del sistema térmico-energético se tomarán datos para determinar las curvas de secado de los granos de cacao, los mismos que se detallan en la tabla 33:

Tabla 33.
Parámetros a medir durante el proceso de secado

Nº	Parámetro	Denominación	Instrumento
1	Temperatura ambiente	T_{∞}	Higro-Termómetro
2	Humedad relativa del ambiente	HR	Higro-Termómetro
3	Temperatura de pared lateral	T_1	Termómetro infrarrojo
4	Temperatura de pared inferior	T_2	Termómetro infrarrojo
5	Temperatura de producto	T_p	Termómetro infrarrojo
6	Masa del producto	MS	Celda de carga
7	Humedad del producto	CHP	Higrómetro
8	Humedad relativa interna	HR_i	Sensor DHT22
9	Temperatura de secado	T_{sec}	Sensor DHT22
10	Tiempo de secado	t_{sec}	Cronómetro
11	Cantidad de agua removida	ΔW	-

Para la lectura de la masa del producto durante todo el proceso de secado será el peso de los granos de cacao de la bandeja 1 (ver figura 110), la cantidad de agua removida será calculada a partir de la masa del producto con la ecuación 49.

A continuación se indica la ubicación de los indicadores de medición que intervienen en el comportamiento del sistema térmico-energético.

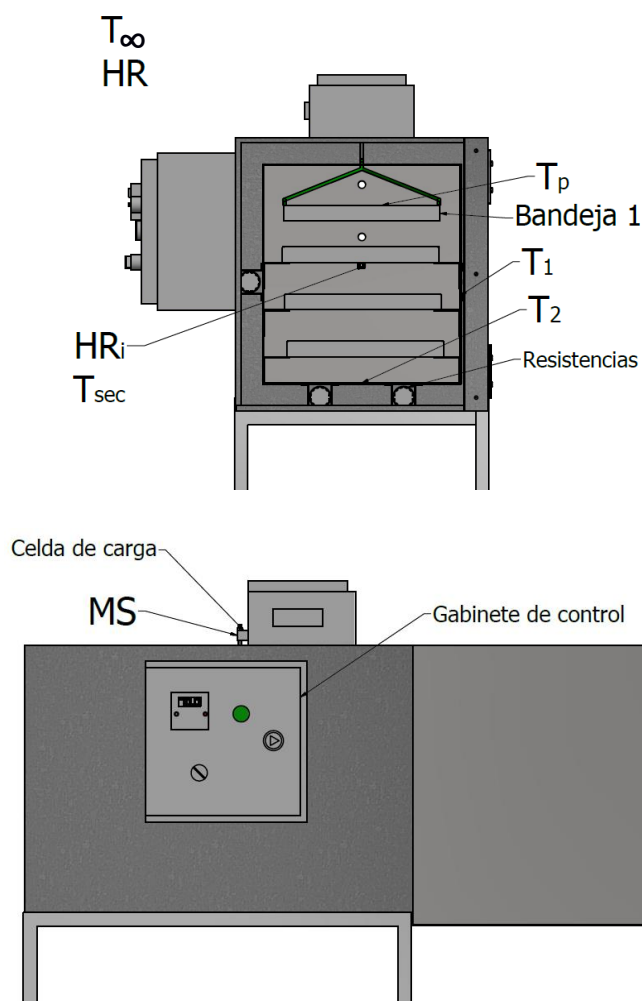


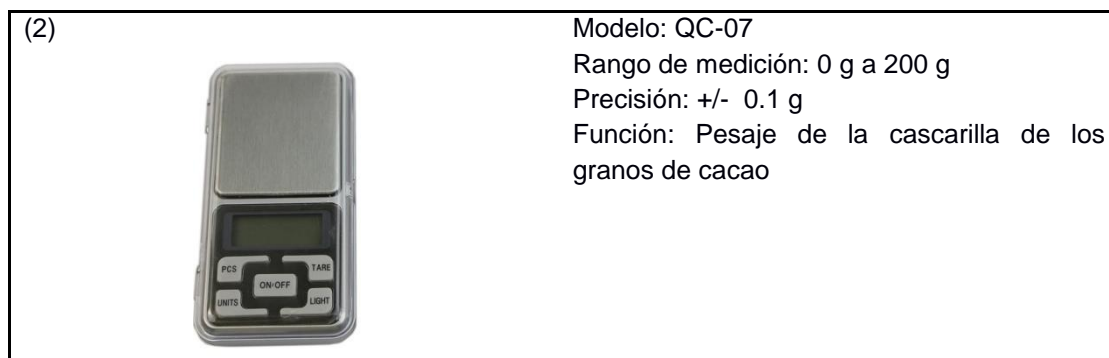
Figura 110. Ubicación de los indicadores de medición

En la tabla 34 se describe los instrumentos utilizados para la medición de los parámetros correspondientes al proceso de secado de los granos de cacao.

Tabla 34.
Características de instrumentos utilizados

Instrumento	Descripción
<p>Higró-Termómetro</p> 	<p>Modelo: Extech Big Digit Hygro-Thermometer 445703</p> <p>Rango de medición:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Humedad: 10 a 99% de HR ▪ Temperatura: -10 a 60 ° C. <p>Precisión: $\pm 5\%$ RH y $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$.</p> <p>Función: medición de la temperatura y humedad relativa del ambiente donde opera el sistema.</p>
<p>Termómetro de infrarrojo</p> 	<p>Modelo: Extech 42545</p> <p>Rango de temperatura: -50 a 1,000 °C,</p> <p>Emisividad ajustable</p> <p>Resolución de 0,1° hasta 199,9°</p> <p>Óptica de 50:1 (distancia al punto) y apuntador laser</p> <p>Función: medición de la temperatura del producto y paredes de la cámara del sistema.</p>
<p>pH-metro</p> 	<p>Modelo: EXTECH PH100</p> <p>Rango de medición:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ pH: 0.0 a 14.00 pH ▪ Temperatura: -5 a 90 ° C <p>Precisión: $\pm 0.01\text{pH}$, $1\text{ }^{\circ}\text{C}$</p> <p>Función: medir el pH de las soluciones que se obtiene del cacao más agua destilada.</p>
<p>Higrómetro</p> 	<p>Modelo: MD812</p> <p>Rango de medición: 5% a 40%</p> <p>Precisión: +/- 1%</p> <p>Función: medir el contenido de humedad de los granos de cacao.</p>
<p>Balanza Digital: (1)</p> 	<p>Modelo: SF-400</p> <p>Rango de medición: 0 g a 7000 g</p> <p>Precisión: +/- 1 g</p> <p>Función: Pesaje de los granos de cacao antes y después del proceso de secado.</p>

CONTINÚA 



5.2. Proceso para secado de los granos de cacao

Para realizar el secado de los granos de cacao se deberá seguir el siguiente procedimiento:

1. Conectar el sistema a la red eléctrica de 110 V, comprobar que el visualizador del control de temperatura se encienda.
2. Mover el switch a la posición ON, para encender las resistencias eléctricas.
3. Setear el controlador de temperatura a 70 °C para hacer el precalentamiento de la cámara sin las bandejas.
4. Pesar los granos de cacao y ubicarlos en las bandejas tratando de esparcir todo el producto de forma uniforme.
5. Cargar y correr el programa para adquisición de datos una vez que la cámara de secado haya llegado a la temperatura deseada
6. Ingresar las bandejas cargadas con el producto dentro de la cámara, completar este proceso de forma rápida para evitar pérdidas de calor en el interior de la cámara.
7. Tomar los datos del proceso de secado con un intervalo de 10 minutos cada uno.

8. Cada hora tomar datos en el interior de la cámara (temperatura de pared lateral $[T_1]$, de pared inferior $[T_2]$, y del producto $[T_p]$) para aprovechar los cambios de aire que se deben efectuar durante el proceso y realizar una remoción de los granos de cacao.
9. Cada tres horas intercalar el lugar de las bandejas y retirar un grano de cacao para verificar su estado y comprobar su humedad.
10. Concluido el proceso de secado, apagar el sistema colocando el switch en la posición OFF y desconectar de la red eléctrica.
11. Esperar que la cámara se enfríe y posteriormente retirar las bandejas.
12. Inspeccionar la textura y un pesaje final a los granos de cacao.
13. Almacenar el producto final en sacas y ubicarlos en un ambiente seco para que no adquiera humedad.

Este procedimiento se deberá seguir para las muestras de cacao nacional y CCN-51

5.3. Preparación de las muestras de cacao

Para el proceso de secado, los granos de cacao extraídos de la mazorcas contienen un contenido de humedad del 60%, (ver figura 111), después deben ser fermentados 2 días en sacos de yute para que el contenido de humedad disminuya a 40%, durante todo este proceso se elimina el mucilago que cubre a los granos de cacao (Anecacao, 2015).



Figura 111. Granos de cacao en baba

Pesar los granos de cacao, para la realización de las pruebas se colocó 3 kg de producto en cada bandeja (ver figura 112), debido al número de pruebas a realizarse la finca Albita nos proporcionó 120 kg de cada tipo de cacao.

Con la celda de carga se realiza el pesaje continuo de los granos de cacao en una bandeja dentro de la cámara de secado para determinar teóricamente el porcentaje de humedad del producto durante todo el proceso de secado.



Figura 112. Peso inicial de los granos de cacao

5.4. Pruebas de secado

Para evaluar las condiciones óptimas del secado se realizaron 9 ensayos para cada tipo de cacao.

5.4.1. Ensayo de secado del cacao tipo CCN-51

A continuación se presentan los resultados obtenidos durante el proceso de secado de los granos de cacao CCN-51, en la tabla 35 se observan los datos obtenidos del ensayo 7 que es el más representativo para realizar los análisis del proceso de secado de los granos de cacao CCN-51. Los datos de MS2 son la masa seca de la bandeja 2.



Figura 113. Producto cargado en la cámara de secado


Tabla 35.

