

**UNIVERSIDAD TÉCNICA NACIONAL
SEDE CENTRAL**

INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

Análisis de las diferentes fuentes energéticas para el proceso de secado de café en la empresa CoopeTarrazú, para el segundo semestre del año 2021 y primero del 2022

**Trabajo final de graduación para optar por el grado de Licenciatura en
Ingeniería Electromecánica**

Juan Elías Barrantes Vargas – 207730707

Alajuela, 2022

Capítulo 1: Parte introductoria

1 Hojas de aprobación para el trabajo final de graduación

1.1 Acta de aprobación

Universidad Técnica Nacional
Sede Central



Acta de Aprobación 08-2022

En la ciudad de Alajuela, a los 01 días del mes de setiembre del año 2022 el Tribunal evaluador conformado por las personas: Ing. Marvin Segura Trejos participando de forma presencial y Lic. Gerardo Alfaro, Ing. Limber Mora, Ing. Mariano Castro e Ing. Erick Vindas participando de forma remota ,proceden a evaluar la presentación del proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciado en Ingeniería Electromecánica del estudiante **Juan Elías Barrantes Vargas**, identificación **207730707**, titulado: **“Análisis de las diferentes fuentes energéticas para el proceso de secado de café en la empresa CoopeTarrazú, para el segundo semestre del año 2021 y primero del 2022”**, modalidad proyecto de graduación.

El Tribunal Evaluador apegado a las regulaciones y requisitos establecidos en el Reglamento de Trabajos Finales de Graduación de la Universidad Técnica Nacional, realizó la revisión del proyecto del estudiante otorgando una calificación de 9.6, dando como resultado

aprobado.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'M. Segura', is written over a horizontal line.

Ing. Marvin Segura Trejos

Director Licenciatura Electromecánica

1.2 Carta aprobación por parte del tutor

UNIVERSIDAD TECNICA NACIONAL LICENCIATURA EN INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

CARTA DE APROBACIÓN POR PARTE DEL TUTOR DEL TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN

Fecha: 08/08/2022

Señores miembros de la Comisión de Trabajo Final de Graduación

Estimados señores:

He revisado y corregido el Trabajo Final de Graduación, denominado:

“Análisis de las diferentes fuentes energéticas para el proceso de secado de café en la empresa CoopeTarrazú, para el segundo semestre del año 2021 y primero del 2022.” elaborado por el estudiante: Juan Elías Barrantes Vargas, como requisito para que el citado estudiante pueda optar por el grado académico de Licenciado en Ingeniería Electromecánica.

Considero que dicho trabajo cumple con los requisitos formales y de contenido exigidos por la Universidad, y por tanto lo recomiendo para su entrega ante el Comité de Trabajos Finales de Graduación.

Suscribe cordialmente,

LIMBER
MORA VEGA

Digitally signed by
LIMBER MORA VEGA
Date: 2022.08.10
19:37:07 -06'00'

Ing. Limber Mora Vega

1.3 Carta aprobación por parte del lector interno

UNIVERSIDAD TECNICA NACIONAL
LICENCIATURA EN INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

CARTA DE APROBACIÓN POR PARTE DEL LECTOR
DEL TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN

Fecha: 12/08/2022

Señores miembros de la Comisión de Trabajo Final de Graduación

Estimados señores:

He revisado y corregido el Trabajo Final de Graduación, denominado:

“Análisis de las diferentes fuentes energéticas para el proceso de secado de café en la empresa CoopeTarrazú, para el segundo semestre del año 2021 y primero del 2022.” elaborado por el estudiante: Juan Elías Barrantes Vargas, como requisito para que el citado estudiante pueda optar por el grado académico de Licenciado en Ingeniería Electromecánica.

Considero que dicho trabajo cumple con los requisitos formales y de contenido exigidos por la Universidad, y por tanto lo recomiendo para su entrega ante el Comité de Trabajos Finales de Graduación.

Suscribe cordialmente,



Gerardo Enrique Alfaro Oviedo

1.4 Carta aprobación por parte del lector externo

**UNIVERSIDAD TECNICA NACIONAL
LICENCIATURA EN INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA**

**CARTA DE APROBACIÓN POR PARTE DEL LECTOR
DEL TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN**

Fecha: 08/08/2022

Señores miembros de la Comisión de Trabajo Final de Graduación

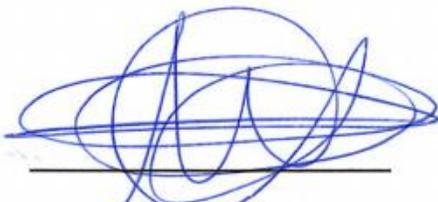
Estimados señores:

He revisado y corregido el Trabajo Final de Graduación, denominado:

“Análisis de las diferentes fuentes energéticas para el proceso de secado de café en la empresa CoopeTarrazú, para el segundo semestre del año 2021 y primero del 2022.” elaborado por el estudiante: Juan Elías Barrantes Vargas, como requisito para que el citado estudiante pueda optar por el grado académico de Licenciado en Ingeniería Electromecánica.

Considero que dicho trabajo cumple con los requisitos formales y de contenido exigidos por la Universidad, y por tanto lo recomiendo para su entrega ante el Comité de Trabajos Finales de Graduación.

Suscribe cordialmente,

A handwritten signature in blue ink, consisting of several overlapping loops and lines, positioned above a horizontal line.

Ing. Mariano Castro Padilla.

1.5 Carta aprobación por parte del filólogo(a)

Carta de revisión de la filóloga

San José, 13 de agosto del 2022

Señores
Escuela de Ingeniería Electromecánica
Universidad Técnica Nacional
Sede Central

Estimados señores:

Leí y corregí la tesina denominada **“Análisis de las diferentes fuentes energéticas para el proceso de secado de café en la empresa CoopeTarrazú, para el segundo semestre del año 2021 y primero del 2022”**, documento presentado por el estudiante **Juan Elías Barrantes Vargas**, cédula de identidad número 207730707, para optar por el grado académico de **Licenciatura en Ingeniería Electromecánica**.

Corregí el trabajo en aspectos tales como concordancia y construcción de párrafos, vicios del lenguaje que se trasladan a lo escrito, ortografía, puntuación y otros aspectos relacionados con el campo filológico, y desde mi punto de vista considero que este documento está listo para ser presentado, por cuanto cumple con los requisitos establecidos.

Atentamente,



Licenciada Zayda Ureña Araya
Cédula 104230946
Carné 0163840 Colegio de Licenciados en Ciencias y Letras

**UNIVERSIDAD TECNICA NACIONAL
LICENCIATURA EN INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA**

**CARTA DE APROBACIÓN POR PARTE DEL FILÓLOGO
DEL TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN**

Fecha: 13/08/2022

Señores

Miembros de la Comisión de Trabajo Final de Graduación

Estimados señores:

Leí y corregí el Trabajo Final de Graduación, denominado: **“Análisis de las diferentes fuentes energéticas para el proceso de secado de café en la empresa CoopeTarrazú, para el segundo semestre del año 2021 y primero del 2022.”**, elaborado por el estudiante: Juan Elías Barrantes Vargas, para optar por el grado académico de Licenciado en Ingeniería Electromecánica.

Corregí el trabajo en aspectos, tales como: construcción de párrafos, vicios del lenguaje que se trasladan a lo escrito, ortografía, puntuación y otros relacionados con el campo filológico, y desde ese punto de vista considero que está listo para ser presentado como Trabajo Final de Graduación, por cuanto cumple con los requisitos establecidos por la Universidad.

Se suscribe de Ustedes cordialmente,



Zayda Ureña Araya
Nombre del filólogo

1.6 Declaración jurada estudiante

DECLARACIÓN JURADA

El suscrito, **Juan Elías Barrantes Vargas** con cédula de identidad número 207730707, declaro bajo fe de juramento, conociendo las consecuencias penales que conlleva el delito de perjurio: Que soy el autor del presente trabajo final de graduación, modalidad memoria; para optar por el grado académico de Licenciado en Ingeniería Electromecánica de la Universidad Técnica Nacional y que el contenido de dicho trabajo es obra original del suscrito.

Fecha: 15/08/2022

Juan Elías Barrantes Vargas

Nombre del estudiante



2 Dedicatoria

Este trabajo es dedicado a mi familia, cuyos miembros me conocen y me apoyan desde el principio sin dudarlo, son el pilar fundamental para poder salir adelante con las diferentes circunstancias que se presentan, y es por lo que considero que en momentos donde se finalizan etapas debe darse el mérito y el espacio que estimo se merecen. Desde que recuerdo me han inculcado dar lo mejor de mí mismo, y en el paso por la Universidad se ha demostrado con la realidad, lo que da valor al reconocimiento y satisfacción personal por culminar esta etapa.

A los profesores que he conocido desde el 2016 que ingresé en la UTN, de todos se lleva un recuerdo y parte de los profesionales en los que nos convertimos se debe a ellos. Los motivo a mantener la mejora continua de la carrera y sacar el máximo provecho de las herramientas actuales, fortalecer la enseñanza teórico-práctica que caracteriza la enseñanza técnica y formar profesionales resilientes.

A los compañeros que tuve a lo largo del camino, con quienes se compartió el total de la carrera y llevo conmigo buenos recuerdos, excelentes personas a quienes les deseo lo mejor en sus vidas. Me siento orgulloso y agradecido por todo el tiempo compartido.

3 Agradecimientos

Le doy gracias a Dios por mantenerme a mí y mi familia con salud, a pesar de las situaciones presentadas en estos últimos dos años. Agradezco estar con bien y motivado para finalizar esta etapa que sin duda alguna no ha sido fácil; se debe entregar mucho y mantener la mentalidad positiva para salir adelante, dedicar horas de trabajo para concluir una etapa de la cual no todos tienen oportunidad, y es la razón por la que se debe ser agradecido.

Agradezco a los profesores que me acompañaron en esta etapa: Ing. Limber Mora Vega, profesor Gerardo Alfaro Oviedo y en especial al Ing. Steve Acosta Fonseca. Esto último por el compromiso que transmite, las ganas de hacer bien el trabajo y la motivación para que terminemos esta etapa, que es el objetivo de la universidad, aún más por el acompañamiento que da a todos los estudiantes. Espero que siga así y, al igual que a todos, les deseo lo mejor.

A CoopeTarrazú por abrirme las puertas; a don Carlos Vargas Leitón (Gerente General), por comunicarme con el Ing. Mariano Castro y el Ing. César Zamora, les doy las gracias por todo el apoyo. La comunicación fue muy buena y el compromiso para colaborar en esta investigación fue excelente; el asesoramiento y la disponibilidad se agradecen.

Agradezco a quienes han creído en mí y me han apoyado a lo largo del proceso.

4 Tabla de contenidos

Índice de contenido

Capítulo 1: Parte introductoria	2
1 Hojas de aprobación para el trabajo final de graduación	2
1.1 Acta de aprobación	2
1.2 Carta aprobación por parte del tutor	3
1.3 Carta aprobación por parte del lector interno	4
1.4 Carta aprobación por parte del lector externo	5
1.5 Carta aprobación por parte del filólogo(a)	6
1.6 Declaración jurada estudiante	8
2 Dedicatoria	9
3 Agradecimientos	10
4 Tabla de contenidos	11
5 Resumen	25
Capítulo 2: Cuerpo del trabajo de investigación	28
6 Introducción	28
7 Área de estudio (delimitación del problema, justificación, alcance y limitaciones en el proceso)	29
7.1 Línea de investigación	29
7.2 Tema de estudio	29
7.3 Objeto de estudio	29
7.4 Área de estudio	29
7.5 Delimitación del problema	30
7.6 Justificación	31

8	Situación actual del conocimiento del tema	37
9	Objetivos.....	40
9.1	Objetivo General	40
9.2	Objetivos Específicos	40
10	Alcance.....	41
11	Marco Teórico Referencial	42
11.1	Proceso de secado de café.....	42
11.2	Sistemas de secado.....	43
11.3	Equipos necesarios para el proceso de secado de café.....	44
11.4	Conceptos termodinámicos involucrados	48
11.4.1	Energía.....	48
11.4.2	Calor específico	48
11.4.3	Calor.....	48
11.4.4	Calor sensible, calor latente, calor total.....	49
11.4.5	Entalpía	51
11.4.6	Presión.....	52
11.4.7	Temperatura.....	53
11.4.8	Temperatura gases de combustión.....	54
11.5	Tipos de eficiencia: eficiencia de combustión, eficiencia térmica y total de la caldera	54
11.6	Poder calorífico inferior y superior	55
11.7	Afectaciones eficiencia energética en calderas de biomasa	55
11.8	Biomasa como combustible	58
11.9	Alternativas de residuos agrícolas orgánicos en Costa Rica	61