Resultados del secado para cacao CCN-51

Nº	t _{sec} [min]	T _∞ [°C]	HR [%]	T ₁ [°C]	T ₂ [°C]	T _p [°C]	HR _i [%]	T _{sec} [°C]	MS [kg]	CHP [%]	MS2 [kg]	CHP2 [%]	ΔW [kg]
1	0	20.6	44	48.1	94	22	13.3	68.5	3.000	40.00	3.000	40.00	0.0000
2	10	20.7	44				27.8	62.4	2.964	39.01	2.946	38.52	0.0998
3	20	21	45				29.6	63.6	2.916	37.69	2.895	37.11	0.2018
4	30	21.1	46				31.3	64.5	2.895	37.11	2.850	35.88	0.2664
5	40	21.1	46				34.7	65.2	2.826	35.22	2.805	34.64	0.3672
6	50	21	45				34.9	67.1	2.784	34.06	2.766	33.57	0.4338
7	60	20.9	43	70.8	92.8	66.9	21.4	66.9	2.748	33.07	2.718	32.25	0.4994
8	70	20.8	41				18.6	67.3	2.709	32.00	2.688	31.42	0.5482
9	80	21	41				25.3	66.9	2.682	31.26	2.646	30.27	0.5965
10	90	21.1	40				26.4	68.1	2.655	30.51	2.622	29.61	0.6290
11	100	20.9	41				26.9	68.3	2.616	29.44	2.589	28.70	0.6719
12	110	20.8	40				31.5	68.9	2.598	28.95	2.559	27.87	0.7011

CONTINÚA 

13	120	21.1	40	72.3	97.6	63.5	20.2	65.0	2.562	27.96	2.517	26.72	0.7442
14	130	21.4	38				17.9	66.1	2.529	27.05	2.493	26.06	0.7717
15	140	21.5	38				23.5	66.4	2.508	26.47	2.466	25.32	0.7957
16	150	21.3	37				25.4	67.2	2.478	25.65	2.436	24.49	0.8230
17	160	21.3	37				28.7	68.3	2.451	24.90	2.406	23.67	0.8479
18	170	21.3	37				29.6	68.5	2.427	24.24	2.382	23.01	0.8673
19	180	21.3	37	83.1	103.8	64.4	19.5	66.7	2.409	23.75	2.361	22.43	0.8829
20	190	21.7	36				17.3	66.9	2.385	23.09	2.340	21.85	0.8988
21	200	21.9	38				21.4	67.3	2.361	22.43	2.313	21.11	0.9171
22	210	22.1	38				24.8	68.4	2.337	21.77	2.292	20.53	0.9312
23	220	21.8	37				26.1	69.6	2.322	21.36	2.271	19.95	0.9436
24	230	21.5	38				26.9	69.8	2.295	20.61	2.247	19.29	0.9580
25	240	21.5	38	88.4	97.5	61.3	19.1	65.1	2.274	20.04	2.220	18.55	0.9724
26	250	21.6	39				18.8	66.3	2.256	19.54	2.202	18.06	0.9818
27	260	22	39				20.2	67.8	2.241	19.13	2.184	17.56	0.9906
28	270	22.2	39				24.3	68.8	2.217	18.47	2.157	16.82	1.0031
29	280	22.4	39				24.6	69.4	2.196	17.89	2.136	16.24	1.0121
30	290	22.2	38				26.5	69.6	2.175	17.31	2.124	15.91	1.0167
31	300	22.3	39	88.7	98.8	67.1	18.3	66.9	2.154	16.74	2.100	15.25	1.0259
32	310	22.2	38				17.6	67.1	2.136	16.24	2.082	14.76	1.0323
33	320	22.1	37				19.4	67.7	2.118	15.75	2.064	14.26	1.0382
34	330	22.3	37				19.9	68.3	2.094	15.09	2.040	13.60	1.0454
35	340	22.3	38				21.3	68.9	2.073	14.51	2.016	12.94	1.0523
36	350	22.4	37				22.4	69.2	2.058	14.10	1.998	12.45	1.0571
37	360	22.4	37	88.5	92.6	70.1	18.6	68.4	2.046	13.77	1.980	11.95	1.0621
38	370	22.6	37				16.5	68.5	2.031	13.35	1.962	11.46	1.0664
39	380	23	37				17.2	68.8	2.016	12.94	1.947	11.04	1.0693
40	390	22.9	38				18.6	68.9	2.004	12.61	1.920	10.30	1.0767
41	400	22.8	38				19.7	69.1	1.983	12.03	1.908	9.97	1.0769
42	410	22.9	38				20.3	69.9	1.968	11.62	1.902	9.81	1.0759
43	420	22.8	38	86.7	93.1	67.1	16.8	67.2	1.956	11.29	1.893	9.56	1.0764
44	430	23	37				16.6	67.7	1.938	10.80	1.884	9.31	1.0754
45	440	23	37				15.3	68.3	1.923	10.38	1.875	9.06	1.0749
46	450	23	37				16.8	68.6	1.914	10.14	1.866	8.82	1.0757
47	460	22.9	38				17.1	69.0	1.899	9.72	1.848	8.32	1.0777
48	470	23	37				19	69.5	1.884	9.31	1.839	8.07	1.0767
49	480	23	37	85.3	102.5	65.9	17.3	67.7	1.872	8.98	1.830	7.83	1.0763
50	490	23.1	37				17.6	68.1	1.857	8.57	1.818	7.50	1.0758
51	500	22.5	36				18.2	70.1	1.845	8.24	1.812	7.33	1.0743

CONTINÚA 

52	510	21.7	36				19.1	70.2	1.833	7.91	1.806	7.17	1.0726
53	520	22.2	38				19.3	70.2	1.821	7.58	1.800	7.00	1.0708
54	530	22.3	39				19.4	70.0	1.815	7.41	1.797	6.92	1.0699
55	540	22.4	39	86.7	105.9	68.8	12.9	69.8	1.806	7.17	1.794	6.84	1.0681
\bar{X}	21.9	39					61.7	21.7	67.9				
X_{\max}	23.1	46					70.1	34.9	70.2				
X_{\min}	20.6	36					22	12.9	62.4				

En la tabla 36 se observa los resultados finales del proceso de secado para los granos de cacao CCN-51 en un tiempo de secado igual a 9 horas o 540 minutos con una temperatura de secado de 67.9 °C. El peso de los granos en cada bandeja se realizó con la balanza.

Tabla 36.

Resultados del ensayo de secado en el cacao CCN-51

Parámetro	Granos antes del secado	Granos después del secado
Peso [kg]	Bandeja 1	3.0
	Bandeja 2	3.0
	Bandeja 3	3.0
	Bandeja 4	3.0
	Total	12
Porcentaje de contenido de humedad [%]	40	8.02
Cantidad de agua de remoción [kg]	0	4.40

En la bandeja 1 con la celda de carga se obtuvo un peso final de $MS_p = 1.806$ [kg] y con la balanza un peso de $MS_T = 1.928$ [kg], para obtener el error de la celda carga se expresa:

$$e\% = \frac{MS_p - MS_T}{MS_T} * 100$$

$$e\% = \frac{1.806 - 1.928}{1.928} * 100$$

$$e\% = 6.32\%$$



Figura 114. Granos de cacao seco CCN-51



Figura 115. Medición de humedad con el higrómetro

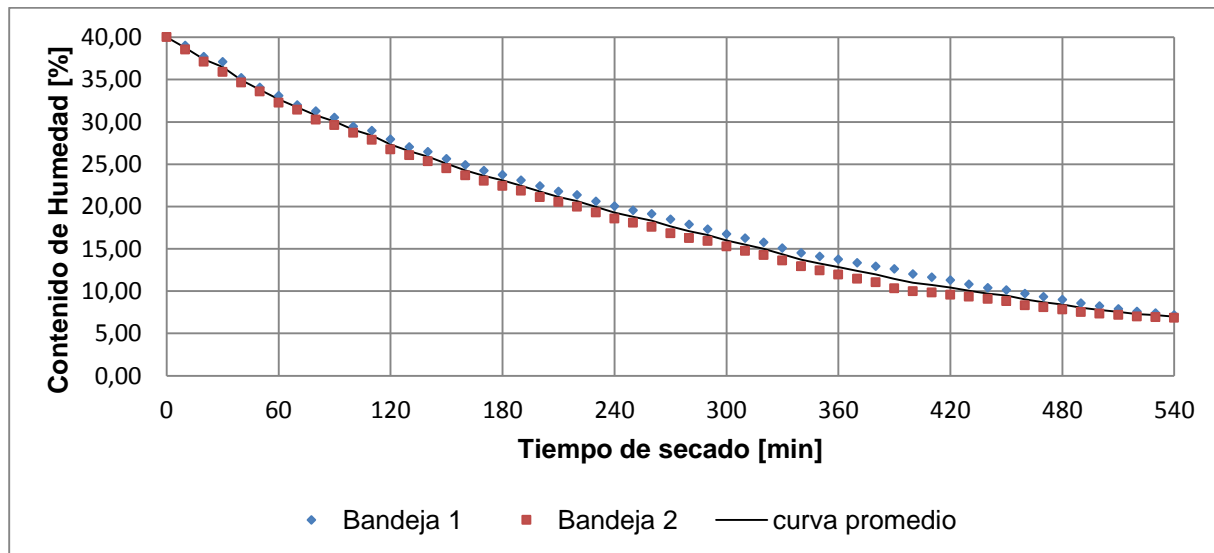


Figura 116. Curva de secado del cacao CCN-51

En la figura 116 se indica la curva de secado de los granos de cacao CCN-51 de la bandeja 1 y la bandeja 2, se observa una disminución del porcentaje de humedad del 40% al 7.1% en un período de tiempo de 9 horas, la curva de secado promedio es de $y = 8 * 10^{-5} x^2 - 0.1006 x + 38.589$, dónde “y” representa el contenido de humedad en cada intervalo de tiempo de secado “x” con un coeficiente de determinación igual a 0.998 que es la variación de los datos con relación a la curva de promedio.

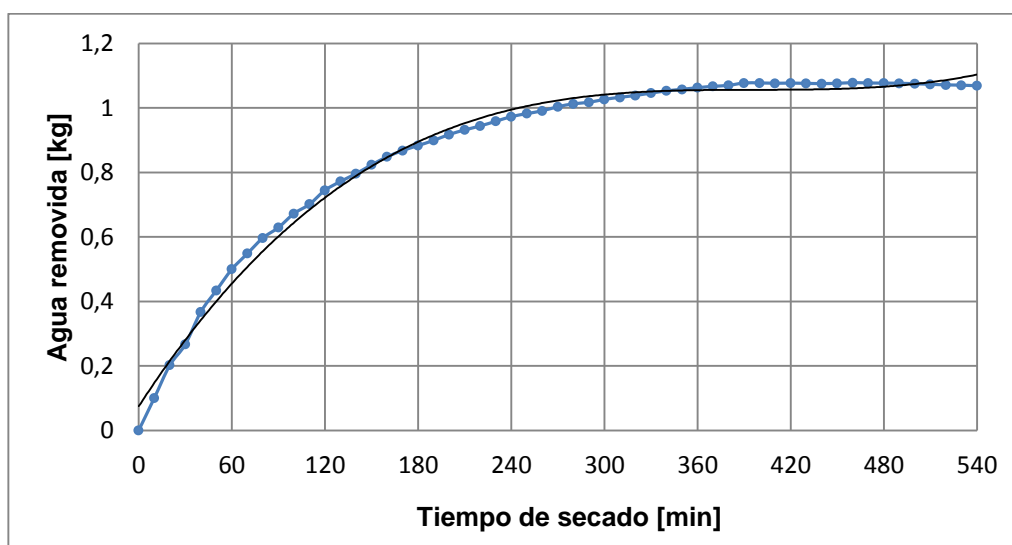


Figura 117. Diagrama de agua removida en los granos de cacao CCN-51

En la figura 117 se indica la cantidad de agua removida durante el tiempo de secado, desde 0 kg de agua removida hasta 1.0646 kg para una masa de producto igual a 3 kg, la curva de tendencia es $y = 2 * 10^{-8} x^3 - 2 * 10^{-5} x^2 + 0.0074 x + 0.746$ con un coeficiente de determinación igual a 0.9936.

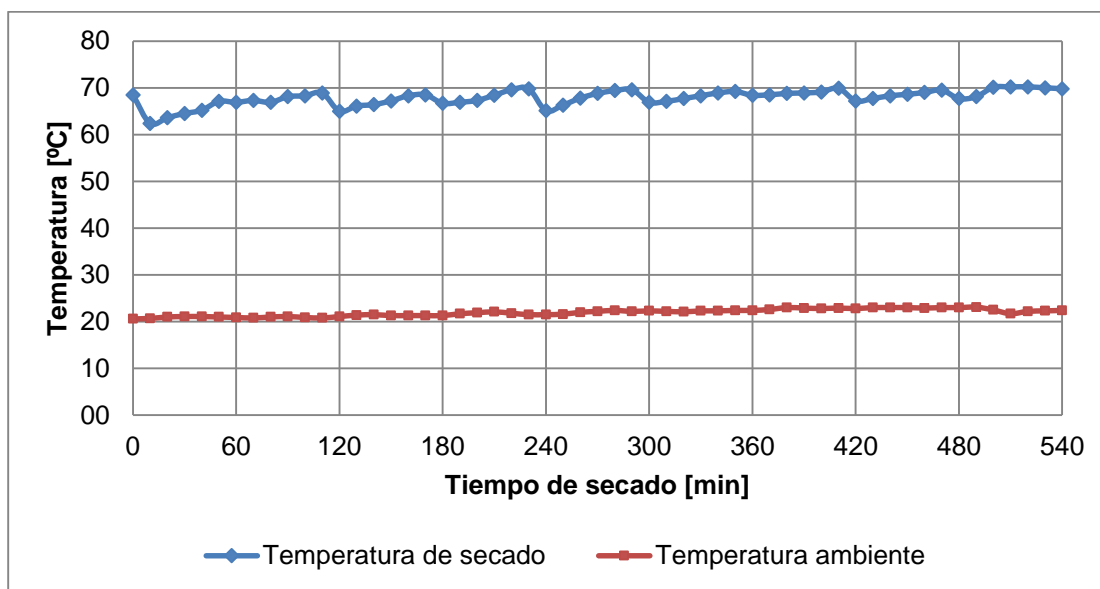


Figura 118. Diagrama de temperatura exterior y de secado

En la figura 118 se indica la curva de la temperatura ambiente y la temperatura de secado en el interior de la cámara durante el tiempo de secado, con una temperatura ambiente promedio de 21.9 °C y una temperatura de secado promedio de 67.9 °C.

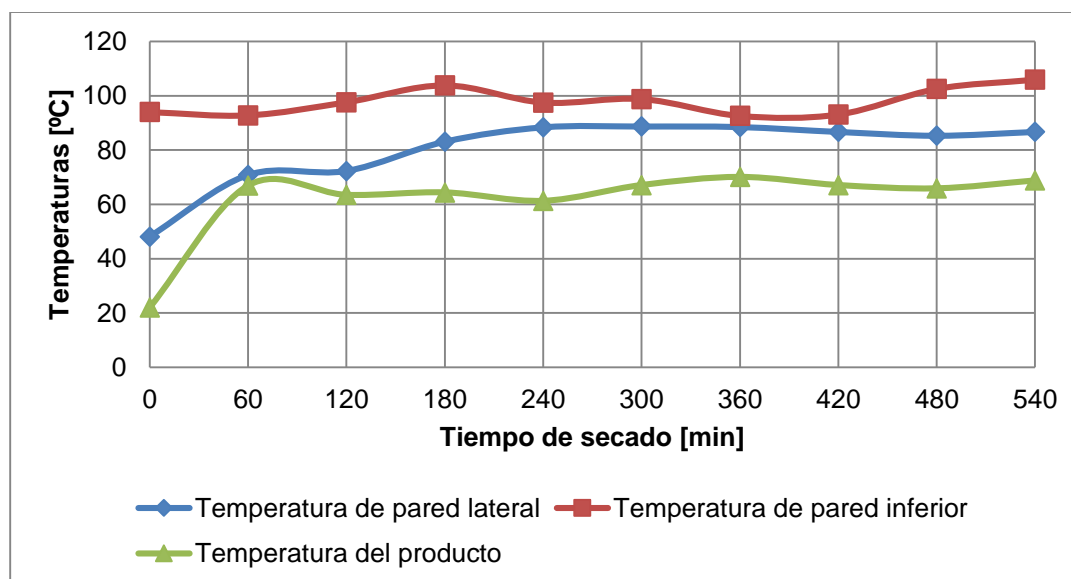


Figura 119. Diagrama de temperatura de pared lateral, inferior y producto

En la figura 119 se indica las curvas de temperatura de pared lateral, temperatura de pared inferior y temperatura del producto en el interior de la cámara, obteniendo una mayor temperatura en la pared inferior que en la pared lateral debido a que existen 2 resistencias eléctricas en contacto con la pared inferior y 1 en cada pared lateral, mientras que la temperatura de producto se aproxima a la temperatura de secado.

5.4.2. Ensayo de secado para cacao tipo nacional

Para el ensayo de secado de los granos de cacao tipo nacional se siguió el mismo procedimiento que para el tipo CCN-51, en la figura 120 se muestra el cacao nacional en las bandejas en el interior de la cámara.



Figura 120. Cacao nacional en la cámara de secado

En la tabla 37 se presenta los resultados finales para el proceso de secado de los granos de cacao nacional, perteneciente al ensayo 9.

Tabla 37.
Resultados del secado para cacao nacional

Nº	t _{sec} [min]	T _∞ [°C]	HR [%]	T ₁ [°C]	T ₂ [°C]	T _p [°C]	HR _i [%]	T _{sec} [°C]	MS [kg]	CHP [%]	MS2 [kg]	CHP2 [%]	ΔW [kg]
1	0	20.3	44	61.2	94.6	22.5	12.5	68.4	3.000	40.00	3.000	40.00	0
2	10	19.8	46				22.4	70.2	2.955	38.76	2.940	38.35	0.1318
3	20	20.3	46				27.6	70.3	2.919	37.77	2.886	36.87	0.2416
4	30	23.9	43				28.9	71.2	2.877	36.62	2.835	35.46	0.3371
5	40	22.1	43				29.0	72.2	2.826	35.22	2.787	34.14	0.4189
6	50	21.0	43				33.8	72.4	2.790	34.23	2.745	32.99	0.4866
7	60	21.0	42	76.5	97.7	59.6	39.5	69.6	2.736	32.74	2.700	31.75	0.5512
8	70	21.0	42				16.2	68.9	2.700	31.75	2.658	30.60	0.6098
9	80	20.8	42				16.4	69.2	2.661	30.68	2.616	29.44	0.6637
10	90	20.9	43				21.9	70.6	2.631	29.85	2.580	28.45	0.7079
11	100	20.9	43				28.0	72.5	2.604	29.11	2.550	27.63	0.7421
12	110	21.0	43				28.6	70.5	2.574	28.29	2.523	26.88	0.7696
13	120	21.2	44	69.0	99.3	58.8	32.2	69.5	2.553	27.71	2.499	26.22	0.7946
14	130	21.2	42				16.2	64.8	2.526	26.97	2.475	25.56	0.8165
15	140	20.9	42				18.4	62.5	2.505	26.39	2.445	24.74	0.8466
16	150	20.9	44				21.5	69.7	2.481	25.73	2.418	24.00	0.8707
17	160	20.9	43				23.7	68.1	2.466	25.32	2.397	23.42	0.8899
18	170	20.9	42				26.8	62.3	2.442	24.66	2.373	22.76	0.9085
19	180	21.0	41	77.5	94.8	60.2	29.9	68.5	2.421	24.08	2.355	22.26	0.9207
20	190	21.1	44				15.5	64.0	2.403	23.58	2.334	21.69	0.9366
21	200	21.3	46				17.2	67.5	2.379	22.92	2.313	21.11	0.9495
22	210	21.4	44				19.5	69.0	2.352	22.18	2.289	20.45	0.9635
23	220	21.4	45				24.3	70.0	2.334	21.69	2.274	20.04	0.9712
24	230	21.4	45				29.6	71.4	2.307	20.94	2.250	19.38	0.9836
25	240	21.5	47	78.2	91.3	64.1	33.7	70.8	2.286	20.37	2.226	18.72	0.9977
26	250	21.5	45				12.6	71.5	2.262	19.71	2.202	18.06	1.0096
27	260	21.5	44				10.8	72.6	2.241	19.13	2.181	17.48	1.0194
28	270	21.8	41				15.7	72.9	2.223	18.63	2.160	16.90	1.0299
29	280	21.8	40				16.1	73.6	2.199	17.97	2.142	16.41	1.0345
30	290	22.0	39				16.4	70.9	2.181	17.48	2.124	15.91	1.0414
31	300	22.0	38	79.3	103.4	66.1	18.8	70.6	2.157	16.82	2.109	15.50	1.0424
32	310	22.3	37				12.1	69.4	2.136	16.24	2.085	14.84	1.0519
33	320	22.3	37				11.0	72.2	2.118	15.75	2.064	14.26	1.0597
34	330	22.3	37				21.3	72.9	2.097	15.17	2.046	13.77	1.0633