11.10	Alternativas de fuentes biomásicas comerciales	66
11.11	Fuentes energéticas derivadas del petróleo para la industria en Costa Rica	66
11.12	Electricidad como fuente de energía para caldera.....	67
12	Marco metodológico	69
12.1	Enfoque metodológico	69
12.2	Tipo de investigación	70
12.3	Hipótesis o preguntas generadoras	70
12.4	Definición de variables.....	71
12.5	Población	72
12.6	Técnicas e instrumentos para recolectar información.....	72
12.7	Desarrollo de la investigación	73
12.7.1	Diagnóstico	73
12.7.2	Dimensionar el sistema y asignar consumos	73
12.7.3	Históricos de consumo y producción.....	73
12.7.4	Estimación de demanda energética y pérdidas de energía en proceso	73
12.7.5	Definición y análisis de fuentes de energía a comparar	74
13	Presentación y análisis de resultados	75
13.1	Conocimiento básico para el proceso de secado de café.....	75
13.2	Generación y flujo de vapor en el beneficio	76
13.3	Diagnóstico y detalles del sistema de vapor	78
13.4	Consumo de madera a partir de históricos	82
13.5	Estimación de la energía requerida para extraer la humedad del grano	83

13.5.1	Capacidad de procesamiento de café de las guardiolas con un tiempo óptimo para el secado de 20 horas	84
13.6	Consumo de energía según capacidad de intercambiadores de calor instalados.....	86
13.7	Estimación de demanda de energía total por capacidad máxima en Guardiolas	87
13.8	Selección de alternativas de combustibles	92
13.9	Alternativas de combustibles biomásicos.....	94
13.9.1	Leña, Cascarilla (combustibles actuales)	94
13.9.2	Alternativas de fuentes biomásicas a evaluar	95
13.9.3	Fuentes de combustible tradicionales (GLP, Búnker C, Electricidad)	96
13.9.4	Estimar consumo de combustible para cada opción	98
13.9.5	Calcular indicador de la huella de carbono para cada alternativa	100
13.9.6	Identificar las variantes que generaría cada una de las alternativas planteadas, técnicas y de implementación	102
	Grupo 1 Residuos Biomásicos (Adaptación al sistema actual): Cascarilla de café, cascarilla de coquito, cascarilla de arroz	113
	Grupo 2 Biomasa comercial (Adaptación al sistema actual): Pellets y cascarilla de café.....	119
	Grupo 3 Derivados del petróleo y biomasa (Adaptación al sistema actual): Cascarilla de café y búnker C.....	120
	Grupo 4 Derivados del petróleo y biomasa (Adaptación al sistema actual): Cascarilla de café y GLP	122

Grupo 5 Electricidad y cascarilla de café (Sistema nuevo y adaptación): Incorporación de quemador en caldera Lambda y sustitución caldera Wickes por eléctrica	124
13.9.7 Estudio económico para las alternativas planteadas que abarque un rango de 10 cosechas y muestre cuál alternativa generaría mayor rentabilidad ante una eventual implementación	128
13.9.8 Definir variables a evaluar para la selección del combustible	138
13.9.9 Establecer una matriz de selección para combustible propuesto	139
13.9.10 Propuesta de diseño	141
14 Conclusiones	143
15 Recomendaciones	145
Capítulo 3: Parte final	147
16 Referencias Bibliográficas	147
17 Apéndices	154
17.1 Apéndice 1: Propuestas de análisis económico	154
17.2 Apéndice 2: Cálculo tornillos sin fin	159
17.2.1 Área de relleno del canal	159
17.2.2 Paso del tornillo	159
17.2.3 Velocidad de desplazamiento del material	160
17.2.4 Capacidad de transporte de material	160
17.2.5 Tratamiento de la ecuación para encontrar diámetro del tornillo	161
17.3 Apéndice 3: Cálculo potencia de accionamiento requerida	163
17.3.1 Potencia de accionamiento en vacío	163

17.3.2	Potencia de desplazamiento del material.....	164
17.3.3	Potencia para transportador de tornillo inclinado	165
17.3.4	Potencia total requerida para el trabajo.....	166
17.4	Apéndice 4: Acometida eléctrica y dispositivos para equipos nuevos	167
17.4.1	Potencias de consumo eléctrico.....	167
17.4.2	Cálculo calibre conductores	167
17.4.3	Protecciones seleccionadas.....	170
17.4.4	Canalización.....	171
18	Anexos	173
18.1	Anexo 1: Poder calórico de combustibles RECOPE	173
18.2	Anexo 2: Ficha técnica de GLP RECOPE	174
18.3	Anexo 3: Ficha técnica del búnker C RECOPE	175
18.4	Anexo 4: Precios combustibles RECOPE	176
18.5	Anexo 5: Valores subproductos de café derivados del beneficiado	177
18.6	Anexo 6: Temperatura agua saturada	178
18.7	Anexo 7: Presiones agua saturada.....	179
18.8	Anexo 8: Características de intercambiadores de calor instalados en CoopeTarrazú.....	179
18.9	Anexo 9: Resultado de análisis para reporte operacional de Caldera Wickes Boiler	180
18.10	Anexo 10: Resultado de análisis para reporte operacional de Caldera Lambda, Constructora Field.....	180
18.11	Anexo 11: Poder calórico de biomásas	181

18.12	Anexo 12: Poder calórico inferior del café	182
18.13	Anexo 13: Tablas temperatura de agua saturada.....	183
18.14	Anexo 14: Cálculo de pérdidas por radiación	184
18.15	Anexo 15: Pérdidas de calor por paredes exteriores	185
18.16	Anexo 16: Ficha técnica Pelletics	186
18.17	Anexo 17: Eficiencia calderas estudio previo.....	187
18.18	Anexo 18: Fórmula cálculo tasa de condensación.....	187
18.19	Anexo 19: Propiedades del gas ideal aire	188
18.20	Anexo 20: Factores de emisión dióxido de carbono en combustibles comunes	189
18.21	Anexo 21: Factores de emisión dióxido de carbono en usos de electricidad	189
18.22	Anexo 22: Líneas poliducto territorio nacional	190
18.23	Anexo 23: Distancia "Terminal El Alto" hasta CoopeTarrazú....	191
18.24	Anexo 24: Rango de cobertura Coopesantos en el cantón de Tarrazú	192
18.25	Anexo 25: Pictogramas de peligro	193
18.26	Anexo 26: Factores de conversión	194
18.27	Anexo 27: Información técnica quemador modelo Y-2000	195
18.28	Anexo 28: Tarifa eléctrica Coopesantos R.L. que paga el beneficio	195
18.29	Anexo 29: Cálculo costo por kW/h según consumo de la empresa	196
18.30	Anexo 30: Indicadores económicos para supuestos de inflación, periodo 2021-25	196

18.31 Anexo 31: Uso cascarilla en procesos de secado	197
--	-----

Índice de gráficos

Gráfico 1. Historial de fanegas recibidas en CoopeTarrazú	31
Gráfico 2. Historial fanegas recibidas en el Beneficio Central CoopeTarrazú	33

Índice de tablas

Tabla 1. Variables de consumo en calderas.....	34
Tabla 2. Definición de variables de estudio	71
Tabla 3. Resumen de tramos e intercambiadores del sistema de vapor	80
Tabla 4. Dimensiones aproximadas de calderas	81
Tabla 5. Historial de consumos de madera para la generación de vapor ...	82
Tabla 6. Kilogramos de agua según % de humedad contenido en grano por cosecha.....	83
Tabla 7. Kilogramos de agua por fanega según % de humedad contenido en grano.....	84
Tabla 8. Capacidad de procesamiento de café en guardiolas por tramo de descrito en ruta de vapor	85
Tabla 9. Capacidad de secado de agua en kg/h	85
Tabla 10. Consumo de vapor de intercambiadores estimado por cosecha	87
Tabla 11. Descripción de parámetros calculados para demanda total de energía.....	88
Tabla 12. Tasa de condensación en tubería.....	90
Tabla 13: Criterio para la selección de combustible biomásico	93
Tabla 14. Características de cascarilla de café y leña.....	94
Tabla 15. Características de las alternativas biomásicas seleccionadas ...	95
Tabla 16. Características GLP y Búnker C	96

Tabla 17. Indicadores de emisiones de dióxido de carbono para combustibles comunes	97
Tabla 18. Consumo estimado para cada alternativa de combustible según consumo energético estimado	99
Tabla 19. Emisiones de CO ₂ estimadas por combustibles	100
Tabla 20. Toneladas métricas de CO ₂ generadas en 20 horas de trabajo	101
Tabla 21. Equivalencia bosque necesario para absorber CO ₂ generado en 20 h de trabajo	101
Tabla 22. Criterios para escogencia de fuentes biomásicas por evaluar..	109
Tabla 23. Priorización de combustibles biomásicos	110
Tabla 24. Grupos de combustibles para análisis de variantes.....	112
Tabla 25. Valores de placas y calculados para las calderas	113
Tabla 26. Información de quemador para combustibles derivados de residuos biomásicos, caldera Lambda.....	114
Tabla 27. Consumo de combustibles biomásicos, caldera Lambda	116
Tabla 28. Información de quemador para combustibles derivados de residuos biomásicos, caldera Wickes	117
Tabla 29. Consumo de combustibles biomásicos, caldera Wickes	119
Tabla 30. Consumo cascarilla de café y pellets, ambas calderas	119
Tabla 31. Información quemador búnker	121
Tabla 32. Consumo de búnker C en ambas calderas.....	121
Tabla 33. Autonomía consumo de búnker por caldera	122
Tabla 34. Información quemador Gas Licuado de Petróleo (GLP)	123
Tabla 35. Consumo de Gas Licuado de Petróleo (GLP) en ambas calderas	123
Tabla 36. Autonomía consumo de Gas Licuado de Petróleo (GLP) por caldera	124
Tabla 37. Consumo energético estimado para caldera eléctrica	125
Tabla 38. Consumo energético caldera eléctrica.....	126
Tabla 39. Información caldera eléctrica.....	126

Tabla 40. Consumo y precio de combustibles por evaluar	129
Tabla 41. Consumos promedio combustible según histórico de cosechas	130
Tabla 42. Porcentaje promedio de fanegas recibidas en Beneficio Central	132
Tabla 43. Pronóstico de fanegas Beneficio Central	133
Tabla 44. Pronóstico consumo de combustibles próximas 10 cosechas..	134
Tabla 45. Supuestos para valoración de la depreciación	136
Tabla 46. Depreciación de equipos	137
Tabla 47. Matriz selección proyecto	139
Tabla 48. Coeficiente de relleno según carga	159
Tabla 49. Coeficiente de disminución de flujo de material.....	160
Tabla 50. Cálculo variables tornillo sin fin.....	162
Tabla 51. Factor de buje para el colgante	163
Tabla 52. Factor de diámetro del tornillo "F _d "	163
Tabla 53. Potencia accionamiento para los diferentes combustibles	164
Tabla 54. Factor por tipo de helicoidal del tornillo	164
Tabla 55. Factor aplicado por material "F _m ".....	165
Tabla 56. Factor por # de paletas por paso	165
Tabla 57. Potencia requerida por desplazamiento del material	165
Tabla 58. Potencia requerida por inclinación del tornillo	166
Tabla 59. Potencia total requerida para el transporte del material	166
Tabla 60. Potencia de consumo para equipo a instalar.....	167
Tabla 61. Corriente de consumo de los equipos y conductor seleccionado	169
Tabla 62. Área conductores seleccionados	171
Tabla 63. Características de los intercambiadores de calor	179

Índice de imágenes

Ilustración 1. Distribución de red de vapor (2016)	36
Ilustración 2. Partes principales del fruto de café	42
Ilustración 3. Posibilidades para el secado de café	43
Ilustración 4. Ilustración tipos procesos de secado	44
Ilustración 5. Calentamiento por convección	46
Ilustración 6. Gráfico comportamiento energía para evaporar un kilogramo de agua a 1 atm	49
Ilustración 7. Curva de calentamiento del agua	52
Ilustración 8. Comparación de escalas de temperatura.....	53
Ilustración 9. Comparación de ciclo carbono en combustibles fósiles vs. biomasa	59
Ilustración 10. Energía utilizada por combustible en el sector industrial a nivel nacional	60
Ilustración 11. Oferta potencial energética de biomasa en Costa Rica Fuente: MINAE y DSE (2017, p. 27)	62
Ilustración 12. Principales fuentes de biomasa y clasificación.....	63
Ilustración 13. División Regional-Cantonal de Costa Rica.....	64
Ilustración 14. Potencial de generación de energía biomásica por región..	65
Ilustración 15. Especificaciones técnicas pellets distribuidos por la empresa Pelletics.....	66
Ilustración 16. Tipos de calderas de electrodo	68
Ilustración 17. Fases del proceso cuantitativo	69
Ilustración 18. Proceso de generación y flujo de vapor	77
Ilustración 19. Croquis del sistema de vapor en Beneficio Central CoopeTarrazú	79
Ilustración 20. Hornos, Caldera Wickes.....	102
Ilustración 21. Compartimientos alimentación de madera, Caldera Wickes	103
Ilustración 22. Alimentadores de cascarilla, Caldera Wickes.....	104

Ilustración 23. Tolva alimentación de cascarilla y divisiones, Caldera Wickes	104
Ilustración 24. Hidrociclón, Caldera Wickes.....	105
Ilustración 25. Chimenea, Caldera Wickes	105
Ilustración 26. Hogar y compuerta de alimentación madera, Caldera Lambda	106
Ilustración 27. Tolva de almacenamiento de cascarilla y alimentación a caldera, Caldera Lambda.....	106
Ilustración 28. Hidrociclón, Caldera Lambda	107
Ilustración 29. Chimenea, Caldera Lambda.....	107
Ilustración 30. Imagen ilustrativa del sistema de alimentación propuesto para biomasa en caldera Lambda	115
Ilustración 31. Imagen ilustrativa del sistema de alimentación propuesto para biomasa en caldera Wickes	118
Ilustración 32. Actividades principales por grupo.....	127
Ilustración 33. Pronóstico cosechas, método estadístico Winters	131
Ilustración 34. Propuesta análisis económico Grupo 1	154
Ilustración 35. Propuesta análisis económico Grupo 2.....	155
Ilustración 36. Propuesta análisis económico Grupo 3.....	156
Ilustración 37. Propuesta análisis económico Grupo 4.....	157
Ilustración 38. Propuesta análisis económico Grupo 5.....	158
Ilustración 39. Imagen de referencia tornillo sin fin y canal	159
Ilustración 40. Corriente plena carga de motores trifásicos de corriente alterna	167
Ilustración 41. Artículo 430.22	168
Ilustración 42. Tabla 310.15 (B)(16)	169
Ilustración 43. Tabla 430.25 NEC 2014, valor ajuste protecciones para motores	170
Ilustración 44. Tabla cinco dimensiones de conductores aislados, capítulo 9, NEC 2014.....	171

Ilustración 45. Tabla 1 Porcentaje de llenado de tuberías	172
Ilustración 46. Tabla 4 dimensiones tubería EMT	172
Ilustración 47. Poder calórico de combustibles RECOPE.....	173
Ilustración 48. Ficha técnica del GLP RECOPE	174
Ilustración 49. Ficha técnica del Búnker C RECOPE	175
Ilustración 50. Precios vigentes para combustibles RECOPE	176
Ilustración 51. Valores para derivados del café mediante el proceso de beneficiado.....	177
Ilustración 52. Temperatura agua saturada	178
Ilustración 53. Presiones agua saturada.....	179
Ilustración 54. Información poder calórico de diferentes fuentes de biomasa	181
Ilustración 55. Poder calórico inferior del café	182
Ilustración 56. Tabla de temperatura para el agua saturada	183
Ilustración 57. Fórmula para cálculo de pérdidas de calor por radiación..	184
Ilustración 58. Pérdidas de calor por paredes exteriores.....	185
Ilustración 59. Ficha técnica Pelletics	186
Ilustración 60. Eficiencia del sistema de vapor en CoopeTarrazú	187
Ilustración 61. Fórmula cálculo de tasa de condensación	187
Ilustración 62. Propiedades del gas ideal aire	188
Ilustración 63. Factores de emisión de dióxido de carbono para combustibles comunes	189
Ilustración 64. Factores de emisión de dióxido de carbono en usos de electricidad	189
Ilustración 65. Poliducto Recope en el territorio nacional	190
Ilustración 66. Distancia "Terminal El Alto" hasta CoopeTarrazú	191
Ilustración 67. Electrificación en Tarrazú	192
Ilustración 68. Pictogramas de peligro.....	193
Ilustración 69. Factores de conversión	194
Ilustración 70. Características quemador modelo Y-2000	195

Ilustración 71. Tarifa eléctrica de Coopesantos R.L.	195
Ilustración 72. Cálculo costo kWh por consumo de energía en la empresa	196
Ilustración 73. Indicadores económicos, supuestos de inflación período 2021- 25	196
Ilustración 74: Aplicación cascarilla en micro beneficio	197

5 Resumen

En este trabajo se considera la relación de diferentes alternativas de combustible para ser utilizado en calderas para el proceso de secado de café, por lo que se estiman el consumo energético del proceso y el vapor que se requiere para el funcionamiento adecuado de los intercambiadores de calor. Los combustibles tomados en cuenta son los siguientes: biomásicos comerciales y residuos orgánicos, búnker, gas y electricidad.

Se realizaron una etapa de conocimiento básico del beneficiado de café y un diagnóstico del sistema de vapor actual. El punto de interés es el proceso de secado de café, donde el grano entra en un rango de humedad aproximado de 30-35% (donde contiene 17.86 kilogramos de agua por fanega) y debe llegarse al 11% (con 6.31 kilogramos de humedad por fanega); para esto se utilizan secadoras giratorias tipo guardiolas, en las cuales entra aire caliente por medio de un ventilador que lo pasa por los intercambiadores de calor, y la temperatura adecuada es de 60-65 °C.

Como parte del diagnóstico se realizó un croquis con las medidas del sistema de vapor y se hizo un análisis termográfico que incluye tuberías, intercambiadoras, calderas y chimeneas; con ello fue posible dimensionar las pérdidas de energía por transferencia de calor debido a estos componentes. En este punto se relacionan las fórmulas teóricas con los valores prácticos, para poder estimar un cálculo de la energía que se pierde por estos motivos.

La capacidad máxima de secado, de acuerdo con las guardiolas instaladas, es de 2670 fanegas de café, con un total de 30838.98 kilogramos de agua que debe evaporarse; para un tiempo aproximado de 20 horas de secado se deben extraer 1541.95 kg/h. Esto equivale a extraer 3 862 444.05 kJ/h de energía, para poder secar el café en el tiempo considerado óptimo para el beneficio. Sin embargo, este es un valor que no podría relacionarse directamente con el consumo de combustible de las calderas, porque los verdaderos consumidores de vapor son los intercambiadores, que les transfieren la energía a las guardiolas por medio del aire.

La demanda total de energía se estima de la siguiente manera: consumo de vapor de los intercambiadores de 181.44 kg/h para un total de 37 unidades, pérdidas en tuberías y accesorios, pérdidas en retorno de condensado, pérdidas en chimeneas, pérdidas por transferencia de calor en paredes y pérdidas por eficiencia teórica de las calderas. Al considerar los puntos anteriores, se obtiene un total de energía de 24 676 017.33 kJ/h, la cual consume el proceso actualmente de acuerdo con lo calculado, y es el valor de partida para estimar los consumos de combustibles.

Se recopila información sobre los diferentes poderes caloríficos de las alternativas biomásicas, los que se encuentran en un rango de 13.80-20.23 MJ/kg para el poder calorífico inferior. Es lo mismo para los derivados del petróleo, el búnker con un poder calorífico de 41.50 MJ/L y el Gas Licuado de Petróleo (GLP) de 48.00 MJ/L; para estas fuentes de energía se identifican los factores de emisión de 3.101 y 1.611 kgCO₂/L, y para la electricidad se tiene un factor de 0.0282 kgCO₂kWh.

Al generar grupos de combustibles por características similares se logra escoger la opción más viable, se relaciona el factor de emisión, indicadores económicos, proyectando los consumos estimados en relación con el comportamiento estimado para las próximas 10 cosechas y los indicadores de consumo de combustible por fanega, donde se obtiene como mejor propuesta el Grupo 1 (cascarilla de café, cascarilla de coquito y cascarilla de arroz).

Según lo anterior, se propone realizar una adaptación en el sistema actual para el uso de quemadores biomásicos, con capacidad de utilizar tres combustibles diferentes. También, modificar el abastecimiento de las tolvas de almacenamiento previo hacia los quemadores y poder utilizar principalmente la cascarilla de café, para lo cual se cuenta con sistemas de distribución y almacenamiento en la cooperativa.

Capítulo 2: Cuerpo del trabajo de investigación

6 Introducción

Se desarrollará un análisis para el cambio de combustible en las calderas utilizadas en la empresa CoopeTarrazú, la cual dedica su actividad principal al procesamiento de café en la zona de Los Santos. Actualmente utiliza madera como fuente energética; sin embargo, por problemas de abastecimiento tanto en tiempo como en cantidad, se desean analizar algunas alternativas para obtener una recomendación fundamentada sobre qué tipo de fuente alternativa se podría evaluar.

El vapor generado alimenta el intercambiador de calor, donde se introduce el aire para que llegue a las secadoras tipo guardiola con las que cuenta la empresa, y así conseguir las condiciones necesarias para el proceso de secado del café. Se considerarán otras alternativas de biomasa disponibles en la zona para alimentar las calderas; también búnker, gas o electricidad como opciones para definirse como fuente de energía; además, se debe analizar la viabilidad ante una posible implementación del proyecto.

Para la selección de la nueva fuente de energía se va a considerar el impacto ambiental que genere su aplicación, el poder calorífico, el consumo estimado, el rango de precio según consumo y la disponibilidad con la que se puede tener en el sitio. Para cada alternativa definida se realizará el análisis económico ante una posible implementación del sistema, contemplando las modificaciones que deben llevarse a cabo para el cambio.

Se enfoca el estudio en el proceso y la necesidad de poder contar con las calderas durante el tiempo de la cosecha, para abastecer la demanda de energía en el proceso. También, se investigarán el estado actual de las tuberías de vapor y los posibles impactos en la eficiencia de la caldera.

7 Área de estudio (delimitación del problema, justificación, alcance y limitaciones en el proceso)

7.1 Línea de investigación

- Sistemas energéticos industriales.

7.2 Tema de estudio

- Investigación de diversas fuentes de energía que sustituyan el consumo de madera para la generación de vapor.

7.3 Objeto de estudio

- El efecto ambiental, económico y técnico que generaría cambiar el tipo de fuente energética en las calderas utilizadas para el proceso de secado en la empresa CoopeTarrazú, según la demanda de energía de las cosechas 2018-2019, 2019-2020, 2020-2021 y 2021-2022.

7.4 Área de estudio

La empresa CoopeTarrazú, cuya actividad principal es procesar el café de sus asociados para comercializarlo al extranjero y a nivel nacional, desea analizar alternativas para el sistema utilizado en el proceso de secado del café. Se deben investigar fuentes de energía disponibles para sustituir la madera como fuente principal de consumo en calderas de biomasa, buscando alternativas para el mismo tipo de caldera o comparando con otras fuentes de energía y, a su vez, evaluar el cambio de los equipos que se tienen actualmente. Se consideran los siguientes aspectos:

- Alternativas de biomasa con las que se cuente en la zona y a nivel nacional, dando prioridad a la investigación de los residuos biomásicos que genera la cooperativa en los diferentes procesos.

- Fuentes alternativas de consumo energético para calderas actuales que cumplan con las condiciones requeridas.
- Investigación de la capacidad calórica de fuentes de energía que se van a analizar.
- Impacto ambiental que genere cada combustible en estudio o alternativa de dispositivo planteada.
- Análisis económico, para considerar la solución planteada ante una eventual implementación.

7.5 Delimitación del problema

Se han tenido problemas con el abastecimiento de madera para las calderas, ya que se consume un aproximado de 7486 m³ de madera por cosecha, y esto mismo lleva a una afectación en los tiempos de entrega del material. Para el año 2021 (cuando se inicia la investigación) se cuenta con un déficit en el ingreso de madera aproximado a 6700 m³, el cual se provoca por su escasez en la zona y las condiciones climatológicas afectan para adquirir este combustible, según conversaciones realizadas con los ingenieros de la cooperativa.

Se desea disminuir el impacto ambiental, donde para el proceso de secado de café se deja una huella de 2.95 toneladas de CO₂ generado por quemar la madera, esto según el consumo y obtenido mediante una aplicación que estima dicho impacto (Aplicación CR-CAFÉ del ICAFE). Según lo anterior, esto conlleva a estudiar otras fuentes de energía disponibles, e incluso considerar el reemplazo de una caldera de biomasa por algún otro combustible.

7.6 Justificación

CoopeTarrazú se ubica en la zona de Los Santos, en el cantón de Tarrazú; cuenta con alrededor de 5000 asociados, y su actividad principal es el procesamiento de café para su comercialización a nivel nacional e internacional. Como parte de su compromiso ambiental, se basan en una producción sostenible y en disminuir el impacto de la huella de carbono (CoopeTarrazú R.L., 2021).

Esta cooperativa procesa grandes cantidades de café, como se puede apreciar en el siguiente gráfico:

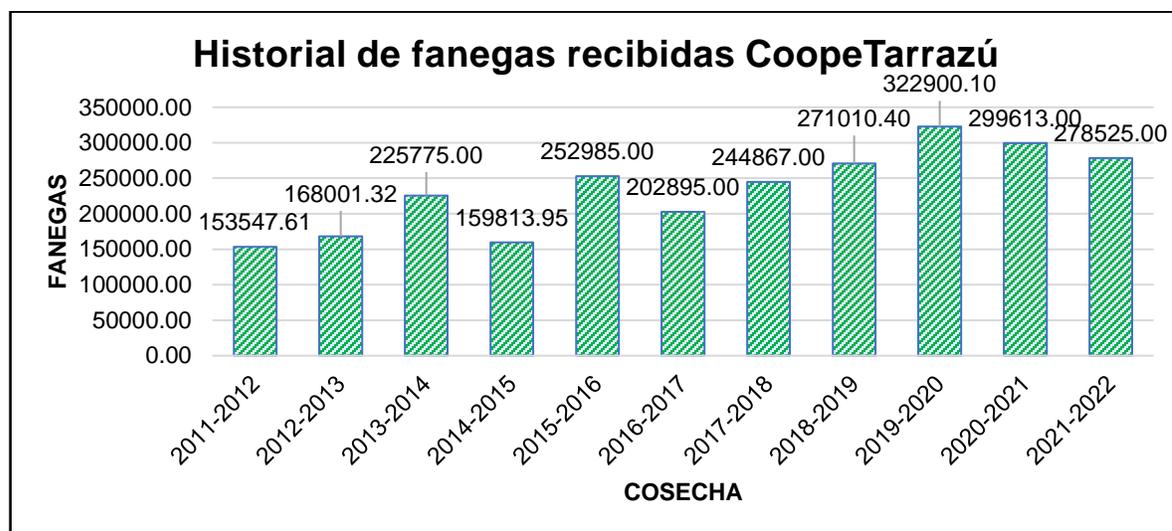


Gráfico 1. Historial de fanegas recibidas en CoopeTarrazú
Fuente: Información suministrada por la empresa (2022)

De acuerdo con el gráfico anterior, al considerar las grandes cantidades de café que se reciben en el período de cosecha, es evidente que se requiere mucha energía para lograr el secado, porque este es quien ayuda a procesar y mantener las propiedades de calidad en el café, ya que este se debe almacenar con valores muy bajos de humedad, por lo que el uso del vapor cumple una función muy importante. El secado es un punto crítico para mantener la calidad y características que se desean en el producto final.