CONTINÚA 

35	340	22.4	36				23.2	70.0	2.079	14.67	2.031	13.35	1.0656
36	350	22.5	38				21.7	70.5	2.058	14.10	2.010	12.78	1.0706
37	360	22.5	38	80.3	90.2	60.3	23.5	71.1	2.043	13.68	1.989	12.20	1.0782
38	370	22.6	38				21.3	69.0	2.028	13.27	1.971	11.70	1.0832
39	380	22.6	38				22.6	72.4	2.016	12.94	1.953	11.21	1.0895
40	390	22.5	37				16.0	72.2	2.004	12.61	1.935	10.71	1.0956
41	400	22.4	35				21.0	71.4	1.995	12.36	1.926	10.47	1.0968
42	410	22.4	36				17.3	71.4	1.989	12.20	1.914	10.14	1.1017
43	420	22.4	36	83.7	97.5	64.2	20.2	72.4	1.971	11.70	1.902	9.81	1.0997
44	430	22.4	35				14.6	67.7	1.959	11.37	1.893	9.56	1.0990
45	440	22.3	36				19.3	62.6	1.947	11.04	1.887	9.39	1.0962
46	450	22.4	37				12.7	63.7	1.938	10.80	1.875	9.06	1.0989
47	460	22.6	39				18.7	68.8	1.923	10.38	1.869	8.90	1.0942
48	470	22.7	37				14.5	72.9	1.908	9.97	1.866	8.82	1.0876
49	480	22.6	39	78.6	89.3	68.5	12.6	70.5	1.896	9.64	1.857	8.57	1.0863
50	490	22.7	39				11.6	67.4	1.881	9.23	1.851	8.40	1.0815
51	500	22.9	40				17.6	68.8	1.872	8.98	1.845	8.24	1.0800
52	510	22.8	41				14.1	68.5	1.863	8.73	1.836	7.99	1.0802
53	520	23.1	40				17.2	70.5	1.851	8.40	1.830	7.83	1.0769
54	530	22.8	40				12.6	70.6	1.842	8.16	1.821	7.58	1.0770
55	540	23.0	39	73.1	77.3	61.9	16.1	71.6	1.836	7.99	1.818	7.50	1.0752
56	550	23.0	40				13.5	70.8	1.830	7.83	1.809	7.25	1.0770
57	560	23.0	39				13.2	66.0	1.821	7.58	1.803	7.08	1.0752
58	570	22.1	40				13.6	66.6	1.812	7.33	1.797	6.92	1.0733
59	580	22.0	43				15.1	72.8	1.806	7.17	1.794	6.84	1.0715
60	590	21.9	44	62.3	85.0	58.0	11.4	72.9	1.803	7.08	1.791	6.75	1.0714
\bar{X}	21.9	41					58.5	19.7	69.7				
X_{\max}	23.9	47					68.5	39.5	73.6				
X_{\min}	19.8	35					22.5	10.8	62.3				

En la tabla 38 se observa los resultados finales del proceso de secado para los granos de cacao nacional en un tiempo de secado igual a 590 minutos con una temperatura de secado de 69.7 °C.

Tabla 38.*Resultados del ensayo de secado en el cacao nacional*

Parámetro		Granos antes del secado	Granos después del secado
Peso [kg]	Bandeja 1	3.0	1.943
	Bandeja 2	3.0	1.898
	Bandeja 3	3.0	1.889
	Bandeja 4	3.0	1.791
	Total	12	7.521
Porcentaje de contenido de humedad [%]		40	6.641
Cantidad de agua de remoción [kg]		0	4.479

**Figura 121.** Granos de cacao seco nacional**Figura 122.** Medición de humedad en cacao nacional

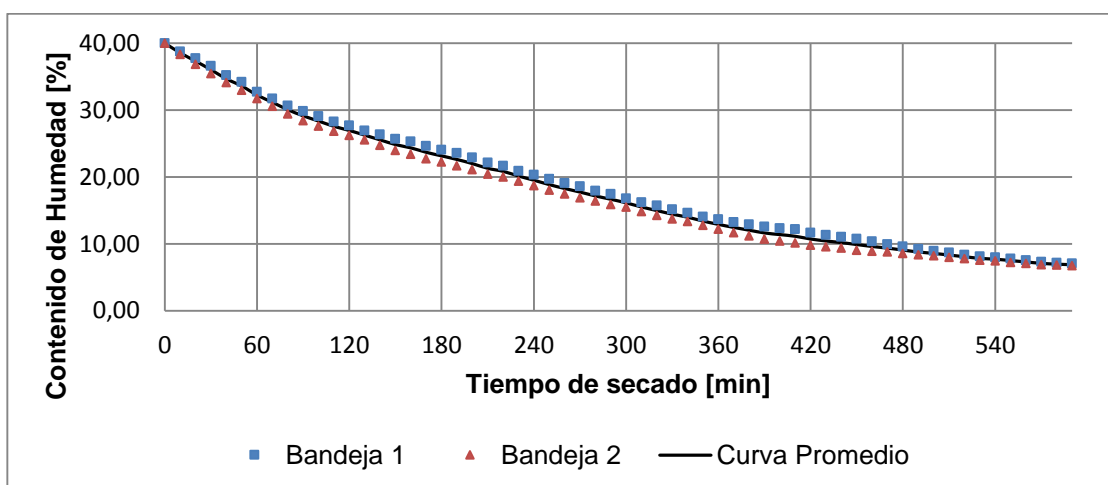


Figura 123. Curva de secado del cacao nacional

En la figura 123 se indica la curva de secado de los granos de cacao nacional de la bandeja 1, bandeja 2 y la curva de secado promedio, en esta curva se observa una disminución del porcentaje de humedad del 40% al 7.08% en un período de tiempo de 9 horas 50 minutos la curva de tendencia es $y = 8 * 10^{-5} x^2 - 0.0983 x + 38.378$, con un coeficiente de determinación igual a 0.997 que representa la variación de los datos con relación a la curva de tendencia.

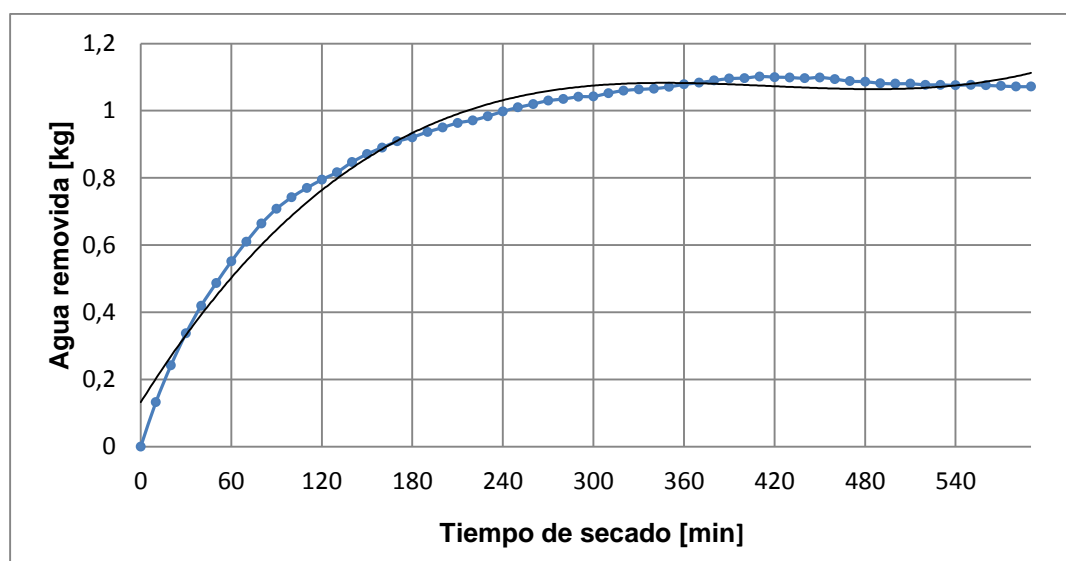


Figura 124. Diagrama de agua removida en los granos de cacao nacional

En la figura 124 se muestra la cantidad de agua removida de los granos de cacao durante el proceso de secado, desde 0 kg de agua removida hasta 1.0647 kg para una masa de producto igual a 3 kg, la curva de tendencia es $y = 1 * 10^{-8} x^3 - 2 * 10^{-5} x^2 + 0.0072 x + 0.1318$ con un coeficiente de determinación igual a 0.9827

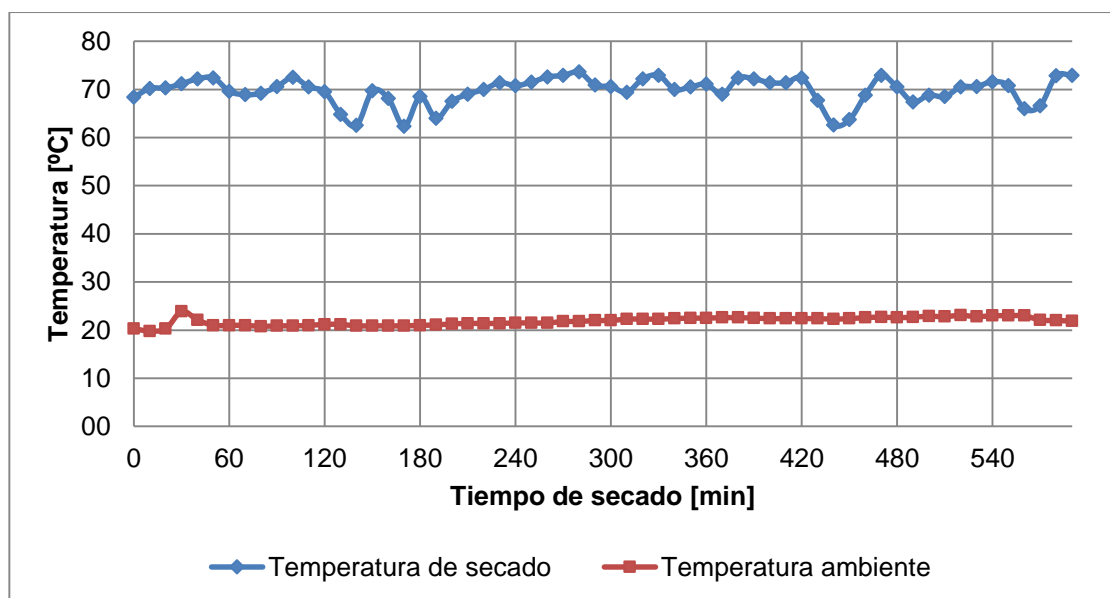


Figura 125. Diagrama de temperatura exterior y de secado

En la figura 125 se indica la curva de la temperatura ambiente y la temperatura de secado en el interior de la cámara durante el proceso de secado, con una temperatura ambiente promedio de 21.9 °C y una temperatura de secado promedio de 69.7 °C.