El proceso de secado consiste en calentar el café por medio de máquinas de secado rotativas de alta capacidad, en las cuales el café es deshidratado mediante un flujo continuo y controlado de aire caliente. Este aire se calienta por medio de un intercambiador de calor que funciona con vapor proveniente de las calderas; el aire frío pasa a través de este intercambiador e ingresa a la secadora a temperaturas promedio de entre 60-65 °C.

Al contar con problemas para el abastecimiento de la materia prima, surge como una necesidad realizar el análisis del efecto que generaría considerar otras fuentes de energía para estas calderas, o investigar alternativas que cumplan con los requisitos para el secado de café. Además, como parte de los compromisos de la empresa con el medio ambiente, se debe considerar en estas opciones la alternativa que ayude a reducir la huella de carbono, por lo que es un punto importante para tener en cuenta en este estudio: a pesar de utilizarse la biomasa, se desea mejorar, dada la problemática antes expuesta.

Ante el planteamiento de alguna solución viable, se considerarán los estudios técnicos y económicos ante una eventual implementación como respaldo para la aprobación de este como proyecto de mejora en la empresa. Se van a considerar datos históricos para el consumo en las cosechas recientes, tanto de fuente energética como de vapor, sin dejar de lado los pronósticos y capacidad del beneficio para manejar café en los tiempos de cosecha.

Es importante mencionar que el estudio será enfocado en el Beneficio Central de CoopeTarrazú; este cuenta con registros desde el año 2018, tiene dos calderas que suministran el vapor necesario para que puedan operar 37 intercambiadores de calor.

En el siguiente gráfico se muestran las fanegas procesadas y los quintales de café producidos en este beneficio:

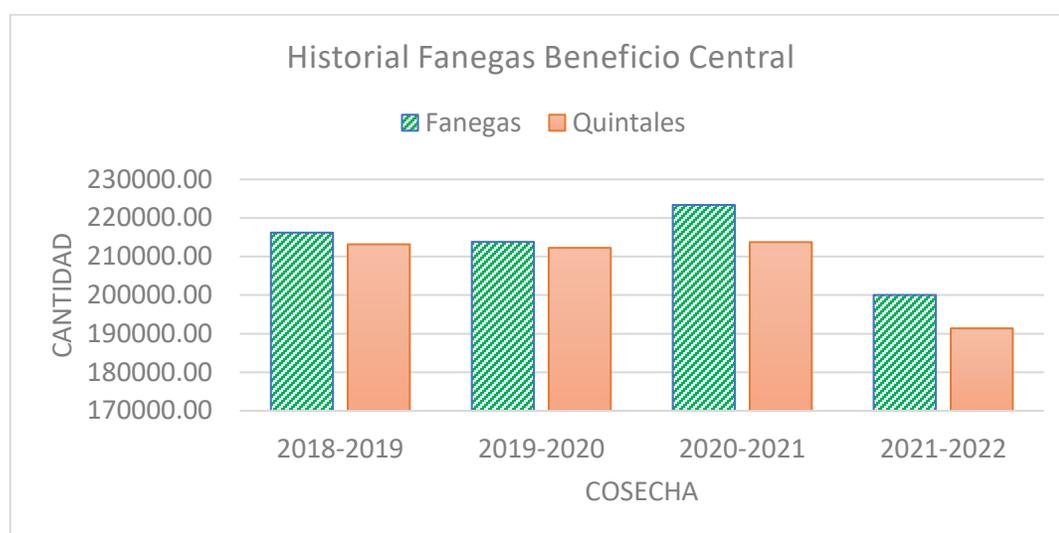


Gráfico 2. Historial fanegas recibidas en el Beneficio Central CoopeTarrazú

Fuente: Información suministrada por la empresa (2022)

El gráfico anterior representa las fanegas que entregan los asociados en el Beneficio Central de la cooperativa; en el cuadro que hace referencia a los quintales de café refleja el producto final que se obtiene. Por lo tanto, representa justamente las entradas y salidas del proceso de beneficiado para cada una de las cosechas.

La generación de vapor tiene puntos de mejora (aperturas constantes para alimentación de madera, sistema de retorno de condensado, transferencia de calor en paredes de las calderas) y la antigüedad de los equipos influyen en parte para tener pérdidas de energía en el proceso. Parte de la información recopilada anteriormente refleja bajas eficiencias en los equipos. A continuación, se muestran algunos datos suministrados por la empresa:

Tabla 1. Variables de consumo en calderas

Variables	Caldera Wickes (Caldera grande)	Caldera Lambda (Caldera pequeña)	Ambas calderas	Intercambiador
Horas acumuladas de operación 20-21(h)	2140	2568	-	-
Consumo leña, cosecha 20-21 (m ³)	4316.27	3170.05	-	-
Consumo eléctrico motores (kW/h)	69.75	89.89	106.68	-
Área de cuarto de calderas (m ²)	-	-	251.75	-
Uso	-	-	Calentamiento de aire por intercambiador de calor para secado de café, 60-65 °C	-
Marca, modelo, etc.	Wickes Boiler	Constructora Field Barcelona, España	-	-
Modelo	1956	1982	-	-
Tipo	Acuatubular	Pirotubular	-	-
Eficiencia	82%	65%	-	-
Consumo	-	-	-	181.44 kg/h (400 lb/h)
Presión operación	-	-	4.8 bar (68 psi)	2.5 bar (35.55 psi)
Categoría	-	-	B	-
Combustible	-	-	Biomasa	-

Fuente: Información suministrada por la empresa (2021)

La tabla anterior recopila la información general del sistema de generación de vapor con el que se cuenta, y el consumo de los intercambiadores de calor que se utilizan en el proceso. También, recopila valores de placa de cada una de las calderas y las presiones de operación actual; de los puntos a considerar se tienen los valores de eficiencia para cada una, siendo un 82% para la caldera Wickes (de mayor tamaño) y un 65% para la caldera Lambda.

También, se cuenta con un diagrama de la distribución de vapor facilitado por la empresa, donde se aprecian los consumidores de vapor y su distribución a lo largo de la red de vapor. Este fue realizado en el año 2016 y para el año en curso hay cinco unidades más que serán consideradas:

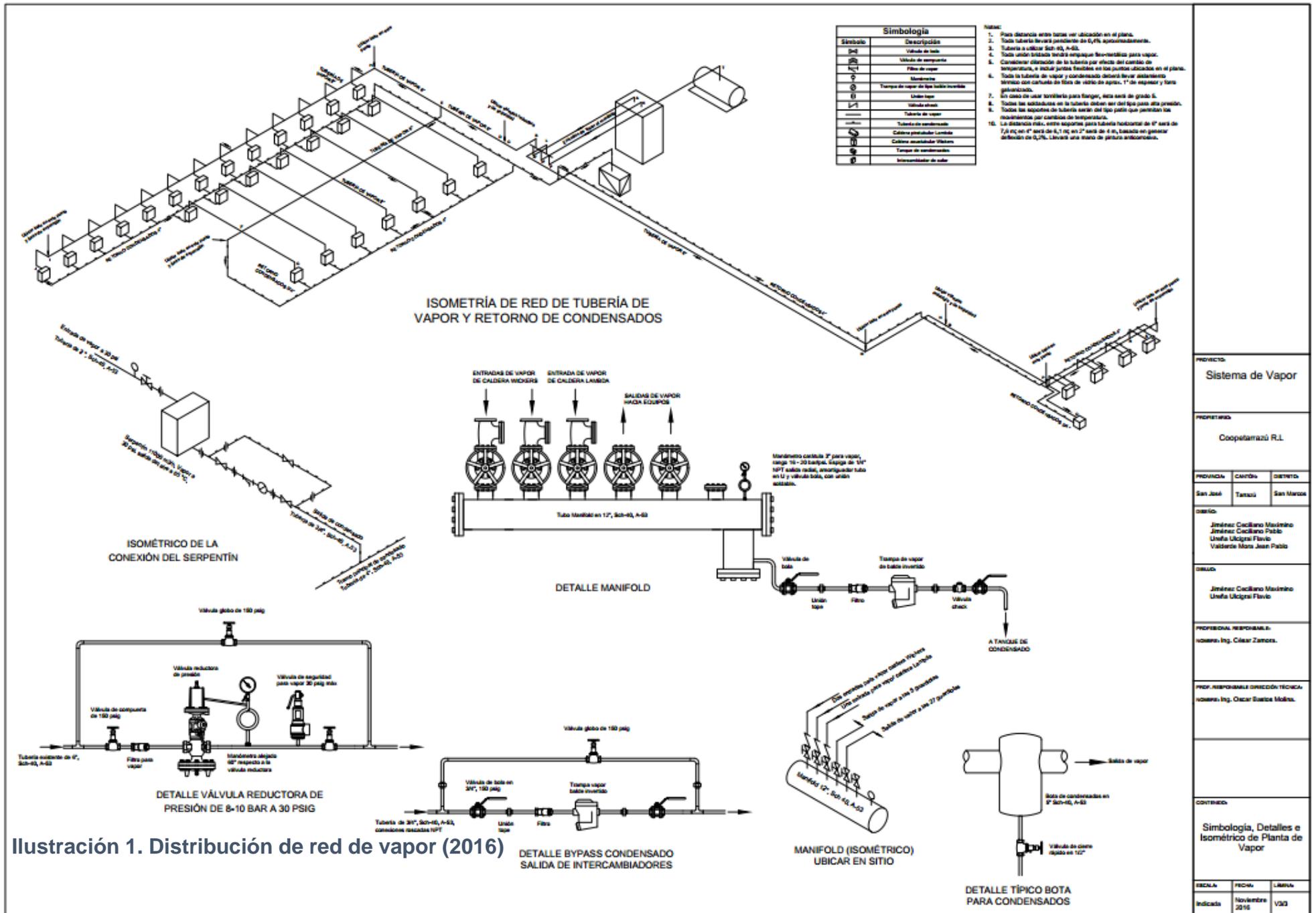


Ilustración 1. Distribución de red de vapor (2016)

Fuente: Diagrama suministrado por la empresa (2022)

PROYECTO
Sistema de Vapor

PROPIETARIO
Coopetrazú R.L

PROVINCIA	CANTÓN	DISTRITO
San José	Tarrazú	San Marcos

DISEÑO
Jiménez Ciciliano Maximino
Jiménez Ciciliano Pablo
Ureña Uricapí Flavia
Valderrama Mora Jean Pablo

DESAÑO
Jiménez Ciciliano Maximino
Ureña Uricapí Flavia

PROFESIONAL RESPONSABLE
INGENIERO Ing. César Zamora

PROF. RESPONSABLE DISEÑO TÉCNICO
INGENIERO Ing. Oscar Santos Molina

CONTENIDO
Simbología, Detalles e Isométrico de Planta de Vapor

ESCALA	FECHA	LÍNEA
Indicada	Noviembre 2016	V3/0

8 Situación actual del conocimiento del tema

Referencia 1, documentos revisados:

- Urquiza, Acero y Rodríguez (2011). *Escuela Superior Politécnica del Litoral*.
- Acero Peñafiel y Rodríguez Alvarado (2011). *Escuela Superior Politecnica del Litoral*.

Comentario:

En las direcciones de los documentos anteriores, el primero representa un artículo y el segundo el documento de la investigación de donde se realizó este artículo, y ahí se encuentra un estudio realizado en el país de Ecuador. Hacen referencia al cambio de fuente energética para la producción de vapor, de diésel a cascarilla de arroz, considerando las implicaciones que genera este cambio en el sistema.

Llevan a cabo el análisis de disponibilidad de la nueva fuente, la capacidad calorífica y la comparación entre ambos desde el punto de vista económico. Para el estudio que se desea realizar, se debe llevar de una manera similar, ya que se desean comparar varias situaciones para llegar a seleccionar alguna opción adecuada para el proceso.

Referencia 2, documento revisado:

- Segarra (2014-2015). *Estudio de la viabilidad de la generación de vapor para usos industriales basado en combustión de biomasa*.

Comentario:

Este se refiere a un estudio desarrollado en España; en él se mencionan alternativas de biomasa para la generación de vapor. Se hace una comparación sobre el costo de generación de una caldera de gas con una que utilice biomasa, cambio similar a lo que se pretende plantear con este estudio, entre la madera y las otras fuentes de energía.

Se presenta una tabla comparativa de resultados, con las diferentes condiciones de las calderas y las capacidades para generar el vapor. Se analiza a fondo en el diseño y se plantea una propuesta de inversión económica para la implementación del proyecto con las condiciones seleccionadas, y si el retorno de la inversión, con base en la recuperación gracias al cambio de fuente de energía de un combustible fósil a biomasa, es rentable.

Referencia 3, documento revisado:

- Vinueza (enero de 2016). *Aprovechamiento del recurso biomasa a partir de los desechos de madera para una caldera de vapor.*

Comentario:

Por lo que se puede rescatar de la información observada en este estudio, es el análisis y el manejo de datos para comprender la capacidad de la manera como fuente de biomasa para las calderas, por lo cual se puede comprender su comportamiento, los puntos a favor y los cálculos del comportamiento de la energía en las calderas.

Referencia 4, documento revisado:

- *Repositorio Universidad Científica del Sur (2019).*

Comentario:

En este documento se hace referencia a diferentes tipos de biomasa, su origen y características, sin entrar en gran detalle. Además, se menciona la manera por la cual puede determinarse el potencial de energía de algún material a analizar, y se dan algunas recomendaciones para el manejo de la biomasa ante las diversas aplicaciones que se le pueda dar.

Referencia 5, documento revisado:

- Vivas Carmona, Paz Torres y Rojas Carvajal (2007). *Red UAO*.

Comentario:

Para este estudio, se consideran las características del café, con el propósito de diseñar una máquina de vapor que cumpla con las condiciones necesarias para desarrollar el proceso de secado. Este planteamiento surge para obtener un secado uniforme y que realice el proceso de una manera más rápida, cuya finalidad es mantener el café en las mejores condiciones, y así no se vea afectado en los parámetros de calidad.

Lo importante es conocer el proceso e identificar las condiciones que deben llevarse a cabo en el secado, lo cual establece la carga de energía que se necesita y el dimensionamiento de las partes involucradas. Por ejemplo, el flujo de aire necesario y la temperatura que se debe generar para el proceso, que son condiciones que se deben manejar para identificar la fuente de energía que se quiere plantear con el estudio.

9 Objetivos

9.1 Objetivo General

- Analizar la viabilidad de la sustitución de madera como fuente energética en las calderas de la empresa CoopeTarrazú por otro combustible alternativo, que cumpla con las condiciones necesarias para que se realice el proceso de secado del café con aire caliente a una temperatura que oscile entre 60-65 °C, esto en el segundo semestre del año 2021 y primero del 2022.

9.2 Objetivos Específicos

1. Investigar alternativas para el cambio de combustible de las calderas actuales por alguna otra fuente de energía biomásica disponible, o en su defecto búnker, gas o electricidad, para que cumpla con las condiciones necesarias para el proceso de secado del café.
2. Determinar el impacto ambiental en toneladas de CO₂ del proceso de secado de café para la evaluación de la fuente energética menos contaminante.
3. Realizar un estudio técnico de las alternativas planteadas para la determinación del alcance que cada una requiere y la estimación de la implementación.
4. Generar un estudio económico para la determinación de la opción que genere mayor rentabilidad en un lapso de 10 cosechas posteriores.

10 Alcance

Identificar el indicador de consumo energético de las calderas actuales, para tener un valor de comparación y presentar un análisis donde se determine cuál es la opción de combustible que cumple con las condiciones necesarias para satisfacer la problemática actual, considerando variables (impacto ambiental, costos por cambio, tiempo de implementación, ...) que relacionan el proceso y las necesidades de la empresa.

Según lo anterior, el fin del proyecto se basa en realizar una comparación de diferentes alternativas de combustibles, de manera que pueda seleccionarse la opción que reúna las condiciones esperadas para el proceso que se requiere. Como entregables se plantea el siguiente listado:

1. Comparación de alternativas de combustible para la generación de vapor (indicadores de consumo, poder calórico, precio, entre otras variables).
2. Relacionar consumos de combustibles con base en los históricos de procesamiento de café.
3. Estimar el impacto ambiental en toneladas de CO₂ para las alternativas no biomásicas estudiadas.
4. Identificar variantes en el sistema, que requieran la aplicación de las diferentes alternativas de combustible en estudio.
5. Generar un estudio económico para cada uno de los combustibles considerados.
6. Justificar la selección de la opción óptima de acuerdo con las variables de selección planteadas.

11 Marco Teórico Referencial

11.1 Proceso de secado de café

El proceso de secado de café consiste en remover humedad del grano que normalmente contiene un 55%, y el restante es el peso del grano que se aprovecha para ser procesado. Los niveles a los que se debe llegar con la extracción de humedad se encuentran entre el 11% y 12%. Además, con este proceso se le da apariencia y garantía para el almacenamiento y la calidad del producto (Ministerio de Agricultura y Ganadería [MAG], 2010, pp. 13-14).

Esta es la composición de un grano de café, para poder identificar las partes involucradas en el secado:

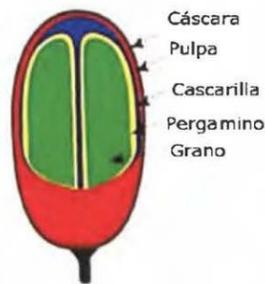


Ilustración 2. Partes principales del fruto de café

Fuente: Benavides (2014, p. 8)

Al continuar con el proceso, este se divide en tres etapas: oreado, presecado y secado. El oreado se encarga de retirar la humedad superficial, llegando a un aproximado del 48%; luego sigue el presecado, en el cual se retiran las partes del contenido de agua que se encuentran entre el pergamino y el grano; para estos dos procesos se espera llegar a un contenido de humedad entre el 30-35%. Para finalizar con el secado, este se realiza lentamente y la temperatura no debe superar los 60 °C, debe ser uniforme para llegar a la totalidad del grano, y la importancia de que se realice de buena manera es mantener con vida el embrión del café y no dañarlo; este debe llegar al rango del 11-12% mencionados anteriormente (MAG, 2010, pp. 13-14).

11.2 Sistemas de secado

Existen dos tipos de sistemas utilizados para secar el café, estos son el mecánico (artificial) y el natural. El sistema mecánico consiste en hacer pasar una corriente de aire caliente a través del grano en el rango de 60-65 °C, mientras que en el sistema natural se deja el café alrededor de seis a siete días al sol, el cual se encarga de remover la humedad del grano y hace de este el mejor proceso para obtener la mayor calidad del producto. Sin embargo, por lo lento que es el proceso, da problemas para manipular grandes cantidades de café, y esta es la razón por la que se utilizan medios artificiales para el secado (MAG, 2010, pp. 15-17).

Estos sistemas se pueden apreciar en la siguiente figura, y en esta se pueden identificar las posibles combinaciones que se pueden dar; un secado puede darse combinando ambos sistemas:

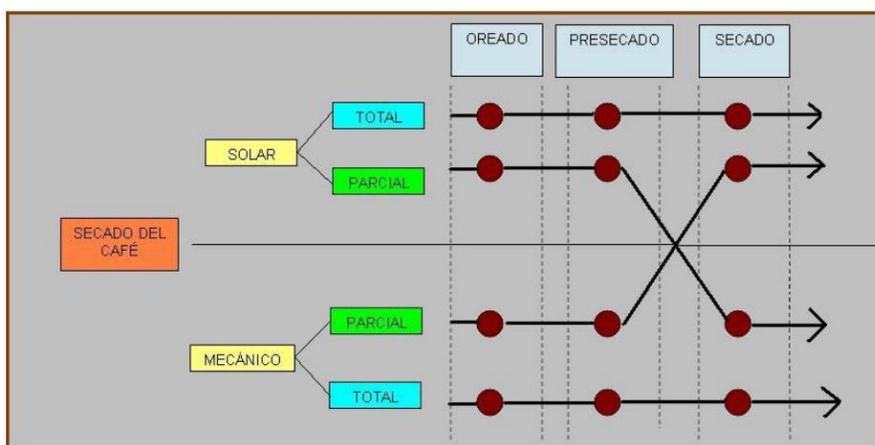


Ilustración 3. Posibilidades para el secado de café

Fuente: MAG (2010, p. 15)

Para este estudio, el sistema de secado de interés es el sistema mecánico total, debido a que tanto el oreado, el presecado como el secado se realizan de manera mecánica. En este se involucran sistemas de presecado en una máquina de aire vertical y el secado en secadoras tipo guardiola, a las cuales se ingresa el aire mediante ventilación y se aumenta la temperatura de este por medio de intercambiadores de calor.

11.3 Equipos necesarios para el proceso de secado de café

Dentro de los equipos que se relacionan directamente con el secado de café, se tienen componentes para cada una de las etapas del proceso. Cada una cumple una función y se relaciona siempre con la extracción de humedad del grano. La siguiente imagen muestra algunos componentes principales, El autor del presente trabajo investigativo se enfocará en el sistema de secado completo:

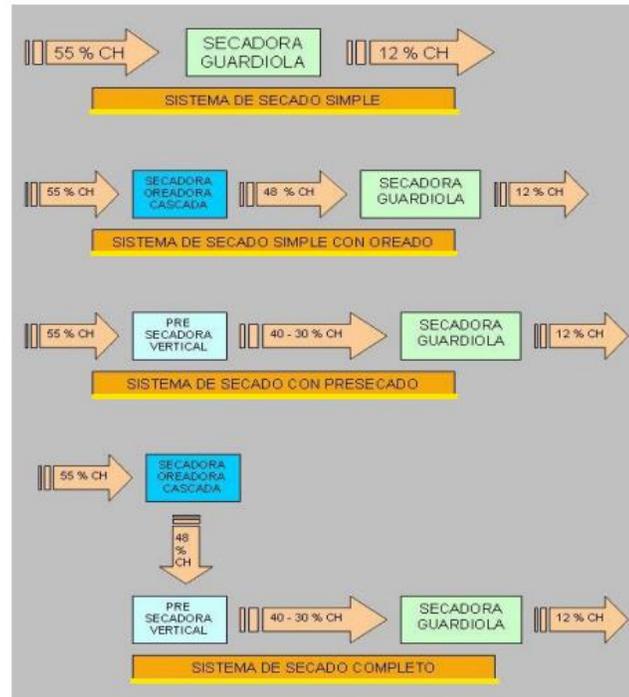


Ilustración 4. Ilustración tipos procesos de secado

Fuente: MAG (2010, p. 15)

Estos son parte de los componentes necesarios para procesar el café después del ser despulpado, lavado y escurrido, para continuar con el proceso de secado previo al almacenamiento (Pineda Mejía et al., 2017, pp. 14-15):

- Secadora oreadora cascada:

Es una máquina donde se deposita el café y tiene un avance de flujo continuo en sentido contrario al del aire caliente; en este proceso se elimina el agua superficial y se llega a niveles de humedad en el rango de 45-55%.

- Presecadora vertical:

Este tipo de secadora posee cavidades por medio de las cuales se transporta el café; dentro de ella fluyen corrientes de aire caliente que se encarga de extraer humedad parcialmente del grano. Este proceso es homogéneo y debe llevarse a cabo a una temperatura de 60 a 70 °C como máximo; no se debe relacionar directamente un secado rápido con el aumento de temperatura.

Este tipo de equipos son utilizados en el proceso previo al secado final, llegando hasta un 20% de humedad, el cual puede darse en secadoras rotativas tipo guardiola.

- Secadora tipo guardiola:

Es un tipo de secadora rotativa que contiene tubos perforados en la parte interna por donde viaja el aire caliente (temperaturas 60-70 °C); este aire se dirige hacia la masa de café que se introduce en la guardiola. El mecanismo debe llenarse a un 80% de su capacidad, para que el secado pueda ser parejo y dé la coloración del grano tipo verde azulado uniforme. De acuerdo con el MAG (2010, p. 19), el termómetro que regula la temperatura del aire debe ser colocado en el ducto que lleva el aire directo a la secadora.

Para calentar el aire que ingresa en los equipos mencionados anteriormente, se utilizan principalmente los siguientes componentes:

- Ventiladores (Gutiérrez Flores et al., 2012, pp. 16-17):

Este es el dispositivo que se encarga de hacer llegar el aire a cada uno de los procesos de extracción de humedad en el grano. Para seleccionar un ventilador debe considerarse el caudal de aire y la presión de operación, teniendo en cuenta las pérdidas del sistema y la capa de café que debe tratar; una buena ventilación garantiza un secado homogéneo en el grano.

Los ventiladores utilizados son del tipo centrífugo, ya que permiten un ingreso paralelo al eje del rotor, y es por esta razón que se colocan de manera que puedan incorporar el aire pasándolo por intercambiador de calor. Al comenzar a girar generan una presión negativa en el ingreso, y es por lo que se da el flujo de aire hacia el interior de los conductos de la secadora, para entrar en contacto con el grano. Se clasifican en tres tipos: álabes inclinados hacia adelante, álabes radiales y álabes inclinados hacia atrás (son estos los más recomendados en el proceso de secado de café).