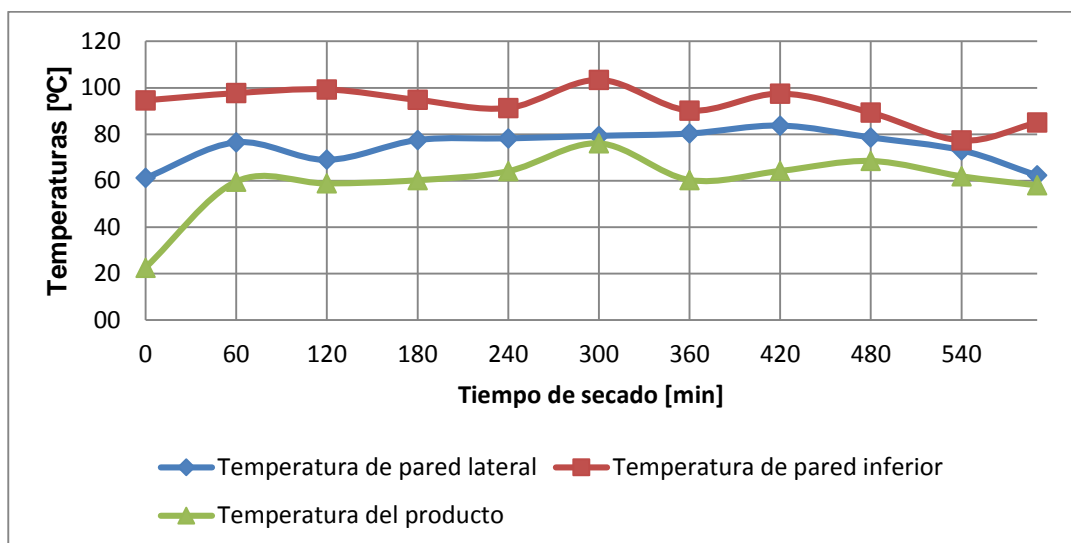


Figura 126. Diagrama de temperatura de pared lateral, inferior y producto

En la figura 126 se indica las curvas de temperatura de pared lateral, temperatura de pared inferior y temperatura del producto en el interior de la cámara, resultando una temperatura promedio en la pared inferior igual a 92.8 °C y una temperatura de pared lateral promedio de 74.5 °C, mientras que la temperatura de producto promedio es de 59.5 °C.

5.5. Prueba físicas y de calidad para los granos de cacao

Para realizar las pruebas del control de calidad en los granos de cacao se utilizará la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN-176 Cacao en grano-Requisitos, NTE INEN 177 Cacao en grano – Muestreo, NTE INEN 175 Cacao en grano – Ensayo de corte.

5.5.1. Peso en 100 granos de cacao

Dentro de los requisitos de la calidad de los granos de cacao beneficiado que indica la norma NTE INEN 176, expresa el peso mínimo de 100 granos para cacao nacional y CCN-51.

Para los resultados se escogió una muestra aleatoria de 100 granos de cacao por ensayo, realizando el pesaje (ver figura 127) y obteniendo los datos que se indican en la tabla 39:

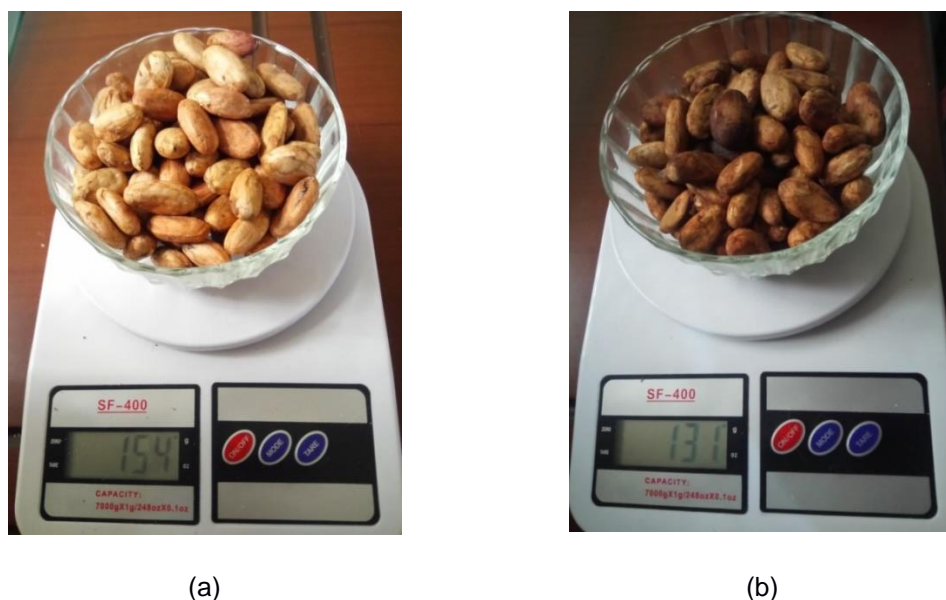


Figura 127. Pesaje de los granos de cacao
Nota: (a) CCN-51, (b) nacional

Tabla 39.
Peso de 100 granos de cacao

Peso	Ensayos									Promedio
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	
Cacao Nacional [g]	131	141	134	136	138	141	134	136	140	137
Cacao CCN-51 [g]	154	162	155	157	151	140	143	156	142	151

En la tabla 5 se indica el peso de acuerdo a la clasificación según el cacao nacional o CCN-51, determinando que el peso promedio obtenido para el cacao nacional es de 137 g correspondiendo al tipo “Arriba Superior Summer Selecto” (A.S.S.S.) y para el cacao CCN-51 el peso promedio es de 151 g correspondiendo al tipo “Cacao Superior Selecto” (C.S.S.).

5.5.2. Contenido de humedad en 100 granos

Para medir el contenido de humedad se tomó una muestra de 100 granos y se utilizó el higrómetro.

Tabla 40.

Contenido de humedad de 100 granos de cacao CCN-51

8	8	8	8	6	8	7	8	8	9
9	9	7	8	7	7	6	5	7	9
6	9	8	9	8	8	9	7	9	6
5	7	6	7	9	9	7	8	7	9
8	9	7	8	7	5	6	6	6	7
7	8	8	7	7	8	9	6	6	6
6	9	7	7	6	9	8	8	6	8
6	7	9	6	6	8	7	9	8	9
7	5	9	6	9	7	7	6	9	7
6	7	8	7	7	6	9	7	7	6
Promedio: 7.36%									
Desviación Estándar: 1.17									

Tabla 41.

Contenido de humedad de 100 granos de cacao nacional

8	7	7	8	5	6	5	7	8	7
8	7	5	6	8	8	5	5	7	7
7	5	5	6	7	5	5	7	5	7
6	5	6	8	8	9	8	7	9	8
5	6	6	6	8	6	6	5	5	5
7	8	7	9	6	8	8	6	7	6
8	7	9	6	5	7	8	8	5	8
6	7	6	7	6	8	7	8	5	6
5	8	7	8	6	6	6	5	5	7
6	6	6	8	7	8	7	7	7	8
Promedio: 6.65%									
Desviación Estándar: 1.18									



Figura 128. Contenido de humedad en los granos de cacao CCN-51 y nacional

5.5.3. Granos defectuosos después del proceso de secado

Después del proceso de secado del cacao pueden presentar una serie de defectos los que se encuentran definidos en la norma NTE INEN 176, para cada ensayo se escogió una muestra aleatoria de 500 gramos de cacao determinando los defectos presentes (ver figuras 128, 129 y 130) y los resultados de los defectos se muestra en las tablas 42 y 43.



Figura 129. Granos de cacao múltiples o pelota



Figura 130. Granos de cacao planos o granza



Figura 131. Granos de cacao negros



Figura 132. Pesaje de los granos defectuosos

Tabla 42.*Granos defectuosos para el tipo CCN-51*

DEFECTOS	Ensayos								
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
Dañados por insectos [%]	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Germinados [%]	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Múltiples o pelotas [%]	0.61	0.34	0.4	0.91	0.72	0.42	0.81	0.61	0.31
Negros [%]	0.42	0.43	0.62	0	0.81	0.59	0	0.45	0
Planos o granza [%]	0.22	0.13	0	0.27	0.36	0.33	0.28	0.36	0.16
Total [%]	1.25	0.9	1.02	1.18	1.89	1.34	1.09	1.42	0.47

Tabla 43.*Granos defectuosos para el tipo nacional*

DEFECTOS	Ensayos								
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
Dañados por insectos [%]	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Germinados [%]	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Múltiples o pelotas [%]	0.43	0.31	0	0.23	0	0.42	0	0.34	0
Negros [%]	0	0.19	0.45	0	0.32	0.23	0.32	0.12	0
Planos o granza [%]	0.12	0.15	0	0.17	0.39	0	0.21	0.09	0.1
Total [%]	0.55	0.65	0.45	0.4	0.71	0.65	0.53	0.55	0.1

5.5.4. Resultados de requisitos físicos para los granos de cacao

En las tablas 44 y 45 se presentan los resultados finales de los requisitos para los granos de cacao CCN-51 y nacional según lo indicado en la tabla 5.

Para obtener los resultados de granos fermentados, violetas, pizarrosos y mohosos se realizó un ensayo de corte a una muestra de 100 granos de cacao indicado en la norma NTE INEN 175 Cacao en grano – Ensayo de corte, (ver figuras 133 y 134).