– Intercambiadores de calor:

Se encargan de calentar el aire que ingresará en la secadora tipo guardiola; pasan de la temperatura ambiente a las condiciones necesarias para el proceso de secado. El calentamiento por medio de convección se da:

(...) cuando un fluido caliente se mueve en contacto con una superficie fría, el calor se transfiere hacia la pared a una velocidad que depende de las propiedades del fluido y de si se mueve por convección natural, por flujo laminar, o por flujo turbulento. (Levenspiel, 2018, p. 183)

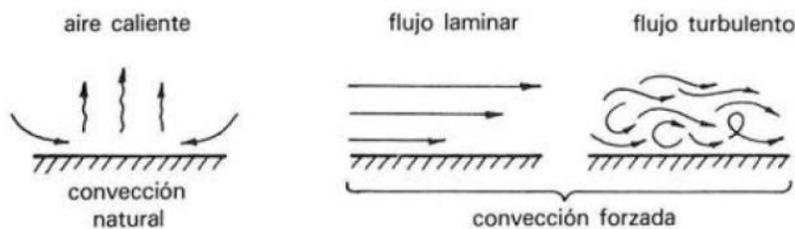


Ilustración 5. Calentamiento por convección

Fuente: Levenspiel (2018)

De acuerdo con la imagen anterior, lo importante para el ingreso del aire en la secadora tipo guardiola es mantener un flujo laminar y, mediante la convección forzada, realizar el calentamiento de aire en el intercambiador de calor. Este calentamiento puede ajustarse con base en la cantidad de energía térmica, que permite el control en el intercambiador de calor, en comparación con el ingreso de aire en la secadora.

Según Jaramillo (2007), menciona que los intercambiadores se clasifican en tres categorías según el sentido de flujo de aire, en comparación con el sentido del fluido en la tubería, son los siguientes: flujo paralelo, contraflujo y flujo cruzado (Jaramillo, 2007, p. 6). Para el caso en estudio interesa el tipo de intercambiadores de flujo cruzado, donde el aire aspirado por el ventilador centrífugo entra perpendicularmente al intercambiador, igual o cercano a un ángulo de 90°.

- Medidor de temperatura:

Según el diccionario de la RAE, el “termómetro es un instrumento que sirve para medir la temperatura” (Real Academia Española, 2021, párr. 1). En el sistema de secado de café su uso es de gran importancia, porque mide la temperatura del aire que ingresa en la secadora. Si la temperatura es muy alta puede causar daños en el grano, si es baja el proceso puede tardar más de lo esperado; es por esta razón que estos dispositivos deben estar en una correcta posición y ser confiables, para contar con la información de su lectura.

- Caldera:

Según se define en el libro llamado “Descripción de calderas y generadores de vapor”, de Abarca Bahamondes, define la caldera como “un recipiente metálico, cerrado, destinado a producir vapor o calentar agua, mediante la acción del calor a una temperatura superior a la del ambiente y presión mayor” (Bahamondes, s.f., p. 3). La caldera es el componente principal en el sistema, debe generar el vapor necesario para transportar el calor brindado por el combustible hasta los intercambiadores de calor, que es por donde se da el flujo de aire para dar el intercambio de energía.

11.4 Conceptos termodinámicos involucrados

11.4.1 Energía

La energía puede ser interpretada “como la capacidad para causar cambios”, según lo mencionan Cengel y Boles en su libro de “Termodinámica” (2009, p. 3). Estos cambios pueden manifestarse por medio de diferentes tipos, como lo son la cinética y la térmica, por ejemplo.

Los cuerpos poseen su propia energía, la cual se define como energía interna. El fabricante Cleaver Brooks lo define en el “Manual de calderas SELMEC” como la unión de la energía cinética interna total y la energía cinética interna potencial, que es “la energía almacenada en un cuerpo en virtud de la actividad y configuración de sus moléculas y de las vibraciones dentro de ellas ... energía molecular o térmica” (Cleaver Brooks, 1976, p. 67).

11.4.2 Calor específico

Se define el calor específico como “la energía requerida para elevar en un grado la temperatura de una unidad de masa de una sustancia” (Cengel y Ghajar, 2011, p. 7). Este concepto se llega a relacionar con la cantidad de kilogramos que deben ser procesados por hora; cada material cuenta con un valor en especial, para el agua es de **4.184 kJ/kg*°C** (Theodore et al., 2009, p. 181).

11.4.3 Calor

Como mencionan Alomá y Malaver (2007), según el análisis de los conceptos de termodinámicos, describen el calor como “una transferencia de energía entre dos sistemas; el calentamiento se presenta cuando hay adición de energía y el enfriamiento cuando existe una disminución de energía” (Alomá y Malaver, 2007, p. 7). Para que se dé esta transferencia debe existir un diferencial de temperatura entre ambos cuerpos, lo que propicie el flujo de calor, tal y como se describe en el concepto anterior.

11.4.4 Calor sensible, calor latente, calor total

Para comprender estos conceptos resulta útil el siguiente gráfico, donde se muestra lo que sucede para el calentamiento de un kilogramo de agua; además, es posible comparar las condiciones de calor sensible y calor latente en relación con el proceso de evaporización:

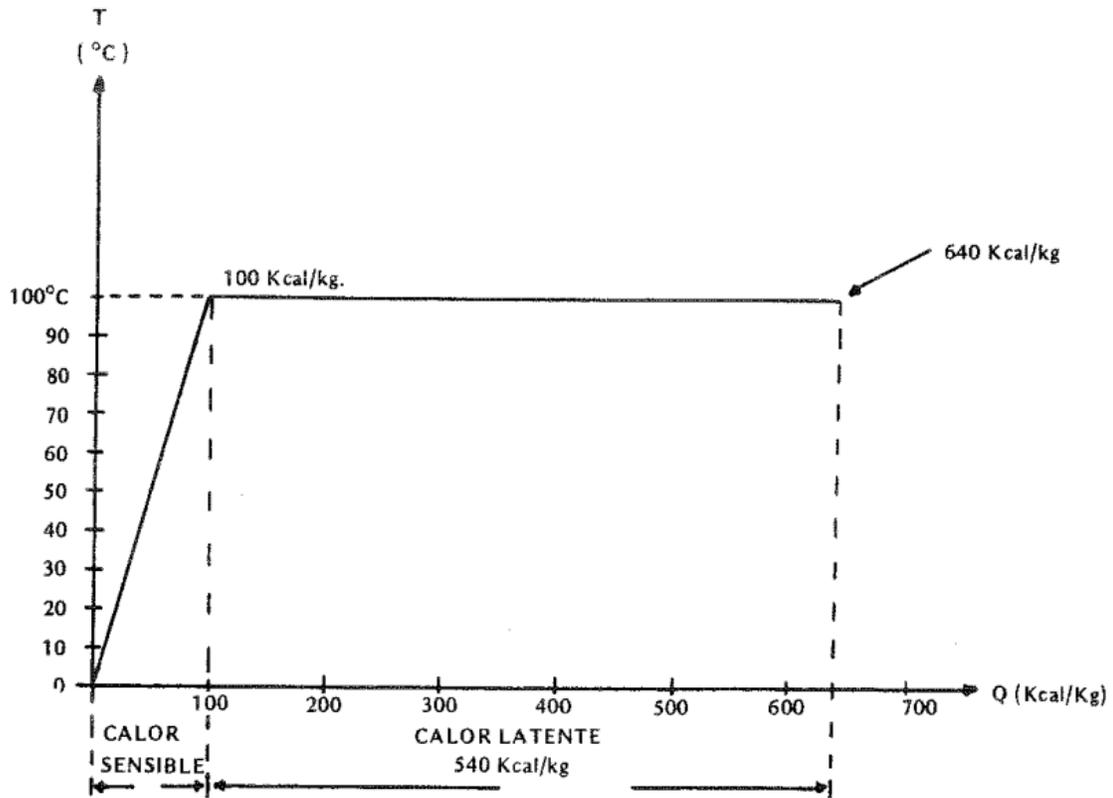


FIG. 1 PT

Ilustración 6. Gráfico comportamiento energía para evaporar un kilogramo de agua a 1 atm

Fuente: Cleaver Brooks (1976, p. 80)

El **calor sensible**, según Cengel y Ghajar, está relacionado con “la energía cinética de las moléculas...la velocidad promedio y el grado de actividad de las moléculas son proporcionales a la temperatura” (Cengel y Ghajar, 2011, p. 6). Además, definen el calor latente como un “proceso de cambio de fase y, debido a esta energía agregada, un sistema en fase gaseosa se encuentra en un nivel más alto de energía interna que si estuviera en fase sólida o líquida” (Cengel y Ghajar, 2011, p. 7). Se puede calcular por medio de la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_{sensible} = \dot{m} \times c_p \times \Delta T \text{ (Cleaver Brooks, 1976, p. 95)}$$

Donde:

$$\dot{Q}_{sensible} = \text{Calor sensible}$$

$$\dot{m} = \text{Peso por hora de la masa a calentar}$$

$$c_p = \text{Calor específico de la masa}$$

$$\Delta T = \text{Incremento de temperatura}$$

Otra forma de determinar el calor sensible es como se describe en la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_{sensible} = \left(\frac{kg}{hora} \text{ de vapor} \right) \times H_{fg} \text{ (Cleaver Brooks, 1976, p. 95)}$$

Donde:

$$\dot{Q}_{sensible} = \text{Calor sensible}$$

$$\frac{kg}{hora} \text{ de vapor} = \text{Cantidad de vapor requerido}$$

$$H_{fg} = \text{Entalpía de evaporización}$$

El **calor latente**, se entiende como la cantidad de energía “absorbida o liberada durante el proceso de cambio de fase” (Cengel y Boles, 2009, p. 116). Esta es parte de la energía total que debe producirse para poder extraer humedad del producto, y es posible estimarlo mediante la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_{latente} = \dot{m} \times H_g \text{ (Cleaver Brooks, 1976, p. 95)}$$

Donde:

$$\dot{Q}_{latente} = \text{Calor latente}$$

$$\dot{m} = \text{Peso por hora de la masa a calentar}$$

$$H_g = \text{Entalpía de vaporización}$$

Ambas definiciones de calor se requieren para pasar la masa de un estado a otro, donde el calor sensible es el requerido para realizar el cambio de temperatura y el calor latente es el encargado de generar el cambio de fase. Ambos se unen para calcular el **calor total** que se requiere en el proceso, y para esto se utiliza la siguiente expresión:

$$\dot{Q}_{Total} = \dot{Q}_{sensible} + \dot{Q}_{latente} \text{ (Cleaver Brooks, 1976, p. 95)}$$

Donde:

$$\dot{Q}_{Total} = \text{Sumatoria del calor sensible y el calor latente}$$

$$\dot{Q}_{sensible} = \text{Calor sensible}$$

$$\dot{Q}_{latente} = \text{Calor latente}$$

11.4.5 Entalpía

La entalpía es un concepto de la termodinámica, el cual se define de la siguiente manera: “Una función termodinámica llamada entalpía (de la palabra griega enthalpein, que significa ‘calentar’) explica el flujo de calor en los procesos que ocurren a presión constante, cuando no se realiza otro tipo de trabajo más que el P-V” (Theodore et al., 2009, p. 176). Los cambios de entalpía se relacionan directamente con el calor que se gana o se pierde en un proceso, este sucede en el sistema y se relaciona con el entorno; estos mismos se pueden identificar como procesos endotérmicos y exotérmicos.

Es importante considerar que para cada cambio de fase se agrega o se sustrae calor de este, por lo que también se relaciona cada cambio directamente con la entalpía, y en cada proceso se puede identificar lo que sucede. En la siguiente ilustración se puede comprender el proceso por el cual pasa el agua en los diferentes cambios de fase:

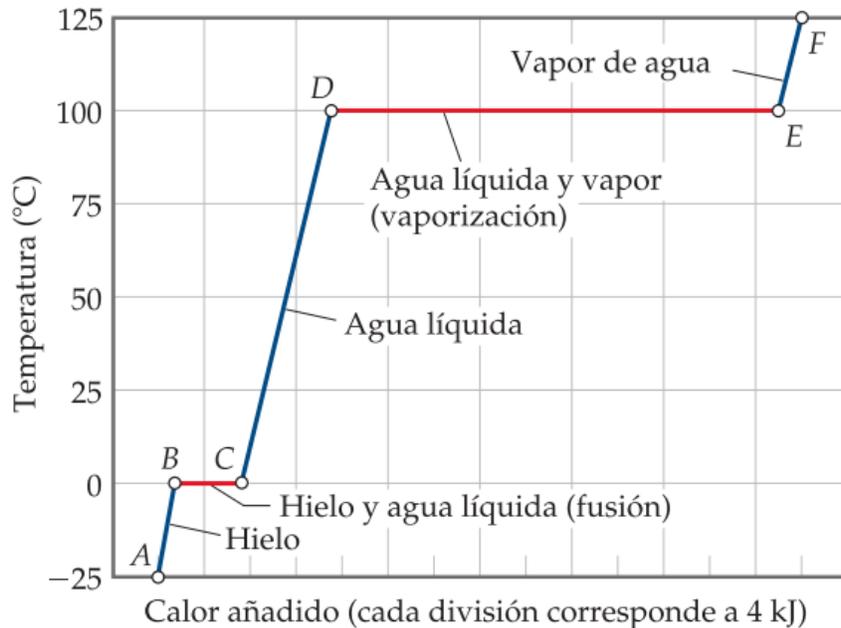


Ilustración 7. Curva de calentamiento del agua

Fuente: Theodore et al. (2009, p. 450)

Como se mencionó anteriormente, cada cambio de fase viene relacionado directamente con la energía y el nombre de entalpía asociado; para el proceso de sólido a líquido se tiene la entalpía de fusión, para el proceso de líquido a gas está la entalpía de vaporización (Theodore et al., 2009, p. 449). Con ellas es posible determinar cuánto calor se requiere. considerando el cambio de temperatura como calor sensible y el cambio de fase como calor latente.

11.4.6 Presión

La presión puede definirse de la siguiente manera: “transmite la idea de una fuerza, un empuje que tiende a mover algo en cierta dirección. La presión, P, es, de hecho, la fuerza, F, que actúa sobre un área dada, A” (Theodore et al., 2009, p. 396). Puede calcularse mediante la siguiente expresión:

$$P = \frac{F}{A} \text{ (Theodore et al., 2009, p. 396)}$$

Donde:

$P = \text{Presión}$

$F = \text{Fuerza}$

$A = \text{Área}$

El vapor, al ser un gas, genera una fuerza de empuje contra el área de la caldera y la tubería por la cual circula. Por medio del trayecto que recorre, se generan caídas de presión por fricción con la tubería y condensación; es la diferencia entre el punto de salida del vapor y el punto donde se quiera tomar la medida después de un trayecto de tubería y accesorios (Cleaver Brooks, 1976, p. 70).

11.4.7 Temperatura

El control de la temperatura en los procesos de secado se relaciona directamente con la calidad del grano y una adecuada extracción de la humedad, para poder ser almacenado sin problemas. Según se menciona en el libro de “Química, la ciencia central”, en su décima edición, la “temperatura es una medida de calor o frío en un objeto ... es una propiedad física que determina la dirección del flujo de calor” (Theodore et al., 2009, p. 16).

Para poder medir la temperatura se utilizan las siguientes escalas, y la imagen ayuda a relacionarla con el comportamiento del agua en cada una de ellas:

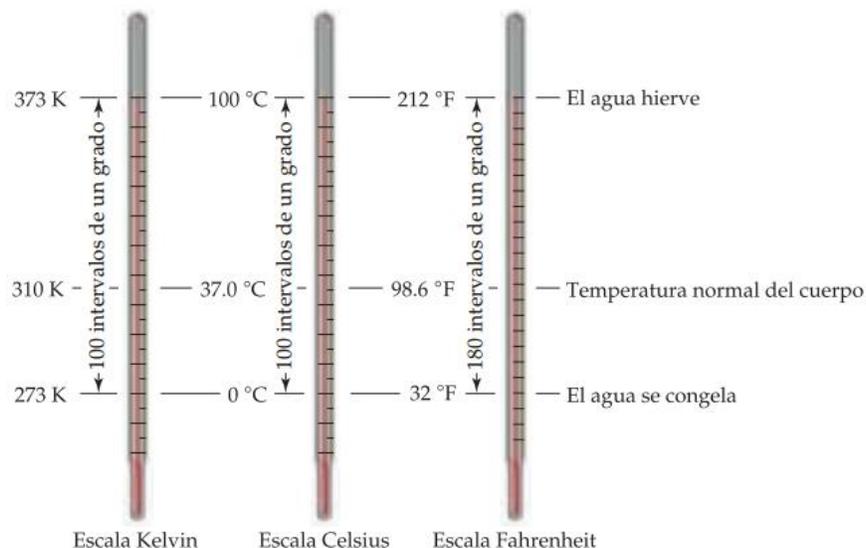


Ilustración 8. Comparación de escalas de temperatura

Fuente: Theodore et al. (2009, p. 16)

11.4.8 Temperatura gases de combustión

Como se menciona en el “Manual de calderas SELMEC”, la temperatura de los gases de combustión hace referencia a los gases generados en el proceso donde se quema el combustible, para trasladar esa energía al agua que contiene la caldera. Una elevada temperatura en la salida para los gases de combustión se relaciona con el desperdicio de calor, ya que no se aprovecha él en la parte interna de la caldera y se está dejando salir por la chimenea (Cleaver Brooks, 1976, p. 74).

11.5 Tipos de eficiencia: eficiencia de combustión, eficiencia térmica y total de la caldera

- Eficiencia de combustión y térmica: la eficiencia de combustión relaciona la transformación de energía del combustible en calor, toma en cuenta la manera en la cual se quema el combustible y los componentes que están involucrados (Cleaver Brooks, 1976, p. 85). La eficiencia térmica comprende el traslado de este a la carga; en medio de esta transferencia se dan las pérdidas de calor latente y sensible en los humos de combustión y son los que afectan este proceso (“Manual de calderas industriales”, s.f., p. 38).
- Eficiencia total: esta eficiencia se define en el “Manual de Calderas SELMEC” como la relación entre el calor aprovechado por el fluido y el calor suministrado por el combustible; se relaciona mediante la siguiente expresión:

$$\eta = \frac{\text{Calor aprovechado}}{\text{Calor suministrado}} = \frac{W(H_{Vapor} - H_{Agua})}{P_c \times C_{Comb}} \quad (\text{Cleaver Brooks, 1976, p. 85})$$

Donde:

η = Eficiencia del generador de vapor

W = Peso del vapor producido por hora

H_{Vapor} = Entalpía del vapor a la salida

H_{Agua} = Entalpía del agua a la entrada

P_c = Poder calórico del combustible

C_c = Cantidad de combustible, quemado por hora, en peso

También puede ser utilizada la siguiente expresión:

$$\eta = \frac{Q_S - Q_P}{Q_S} \text{ (Cleaver Brooks, 1976, p. 85)}$$

Donde:

$$Q_S = \text{Calor suministrado}$$

$$Q_P = \text{Calor perdido}$$

11.6 Poder calorífico inferior y superior

Como se menciona en la guía “Calderas industriales eficientes”, el poder calorífico es la cantidad de calor por unidades de combustible que puede generar el material en combustión completa a una presión y temperatura determinadas (Domínguez et al., 2012, pp. 30-31). También se tienen dos tipos de poder calorífico; estos, según la temperatura final de los gases, son los siguientes:

- Poder calorífico superior: es la cantidad de energía que desprende la unidad de combustible, enfriando los gases de combustión a una temperatura de 0 °C a presión atmosférica. Con esto se condensa el vapor de agua del combustible, lo que quiere decir que ha cedido en su totalidad el calor latente de vaporización.
- Poder calorífico inferior: al igual que el poder calorífico superior, se enfrían los gases hasta llegar a 0 °C a presión atmosférica, pero no considerando el calor latente de condensación del vapor de agua.

11.7 Afectaciones eficiencia energética en calderas de biomasa

Una afectación en algunos de los componentes de la caldera puede generar pérdidas de energía que afectan directamente la eficiencia del equipo. También, los parámetros para un adecuado funcionamiento en el sistema y el control de cada uno de ellos generan afectaciones en la eficiencia; cada punto deficiente genera mayores consumos de combustible y, por lo tanto, un mayor costo para la generación de vapor.

A continuación, se describen diferentes pérdidas de eficiencia en una caldera, según Loaiza Pereira (2020):

1. El calor arrastrado en la chimenea por los gases calientes, sin considerar la humedad, también conocido como gases secos de chimenea.
2. El calor latente del vapor de agua (humedad) presente en los gases calientes de chimenea, el cual resulta de la combustión del hidrógeno que contiene el combustible y de la humedad presente en el combustible y el aire alimentados.
3. Combustible no quemado, producto de combustión incompleta. Figuran los combustibles sólidos en los desechos, y todos los materiales combustibles, sólidos y gaseosos, que son arrastrados por los gases de la chimenea. Esta pérdida se conoce como 'la pérdida de combustible' o 'la pérdida de combustible no quemado'.
4. El calor perdido por la caldera a través de su aislamiento. Esta pérdida se denomina generalmente 'pérdida por radiación', pero comprende no solamente el calor irradiado a la sala de calderas, sino también el calor perdido por convección hacia el aire ambiente que está en contacto con la superficie de la caldera.
5. El calor que transporta la purga de la caldera. (Loaiza Pereira, 2020, p. 42)

Entre los componentes y parámetros que se pueden analizar se describen los siguientes:

- Trampas de vapor con mal funcionamiento: según lo mencionado por Loaiza Pereira (2020), describe que las trampas de vapor es un componente que puede generar enormes pérdidas económicas, esto porque se pierde el vapor al cual se le invierten el costo del combustible y la capacidad calorífica que se necesita en los consumibles. Se detecta cuando el sistema mecánico falla, la trampa queda abierta y, por esta razón, se da salida directa del vapor junto con el líquido condensado en la tubería (Loaiza Pereira, 2020, p. 38).

Métodos de inspección para trampas de vapor:

1. Método visual: observar en la descarga de las trampas si el vapor generado es vapor flash o vapor vivo, el vapor flash se genera cuando el condensado caliente o agua hirviendo a presión se libera a una presión menor y parte de los líquidos se vuelven a evaporar (Armstrong, 1998, p. 5).
2. Método de análisis termográfico: también, en el estudio realizado por Loaiza Pereira, en el 2020, se describe el análisis termográfico para analizar el estado de las trampas de vapor, ya sea que se encuentren abiertas o cerradas, y también haya alguna anomalía. Debe existir una diferencia de temperatura entre la entrada y la salida de la trampa; sin embargo, es posible contar con vapor saturado y condensado a una misma temperatura, y esto generaría inconvenientes para detectar la falla (Loaiza Pereira, 2020, p. 41).

Parámetros para considerar e influyen en la eficiencia de la caldera:

1. Niveles de aire: los niveles de aire afectan directamente el proceso de combustión; un exceso de aire genera ineficiencia, ya que parte del calor de combustión se dirige al calentamiento del aire en exceso.
2. Régimen de fuego: mantener la carga de la caldera dentro del 50% y el 80% de su capacidad, con el fin de hacer un uso eficiente del combustible.
3. Temperatura de los gases de chimenea: el exceso de aire y la temperatura de los gases en la chimenea se relacionan directamente disminuyendo la eficiencia en la caldera. Una elevada temperatura, en la salida de la chimenea, también puede generarse por una superficie insuficiente para la transmisión del calor de los gases de combustión o suciedad en las superficies, que no permiten una adecuada transmisión de calor.
4. Temperatura del agua de alimentación: el aumento de la temperatura del agua de alimentación mejora la eficiencia de la caldera; se requiere de un menor calor de combustión para llegar a la temperatura de evaporación. El aumento de la temperatura del agua en 6 °C se puede relacionar con la mejora del 1% del rendimiento de la caldera.
5. Temperatura del aire de combustión: este parámetro es directamente proporcional con la eficiencia de la caldera.

6. Suciedad en superficies de transmisión de calor: la suciedad en la tubería hace que la transmisión de calor se vea afectada hacia el agua de la caldera. También se dan elevaciones en la temperatura de salida de los gases de combustión, y ambos generan disminución en la eficiencia de la caldera.
7. Purga: las purgas generan afectaciones en la calidad del vapor, producen pérdidas de agua caliente, y la generación de vapor también se ve afectada. A pesar de ser un proceso necesario, este debe ser controlado, ya que afecta directamente la eficiencia de la caldera.
8. Presión de vapor: reducir la presión de operación de la caldera no genera aumentos en la eficiencia, pero sí un ahorro en el consumo de combustible.
9. Pérdidas de calor en el exterior de la caldera: son principalmente generadas por la transmisión de calor del cuerpo de la caldera hacia el exterior (por radiación y convección). Existen métodos para disminuirlo, pero dependen del diseño del equipo y debe analizarse, a detalle, el beneficio económico que podría generar.
10. Combustible: el tipo de combustible puede generar disminuciones en el costo de generación de vapor y una mejor eficiencia, de acuerdo con las condiciones de la caldera.

11.8 Biomasa como combustible

Romero Arias (2018) describe la biomasa como todo tipo de materia orgánica que puede ser convertida en energía. Es de gran importancia para dejar de lado o disminuir el uso de los productos derivados del petróleo, como fuentes energéticas, que aportan en la disminución de los gases de efecto invernadero, y es una opción viable para utilizar los residuos generados según las actividades que se realicen en la zona, principalmente de los derivados de la producción agrícola (p. 36).

Existen dos tipos de biomasa: la biomasa seca, que proviene de las actividades generadas en campos agrícolas y forestales; y la biomasa húmeda, que es obtenida de flujos residuales de origen orgánico.

Al utilizar la biomasa como fuente energética, se hace referencia al ciclo cerrado del carbono, esto debido a que se considera que la biomasa como tal ha absorbido la cantidad de CO₂ que genera en la combustión cuando se utiliza como fuente de energía. En la siguiente imagen se puede apreciar el ciclo del carbono y el por qué la biomasa puede considerarse un combustible amigable con el ambiente:

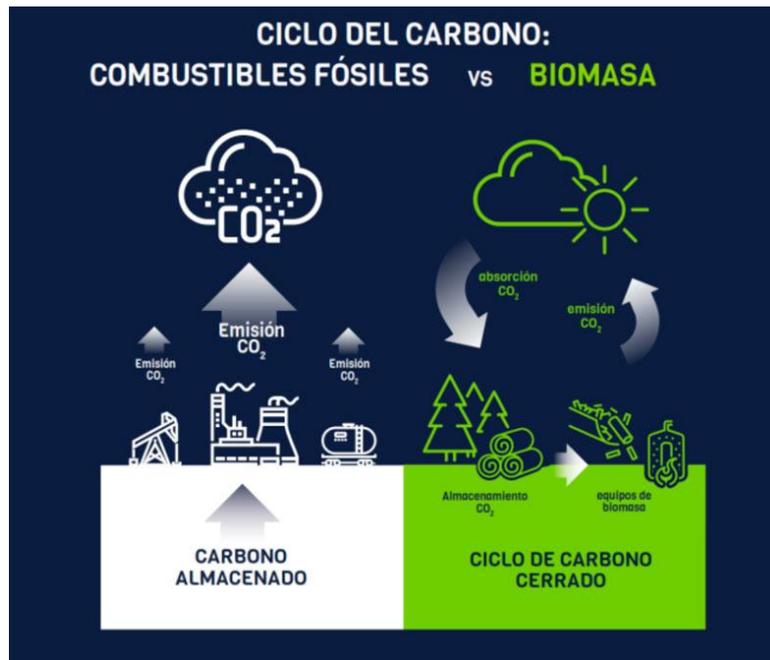


Ilustración 9. Comparación de ciclo carbono en combustibles fósiles vs. biomasa

Fuente: ErbiaEnergy (s.f.)