**Figura 133.** Ensayo de corte del cacao CCN-51

5.5.5. Prueba de cascarilla en los granos de cacao

Para realizar estas pruebas se escogió una muestra aleatoria de 10 granos de cacao por ensayo, con el siguiente procedimiento

- a) Pesar cada grano de cacao
- b) Retirar la cascarilla de los granos de cacao
- c) Pesar la cascarilla

En las tablas 46 y 47 se presentan los resultados obtenidos del proceso de cascarilla.



Figura 135. Muestras de los granos de cacao



Figura 136. Cascarilla del cacao



Figura 137. Pesaje de la cascarilla

Tabla 46.

Resultados de cascarilla en los granos de cacao CCN-51

		N° de granos										Prom [g]	% Casc
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
E1	PG[g]	1.94	1.86	1.65	1.85	1.60	1.80	1.61	2.03	1.58	1.84	1.78	
	PC[g]	0.16	0.17	0.15	0.12	0.15	0.17	0.12	0.15	0.14	0.15	0.15	8.33
E2	PG[g]	1.78	2.05	1.58	1.71	1.61	1.53	1.68	2.05	1.91	1.90	1.78	
	PC[g]	0.12	0.14	0.13	0.12	0.15	0.13	0.14	0.17	0.16	0.16	0.14	7.98
E3	PG[g]	1.71	1.98	2.11	1.45	2.05	1.67	1.72	1.61	2.11	1.86	1.83	
	PC[g]	0.17	0.15	0.17	0.13	0.19	0.14	0.13	0.12	0.21	0.14	0.16	8.48
E4	PG[g]	1.75	1.60	1.69	1.67	1.80	1.59	1.90	1.69	1.84	1.70	1.72	
	PC[g]	0.10	0.14	0.15	0.10	0.13	0.16	0.14	0.14	0.14	0.12	0.13	7.66
E5	PG[g]	1.79	1.60	1.62	1.91	1.85	1.81	1.74	1.76	1.71	1.84	1.76	
	PC[g]	0.15	0.12	0.11	0.13	0.10	0.14	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	6.98
E6	PG[g]	1.63	1.71	1.48	1.78	1.60	1.67	2.10	1.58	1.91	1.65	1.71	
	PC[g]	0.15	0.16	0.12	0.16	0.14	0.15	0.16	0.14	0.17	0.15	0.15	8.77
E7	PG[g]	1.84	1.67	1.89	2.00	1.68	1.72	1.78	1.68	1.78	2.02	1.81	
	PC[g]	0.14	0.13	0.15	0.17	0.14	0.13	0.13	0.15	0.14	0.16	0.14	7.97
E8	PG[g]	1.72	1.64	1.93	1.85	1.78	1.92	2.02	1.80	2.01	0.16	1.68	
	PC[g]	0.15	0.14	0.17	0.16	0.15	0.16	0.16	0.16	0.15	0.13	0.15	9.09
E9	PG[g]	1.73	1.67	1.81	1.62	1.85	1.88	1.90	1.66	1.99	1.48	1.76	
	PC[g]	0.16	0.14	0.16	0.13	0.16	0.15	0.14	0.14	0.16	0.12	0.15	8.30

*PG: Peso del grano de cacao,

*PC: Peso de la cascarilla de cacao.

Tabla 47.*Resultados de cascarilla en los granos de cacao nacional*

		N° de granos										Prom [g]	% Casc
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
E1	PG[g]	1.33	1.82	1.33	1.71	1.69	1.65	1.28	1.45	1.63	1.88	1.58	
	PC[g]	0.13	0.17	0.10	0.13	0.15	0.17	0.09	0.08	0.16	0.21	0.14	8.81
E2	PG[g]	1.74	1.83	1.25	1.46	1.57	1.12	1.34	1.47	1.17	1.25	1.42	
	PC[g]	0.14	0.16	0.13	0.12	0.12	0.11	0.10	0.10	0.10	0.10	0.12	8.31
E3	PG[g]	1.55	1.93	1.25	1.37	1.57	1.50	1.57	1.38	1.40	1.54	1.51	
	PC[g]	0.15	0.15	0.14	0.11	0.12	0.14	0.10	0.16	0.15	0.15	0.14	9.10
E4	PG[g]	1.31	1.59	1.72	1.32	1.57	1.41	1.84	1.45	1.52	1.18	1.49	
	PC[g]	0.13	0.12	0.14	0.11	0.12	0.12	0.15	0.14	0.13	0.10	0.13	8.45
E5	PG[g]	1.48	1.73	1.62	1.33	1.56	1.86	1.35	1.76	1.45	1.39	1.55	
	PC[g]	0.11	0.13	0.13	0.10	0.12	0.15	0.12	0.16	0.11	0.10	0.12	7.92
E6	PG[g]	1.46	1.49	1.67	1.64	1.55	1.38	1.76	1.37	1.69	1.41	1.54	
	PC[g]	0.10	0.10	0.13	0.12	0.14	0.11	0.14	0.10	0.14	0.12	0.12	7.78
E7	PG[g]	1.56	1.45	1.69	1.46	1.72	1.78	1.57	1.44	1.39	1.37	1.54	
	PC[g]	0.13	0.12	0.13	0.12	0.15	0.16	0.13	0.13	0.10	0.10	0.13	8.23
E8	PG[g]	1.35	1.55	1.51	1.46	1.55	1.36	1.49	1.45	1.74	1.76	1.52	
	PC[g]	0.10	0.11	0.12	0.12	0.13	0.11	0.13	0.11	0.14	0.13	0.12	7.88
E9	PG[g]	1.59	1.37	1.55	1.61	1.36	1.44	1.53	1.62	1.43	1.38	1.49	
	PC[g]	0.13	0.12	0.10	0.15	0.10	0.11	0.13	0.12	0.11	0.12	0.12	8.00

*PG: Peso del grano de cacao,

*PC: Peso de la cascarilla de cacao.

Las industrias que utilizan cacao como materia prima en sus productos terminados exigen que el peso del grano seco sin cascarilla no supere el 12% del peso total (Fedecacao, 2005), como se observa en las tablas 46 y 47 el porcentaje de cascarilla no excede el 12%.

5.5.6. Pruebas de pH de los granos de cacao

El procedimiento a seguir para medir el pH del cacao es (Pérez & Contreras, 2017):

- a) Calibrar el pH-metro con las soluciones tampón 4 (solución rosa), 7 (solución amarilla) y 10 (solución azul).



Figura 138. Calibración del pH-metro

- b) Retirar la cascarilla de los granos.
- c) Triturar 10 gramos de cacao.



Figura 139. Pesaje de 10 gramos de cacao

- d) En un vaso de precipitación realizar una mezcla de 10 gramos de cacao y agregar 90 ml de agua destilada.



Figura 140. Solución de los granos de cacao más agua destilada

- e) Agitar y dejar reposar la solución 5 minutos



Figura 141. Agitación de la solución

f) Medir el pH de la solución



Figura 142. Medición del pH

Tabla 48.

Resultados de pH en los granos de cacao

	Cacao Nacional	CCN-51
	pH	pH
Ensayo 1	4.81	6.70
Ensayo 2	4.96	4.82
Ensayo 3	5.74	5.53
Ensayo 4	5.85	5.21
Ensayo 5	5.32	4.95
Ensayo 6	5.83	4.88
Ensayo 7	5.92	6.06
Ensayo 8	4.67	5.37
Ensayo 9	5.34	5.59
Promedio	5.38	5.46

En la tabla 3 se indica que el pH de los granos de cacao debe ser de 5.0 a 5.5 teniendo un sabor levemente amargo, el promedio del pH de cacao CCN-51 es de 5.38 y para el cacao nacional de 5.46 obteniendo un pH dentro del rango permitido, además el cacao adquirió un sabor amargo agradable con un aroma a fruto seco y floral.

CAPÍTULO VI

6. ANÁLISIS ECONÓMICO

Para la construcción del sistema térmico energético se requirió de una inversión para costear los componentes del sistema: mecánicos, eléctricos, electrónicos, mano de obra y alquiler de equipos. Para el análisis económico del proyecto se detallarán los costos directos e indirectos.


6.1. Costos directos

Son los costos de los diferentes materiales y mano de obra destinada a la construcción de la cámara, bandejas, soporte y adquisición de datos.

Tabla 49.

Costo de los materiales mecánicos

N°	Descripción	Unidad	Cantidad	Valor unitario [USD]	Valor total [USD]
1	Plancha de acero inoxidable AISI 304 (2mm)	Plancha	2	160,92	321,84
2	Plancha de acero galvanizado ASTM A-366 (0.75mm)	Plancha	1	18,50	18,50
3	Malla de acero inoxidable AISI 304 mesh 10	Metro	2	28,50	57,00
4	Tiras de acero inoxidable (1800x60x0.8mm)	Unidad	4	5,20	20,80
5	Tubo estructural rectangular ASTM A-500 (40x20x2mm)	Unidad	1	11,95	11,95
6	Tubo estructural cuadrado ASTM A-500 (25x1.2 mm)	Unidad	2	6,70	13,40
7	Perfil estructural Ángulo "L" ASTM A-36 1"x2mm	Unidad	1	5,65	5,65
8	Tubo estructural redondo negro ASTM A-500 1¼" x1.5 mm	Unidad	1	10,95	10,95

CONTINÚA 

11	Bisagras de 3.5x3.5x2.5 mm	Unidad	2	3,55	7,10
12	Remaches 1/8x3/4	Unidad	50	0,03	1,50
13	Ruedas giratorias de Ø 50 mm	Unidad	2	3,60	7,20
14	Ruedas estáticas de Ø 50 mm	Unidad	2	3,50	7,00
15	Pintura	Galón	1	4,90	4,90
16	Lana de vidrio	Rollo	1	50,15	50,15
17	Empaque	Metro	1	5,00	5,00
18	Pernos autoroscados	Unidad	8	0,10	0,80
19	Cadena	Metro	2	3,00	6,00
20	Tornillo	Unidad	2	0,10	0,20
21	Thinner	litros	1	1,60	1,60
22	Guantes	Unidad	2	1,50	3,00
TOTAL					554,54

Tabla 50.
Costo de materiales eléctricos/electrónicos

N°	Descripción	Unidad	Cantidad	Valor unitario [USD]	Valor total [USD]
1	Resistencias eléctricas 110 V/200W	Unidad	4	61,60	246,40
2	Gabinete de control 300x300 mm	Unidad	1	15,00	15,00
3	Controlador electrónico de temperatura	Unidad	1	35,40	35,40
4	Bornera de baquelita 6 terminales	Unidad	1	5,20	5,20
5	Enchufe 110 V	Unidad	1	1,00	1,00
6	Switch ON/OFF	Unidad	1	5,60	5,60
7	Breaker	Unidad	1	27,00	27,00
8	Luz piloto verde	Unidad	1	0,85	0,85
9	Contactador principal de 3 polos	Unidad	1	32,00	32,00
10	Cable sólido #12	Metro	5	0,25	1,25
11	Cable gemelo 14 AWG	Metro	3	0,25	0,75
12	Termocupla tipo K 0-400 °C	Unidad	1	10,95	10,95
13	Celda de carga y HX711 – 10 kg	Unidad	1	13,90	13,90
14	Sensor DHT22 y AM2302	Unidad	1	9,95	9,95
15	Pantalla LCD 16x2	Unidad	1	4,50	4,50
16	Potenciómetro	Unidad	1	0,30	0,30
17	Arduino Mega 260	Unidad	1	18,95	18,95
18	Cable UTP flexible	Metro	1	0,45	0,45

CONTINÚA 

19	Cables dupont	Unidad	15	0,15	2,25
20	Canaletas flexibles	Metro	2	3,25	6,50
21	Galleta electrónica	Unidad	2	1,35	2,70
22	Caja para el sistema de adquisición de datos	Unidad	1	10,00	10,00
23	Taype negro	Unidad	1	0,45	0,45
24	Borneras	Unidad	6	0,60	3,60
25	Cautín	Unidad	1	4,50	4,50
TOTAL					459,45

Tabla 51.*Costo de mano de obra*

N°	Descripción	Unidad	Cantidad	Valor Unitario [USD]	Valor Total [USD]
1	Doblado	N° de dobleces	90	0,15	13,50
2	Cizalladora	N° de cortes	60	0,10	6,00
3	Soldador	horas	20	10,00	200,00
4	Técnico metalmecánico	horas	25	10,00	250,00
5	Técnico eléctrico-electrónico	horas	5	8,00	40,00
TOTAL					509,50

Tabla 52.*Total de costos directos*

N°	Descripción	Valor total [USD]
1	Costo de materiales mecánicos	554,54
2	Costo de materiales eléctrico-electrónico	459,45
3	Costo de mano de obra	509,50
TOTAL		1523,49

6.2. Costos indirectos

Estos costos resultan al realizar las pruebas de secado de los granos de cacao tipo nacional y CCN-51 en el sistema térmico-energético.

Tabla 53.
Costos indirectos

N°	Descripción	Valor Total [USD]
1	Transporte	50,00
2	Servicios básicos	20,00
3	Suministros de oficina	60,00
4	Alquiler de equipos para ensayos	50,00
TOTAL		180,00

En los costos indirectos no se asumieron los gastos de los granos de cacao debido a que fueron entregados por la finca Albita para luego ser devueltos después del proceso de secado.

En la tabla 54 se observa el costo total de la energía consumida por los 18 ensayos realizados.

Tabla 54.
Costo de energía realizar los ensayos

N°	Descripción	Valor Total
1	Tiempo de secado [h]	9
2	Número de ensayos	18
3	Consumo por carga de secado (12 kg) [kW]	0,727
4	Costo de energía por kWh [\$]	0,10
TOTAL		11,42

6.3. Costo total

Para determinar el costo total utilizado en la construcción del sistema térmico-energético y el desarrollo de las pruebas se sumarán los costos totales directos e indirectos, en la tabla 55.

Tabla 55.
Costos totales

N°	Descripción	Valor total [USD]
1	Costos directos	1523,49
2	Costos indirectos	180,00
3	Costo de energía	11,42
TOTAL		1714,91

El costo total para la construcción del sistema térmico energético es de \$1703. 49, total el 89% equivale a costos directos y el 11% a costos indirectos.

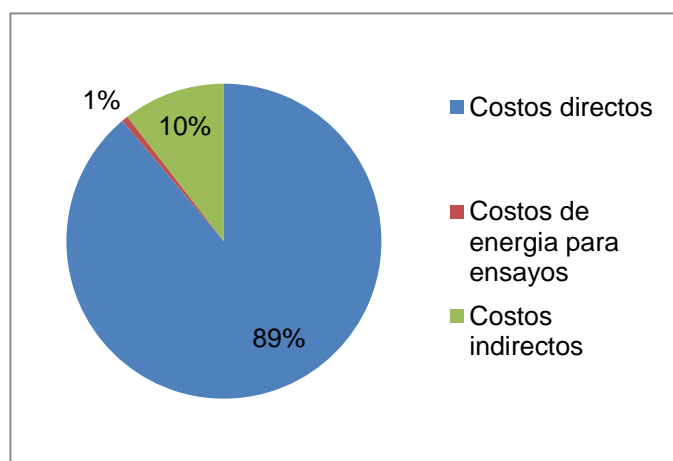


Figura 143. Costo total

CAPÍTULO VII

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Conclusiones

En este proyecto de investigación relacionado con el secado del cacao, se diseñó y construyó un sistema térmico-energético con capacidad de 12 kg, para evaluar las condiciones óptimas del proceso, con una temperatura de secado de $68\pm 2^{\circ}\text{C}$, humedad relativa en el interior la cámara no mayor a 40%. En estas condiciones se logró reducir el tiempo de 3 días, en secado natural hasta 9 horas para el cacao CCN-51 y 10 horas para el cacao nacional manteniendo sus propiedades organolépticas como sabor y aroma propios del producto.

Para la estructuración de este proyecto, fue necesario realizar el estudio del estado del arte, respecto a los sistemas energéticos existentes para secar cacao, entre los diferentes tipos de secadores se encuentran los de resistencias eléctricas, de lecho fijo, al vacío y por convección natural.

La potencia térmica del secador utilizado para el secado de muestras de cacao CCN-51 y nacional es de 643.89 W, con resistencias distribuidas en la pared inferior y en las paredes laterales del horno. El producto se lo coloca en 4 bandejas que tienen capacidad máxima de 3 kg. En la carga es importante considerar la altura del producto que en lo posible debe ser similar al tamaño del grano de cacao para evitar su deterioro.

Los datos promedios obtenidos en el secado del cacao CCN-51 son temperatura ambiente 21.9°C , humedad relativa del aire 39%, temperatura del producto 61.7°C ,

humedad en el interior de la cámara 21.7% y una temperatura de secado 67.9°C. Para el cacao nacional la temperatura ambiente similar a la anterior, humedad relativa del aire 41%, temperatura del producto 58.5 °C, humedad interna 19.7% y temperatura de secado 69.7°C. En el segundo caso, existe una reducción en la humedad interior del 2%. Este valor indica que el tamaño de la variedad es más pequeño.

Al realizar un análisis comparativo entre la curva de secado del CCN-51 y el nacional se puede indicar que la segunda variedad tiene mayor curvatura, donde la expresión matemática y su tendencia se asemejan a una parábola con eje focal y.

Concluido el proceso de secado se desarrolló el control de calidad de los dos tipos de cacao requerido por la norma NTE INEN 176-Requisitos teniendo como resultados para el cacao CCN-51 un peso promedio en 100 granos de 151 gramos, para el cacao nacional un peso de 137 gramos y con un contenido de humedad final de 7% en los dos tipos de cacao. Adicionalmente se realizó pruebas de porcentaje de cascarilla y pH con un promedio para el cacao CCN51 de 7.97% y pH 5.38 y para el cacao nacional de 8% y pH de 5.46 asegurando la calidad del proceso de secado.

Con los resultados experimentales del proceso de secado de las 2 variedades de cacao se pueden establecer y desarrollar modelos de utilidad de mayor capacidad para contribuir a la tecnificación de los sectores productivos que procesan este grano en mayor o menor escala.

7.2.Recomendaciones

Se recomienda hacer un análisis químico del cacao para determinar el porcentaje de grasa requerido por las industrias chocolateras.

El equipo se puede utilizar para deshidratar diferentes productos realizando previamente un análisis térmico del producto a secar para obtener temperatura y tiempos de secado óptimos.

Para lograr una mejor calidad en el proceso de secado del cacao se propone en futuras investigaciones utilizar hornos de secado al vacío, que pueda operar con una presión de 1/10 la atmosférica y temperaturas de 32°C a 42°C, obteniéndose con estos parámetros la conservación del color, textura, propiedades organolépticas dentro de mayores índices de aceptación. Al utilizar este tipo de tecnología, el sistema de calentamiento puede aprovechar el recurso solar de baja temperatura como es el caso de uso de agua caliente sanitaria (ACS) que le puede suministrar una temperatura de proceso dentro de un rango de 32°C a 55°C, con colectores de fabricación solar.

Como se ha explicado en este estudio, en el Ecuador se realiza el secado en condiciones rudimentarias colocando al sol en áreas pavimentadas, donde la fruta se expone a la contaminación por bacterias, hongos, algas, que deterioran la presentación del producto final, su calidad y desde luego la afectación a su costo. Por este motivo se espera que esta investigación sirva como un efecto multiplicador de empleo en los sectores agroindustriales que durante decenios dependen de este cultivo que se expende en el mercado local e internacional y de esta manera fomentar el desarrollo del país.

BIBLIOGRAFÍA

- Agroplus. (2014). *Cascarilla de Cacao*. Recuperado el Abril de 2018, de <http://agroplus.info/producto/sin%20categorizar/cascarilla-de-cacao/>
- Aguilar, H. (2016). *Manual para la evaluación de la calidad del grano de cacao*. La Lima, Cortés: Centro de Comunicación Agrícola.
- AISC. (2010). *Specification for Structural Steel Buildings*. Chicago: American Institute of Steel Construction.
- Aisla en verde. (20 de Enero de 2013). *Lana de oveja*. Recuperado el Abril de 2018, de <http://aislaenverde.com/portfolio/lana-de-oveja/>
- Alvarado, M. R., & Bullard, E. T. (1961). *Variation of bean characteristic in hybrid cacao progenies, proceeding of the Caribbean Region*. America Society Horticultural Sciences.
- Anecacao. (2015). *Cacao fino de aroma*. Recuperado el Abril de 2018, de <http://www.anecacao.com/index.php/es/inicio.html>
- Apinorte. (2015). *Secador de 15 bandejas profesional*. Recuperado el Abril de 2018, de <http://www.apinorte.com/FichaArticulo~x~Secador-de-polen-15-bandejas-PROFESIONAL~IDArticulo~1063.html>
- Aprocafa. (11 de Diciembre de 2016). Recuperado el Abril de 2018, de <http://www.aprocafa.net/>
- Atepa. (s.f.). *Espuma de Poliuretano*. Recuperado el Abril de 2018, de http://www.construmatica.com/construpedia/Espuma_de_Poliuretano
- Atlas ambiental del Distrito Metropolitano de Quito. (2008). *El clima en el Distrito Metropolitano de Quito*. Recuperado el Abril de 2018, de

https://www.usfq.edu.ec/programas_academicos_en_curso/colegios/cociba/quito/ambiente/temas_ambientales/cambio_climatico/Documents/DC2AC1_atlas_ambiental_dmq_clima.pdf

Cabe, W., Smith, J., & Harriott, P. (1991). *Operaciones Unitarias de Ingeniería Química*. Madrid: Mc Graw Hill.

Cengel, Y. A. (1996). *Transferencia de calor*. México: Mc Graw Hill.

CIAGP - UTN. (23 de Marzo de 2017). Recuperado el Abril de 2018, de <http://www.utn.edu.ec/ficaya/carreras/agropecuaria/?p=1091>

Corvalan, R., Horn, M., Roman, R., & Saravia. (2000). *Ingeniería del secador solar*. Chile.

Dickerson, R. (1968). *Thermal Properties of foods*. Westport: The AVI Publishing Co.

Dipac. (2016). *Productos de acero*. Recuperado el Mayo de 2018, de <http://www.dipacmanta.com/>

Direct Industry. (2018). *Secador de vacío de palas para la industria química*. Recuperado el Abril de 2018, de <http://www.directindustry.es/prod/bachiller-barcelona/product-67620-539376.html>

Edson, P., & Montero, A. (20 de Abril de 2016). *Cacao en Grano: Requisitos de Calidad de la Industria del Chocolate y del Cacao*. Recuperado el Abril de 2018, de http://www.cocoaquality.eu/data/Cacao%20en%20Grano%20Requisitos%20de%20Calidad%20de%20la%20Industria%20Apr%202016_es.pdf

ESPAC. (2016). *Instituto Nacional de Estadísticas y Censos*. Recuperado el Abril de 2018, de <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/estadisticas-agropecuarias-2/>

- Espinoza, C., & Ruiz, V. (2015). *Diseño y construcción de una máquina secadora de cacao para aplicación agroindustrial en la provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas*. Sangolquí: Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE.
- FAO. (2018). *Equivalencia de unidades mundiales*. Recuperado el Abril de 2018, de <http://www.fao.org/docrep/x5041s/x5041S09.htm>
- FCC Federation of Cocoa Commerce LTD. (2012). *International cocoa standards*. Recuperado el Abril de 2018, de <http://www.cocoafederation.com/>
- Fedecacao. (2005). *Caracterización fisicoquímica y beneficio del grano de cacao en Colombia*. Recuperado el Junio de 2018, de https://www.fedecacao.com.co/portal/images/recourses/pub_doctecnicos/fedecacao-pub-doc_09B.pdf
- Federación Nacional de Cacaoteros, Fedecacao. (2004). *El beneficio y características físico químicas del cacao (Theobroma cacao L.)*. Recuperado el Abril de 2018, de https://www.fedecacao.com.co/portal/images/recourses/pub_doctecnicos/fedecacao-pub-doc_06B.pdf
- Ferreyra, G. (2016). *Diseño de Sistemas Industriales*.
- Filtra Vibración. (2017). *Mallas metálicas industriales*. Recuperado el Mayo de 2018, de <http://filtra.com/mallas-metalicas-industriales/>
- Gavilánez, L. (2001). *Diseño y construcción de un prototipo de molino de rodillos para cacao*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Hermosillo, J. (1995). *Energía Solar*. Jalisco.
- Incropera, F., & De Witt, D. (1999). *Fundamentos de transferencia de calor*. México: Prentice Hall.

- Irconfort. (2016). *Deshidratadoras de productos alimenticios*. Recuperado el Abril de 2018, de <http://www.irconfort.com/productos/agro-2/>
- Isover. (2018). Obtenido de <http://www.isover.com.co/>
- Ivan Bohman. (2015). *MEGA 308L AWS ER308L (Alambre MIG para acero Inoxidable)*. Recuperado el Junio de 2018, de <http://www.ivanbohman.com.ec/wp-content/uploads/2015/12/alambremig.pdf>
- Jiménez, J. (2003). *Practica del beneficio del cacao y su calidad organileptica en Ecuador*. Quevedo: INIAP.
- Lutheran World Relief. (Abril de 2013). *Cosecha, fermentación y secado del cacao*. Recuperado el Mayo de 2018, de http://infocafes.com/portal/wp-content/uploads/2017/02/19_Guia_8_Beneficiado.pdf
- Máquina Perú S.A. (2016). *Equipos para producción y secado de granos*. Recuperado el Mayo de 2018, de <http://www.maquinas-peru.com/>
- Maureira, J. (2006). *Diseño y simulación de un secador de granos de cacao con colectores solares planos mediante convección forzada para una capacidad de 500 kg*. sangolquí: Escuela Politécnica del Ejército.
- Meythaler, E., & De Guzmán, E. (2007). *Diseño y construcción de un horno de tipo poliédrico inclinado para secado de frutas*. Sangolquí: Escuela Politécnica del Ejército.
- Ministerio de Agricultura y Ganadería. (2017). Recuperado el Marzo de 2018, de <https://www.agricultura.gob.ec/produccion-de-cacao-apunta-a-romper-record-este-ano/>

- Moreno, L., & Sánchez, J. (1989). *Beneficio del Cacao*. Fundación Hondureña de Investigaciones Agrícolas.
- NEC-SE-CG. (2014). *Cargas no sísmicas*. Quito: Dirección de comunicación social, MIDUVI .
- Nogales, J., Graziani, L., & Ortiz, L. (2006). Cambios físicos y químicos durante el secado al sol del grano de cacao fermentado en dos diseños de cajones de madera. *Agronomía Tropical*, 5-20.
- Nonhebel, G., & Moss, H. (1979). *El secado de sólidos en la industria química*. España: Reverté S.A.
- NTE INEN 176. (2018). *Granos de cacao. Requisitos*. Quito.
- Oke, D., & Omotayo, K. (2012). *Effect of forced-air artificial intermittent drying on cocoa beans*. Ado – Ekiti: Department of Agricultural and Bio-Environmental Engineering, Federal Polytechnic.
- Oportus, C. (1995). *Fundamentos teóricos y diseño de una estrategia para la implementación de la ingeniería concurrente modelo de aplicación para la industria nacional*. Santiago de Chile: Universidad de Santiago.
- Orozco, A., & Bedoya, F. (2007). Calculo del flujo másico y caudal de aire para un ventilador utilizado en silos. *Science Technology*, 207–212.
- Penagos. (2017). *Secadora rotativa para café*. Recuperado el Abril de 2018, de <http://www.penagos.com/producto/secadora-rotativa-para-cafe-sg-11/>
- Peréz, M., & Contreras, J. (2017). *Instructivo para el control de calidad de granos de cacao*. Bogota D.C.: Swisscontact.
- Perry. (2000). *Manual de Operaciones Unitarias*.

- Pitts, L., & Sissom, D. (1979). *Transferencia de Calor, Teoría y 296 problemas resueltos*. Bogotá: McGraw Hill Latinoamericana S.A.
- Ramos, G., & Azócar, A. (2000). *Beneficio del Cacao, Manual del productor del cacao*. Mérida.
- Reyes, H. V., & Romero, A. (2000). *La calidad del cacao*. Recuperado el Abril de 2018, de Cosecha y fermentación. FONIAP: www.ceniap.gov.ve/bdigital/fdivul/fd66/texto/calidadcacao.htm
- Rockwool. (Junio de 2016). *Aislamientos* . Recuperado el Abril de 2018, de <http://www.rockwool.es/>
- Romero, E., Álvarez, J., & Ferrer, N. (2016). Evaluación del desempeño de un secador solar directo sobre semillas de cacao. *AIA*, 23-28.
- Sitec Ingeniería. (2015). *Resistencias Eléctricas de ductos y planas*. Recuperado el Junio de 2018, de <http://www.sitecingeneria.com/resistenciaceramicaductoyplanas.html>
- Spiegel, M. (1975). *Matemáticas superiores para ingenieros y científicos*. Bogotá: McGraw Hill.
- Sweat, V. (1974). *Experimental values of thermal conductivity of selected fruits and vegetables*. Journal of Food Science.
- Talos Electronics. (2018). *Celda de carga de 20Kg y modulo amplificador HX711*. Obtenido de <https://www.taloselectronics.com/products/celda-de-carga-de-20kg-y-modulo-amplificador-hx711>
- Techmake. (2017). *Módulo de sensor de temperatura y humedad DHT22*. Recuperado el Junio de 2018, de <http://www.techmake.com/00359.html>

- Tinoco, H., & Ospina, D. (2010). Análisis del proceso de deshidratación de cacao para la disminución del tiempo de secado. *EIA Scielo*, 53-63.
- Torres, A., & Gonzalez, C. (2016). *Diseño de un secador motorizado con varias etapas de precalentamiento, para el cultivo de cacao en el Recinto "Los Ángeles"*. Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Vistrónica S.A.S. (2016). *Termocupla tipo K con sonda*. Recuperado el Junio de 2018, de <https://www.vistronica.com/sensores/temperatura/termocupla-tipo-k-con-sonda-de-30mm-y-longitud-de-1-metro-detail.html>
- Wilson, J. (1985). *Energía Solar*. Madrid: Alhambra.

ANEXOS

ANEXO 1. Planos Mecánicos del sistema

ANEXO 2. Perfil de temperatura en el aislamiento térmico

ANEXO 3. Manual de operación y mantenimiento

ANEXO 4. Ensayos realizados para el cacao CCN-51 y nacional