El poder calórico de la biomasa se relaciona directamente con el porcentaje de humedad que contenga, ya que esta humedad debe ser retirada en su totalidad para poder ser quemada. La extracción de humedad, previa al uso como combustible, es poco recomendada, porque es invertir dinero antes de ser utilizado, o bien, utilizar un mecanismo para el aprovechamiento de energía residual en el secado.

A nivel nacional, el uso de la biomasa como combustible ha ido en aumento, los residuos agroindustriales que pueden ser procesados han crecido y el consumo de madera tiende a disminuir, según información del Ministerio de Ambiente y Energía y de la Dirección Sectorial de Energía (MINAE y DSE, 2017, p. 9). En la siguiente imagen se puede comparar el uso de diversos combustibles en el sector industrial, donde es posible observar que el tipo de desechos utilizados provienen del sector agroindustrial y, en su mayoría, satisfacen sus mismas necesidades en cuanto a combustible:

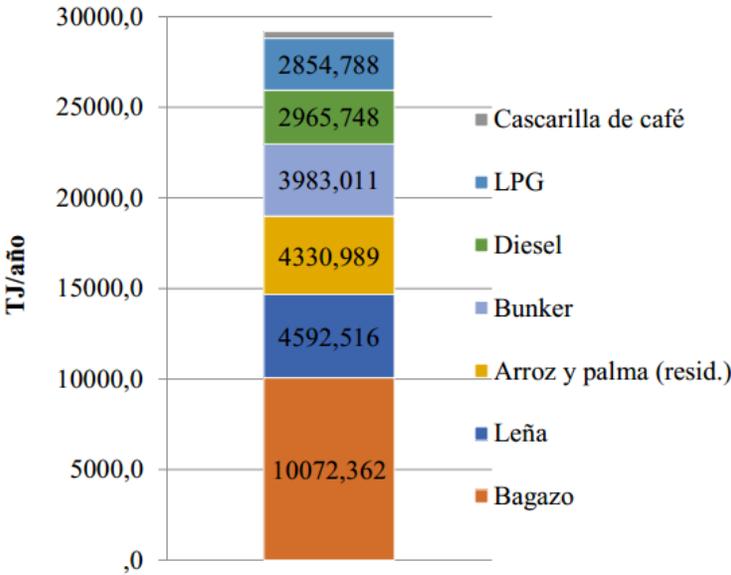


Ilustración 10. Energía utilizada por combustible en el sector industrial a nivel nacional

Fuente: MINAE y DSE (2017, p. 9)

11.9 Alternativas de residuos agrícolas orgánicos en Costa Rica

En Costa Rica, la biomasa cuenta con un porcentaje de participación importante en la producción energética, para el estudio hecho por el MINAE y la DSE, en el año 2017, corresponde “al 16,4% en el Balance Energético de Costa Rica del 2015, con una contribución de la leña del orden del 6,5% y los residuos de la biomasa y los biodigestores del orden de 9,9%” (MINAE y DSE, 2017, p. vii), siendo la mayor parte de este combustible utilizada en la generación de calor, consumido por calderas ubicadas en zonas agroindustriales, que en algunos casos estos mismos residuos orgánicos son producidos derivados de su misma actividad.

Según el estudio realizado por Coto Chinchilla (2013), describe los sectores del país que producen biomasa y son: agrícola, forestal y pecuario. Para el sector agrícola y forestal se puede dividir en los siguientes productos (son los generadores del desecho orgánico): caña, piña, palma, aserraderos, café, banano, arroz y naranja; en el sector pecuario: los residuos orgánicos del ganado lechero y de carne, avícola y el grupo porcino (Coto Chinchilla, 2013).

Cada uno de los residuos mencionados anteriormente cuentan con su respectivo potencial energético, considerando la cantidad que se puede generar y el poder calorífico que puede brindar el residuo. Costa Rica cuenta con diversidad de climas y, por lo tanto, hay diferentes actividades especializadas por zonas, por lo que es posible contar con residuos agrícolas orgánicos según las actividades principales en el lugar.

Esta es la distribución de la oferta de biomasa por región a nivel nacional al año 2017:

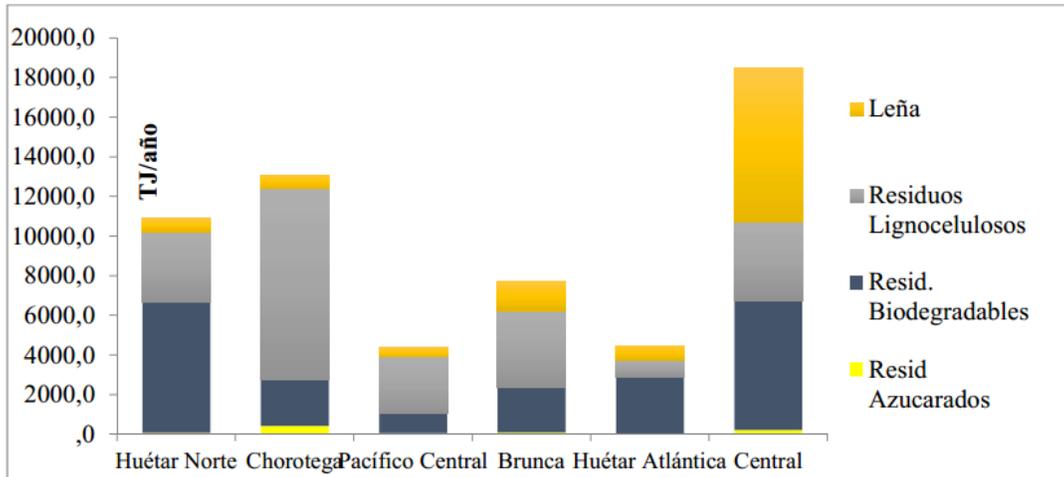


Ilustración 11. Oferta potencial energética de biomasa en Costa Rica
Fuente: MINAE y DSE (2017, p. 27)

Según la ilustración anterior, es posible observar que la Región Central es la que cuenta con mayor capacidad de producción de energía a partir de biomasa; algunas regiones socioeconómicas cuentan con la característica especial de ser desechos derivados de productos estacionales. Esta región comprende cantones de las provincias de San José, Alajuela, Cartago y Heredia; principalmente para este estudio el cantón de Tarrazú y Dota (MAG, p. 1).

Entre los principales desechos para consumo se van a tener en cuenta los denotados en el estudio realizado por Energía, Medio Ambiente y Desarrollo [EMA], en el año 2018, de donde se extrae la siguiente tabla:

Tabla 5. Agrupamiento de las biomásas principales para presentación de la demanda por residuos.

	Actividad/biomasa	Clasificación de la biomasa
Agrícolas y agroindustria		
1	Pulpa de café	Lignoceluloso muy húmedo
2	Cascarilla de café	Lignoceluloso
3	Mucílago de café (miel)	Digestable
4	Granza de arroz	Lignoceluloso
5	Rastrojo de arroz	Lignoceluloso
6	Bagazo de caña	Lignoceluloso
7	Cachaza	Digestable
8	Melaza	Digestable
9	R. campo de caña, rastrojo caña	Lignoceluloso
10	Fibra de mesocarpio de fruta de palma	Lignoceluloso y aceitoso
11	Cascarilla de coquito de fruta de palma	Lignoceluloso
12	Fibra de pinzote de palma	Lignoceluloso y aceitoso
13	Rastrojo de piña	Lignoceluloso muy húmedo
14	Corona de piña	Lignoceluloso
15	Pinzote de banano	Lignoceluloso muy húmedo
16	Vástago de banano	Lignoceluloso muy húmedo
17	Semillas, cascaras y pulpas de naranja y otras frutas	Lignoceluloso
18	Aguas de la agroindustria	Digestable
19	Cenizas de agroindustria	Lignoceluloso
Forestal		
20	Leña (consumo)	Lignoceluloso
21	Aserrín	Lignoceluloso
22	Leña de aserradero	Lignoceluloso
23	Otros residuos de aserradero	Lignoceluloso
24	Burucha	Lignoceluloso
25	Leña de café	Lignoceluloso
Pecuario		
26	Excreta porcina	Digestable
27	Gallinaza y pollinaza	Lignoceluloso y Digestable
28	Excreta bovina lechera	Digestable
29	Excreta bovina ganadera carne	Digestable
Urbano		
30	Residuos domésticos fracción orgánica (residuos de alimento)	Digestable
31	Basura (madera y jardín)	Digestable
32	Aguas negras residuales/urbanas	Digestable

Ilustración 12. Principales fuentes de biomasa y clasificación

Fuente: Energía, Medio Ambiente y Desarrollo (EMA) (2018, p. 24)

La clasificación del tipo lignocelulósica hace referencia a la materia seca del tipo vegetal, y la digestible, para el estudio tomado en cuenta, hace referencia sobre la biomasa biodegradable que se trata por medio de descomposición, para poder ser utilizada como combustible. A partir de esta investigación, para cada región se pueden considerar los principales productos que generan biomasa y ubicarlos por la zona y la manera de extraerlos, y para esto se tiene como referencia el mapa de divisiones regionales, enfocando la ubicación del cantón 105, que es Tarrazú:

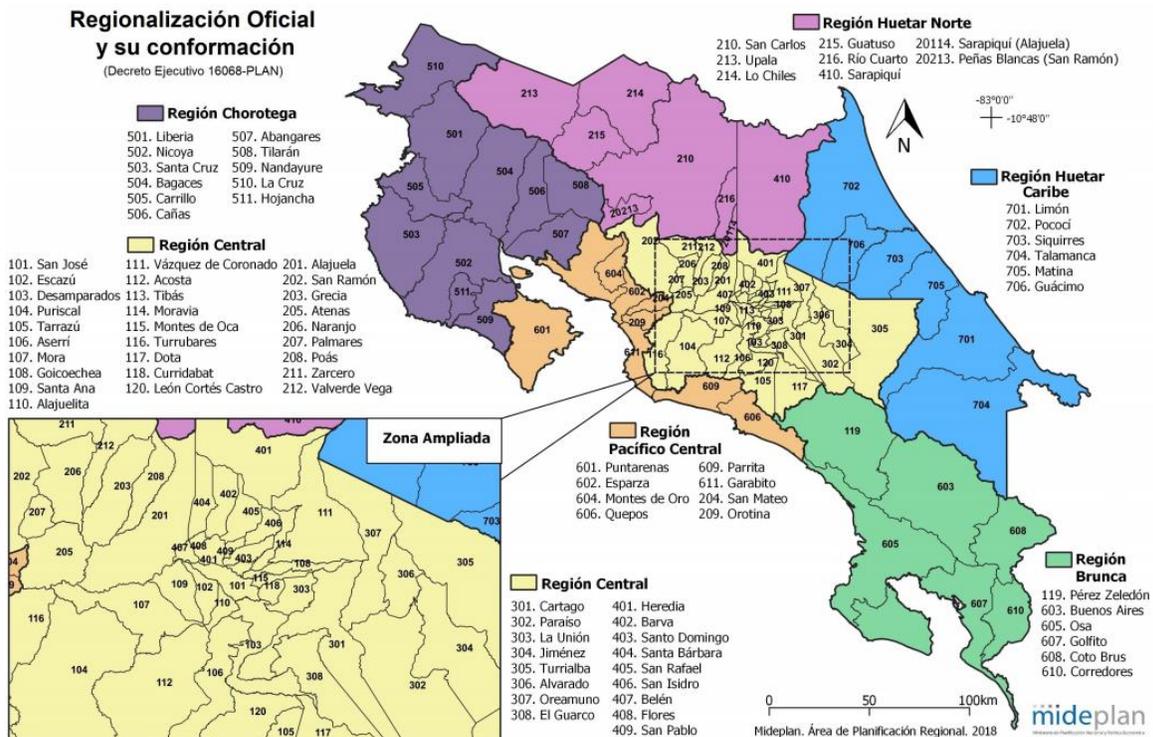


Ilustración 13. División Regional-Cantonal de Costa Rica

Fuente: MIDEPLAN (2020)

Para la Región Central, Pacífico Central y Brunca se tienen los siguientes productos generadores de biomasa: de la **caña de azúcar** se puede obtener del campo el rastrojo y de la industria el bagazo, la cachaza, la melaza, las aguas residuales, las cenizas, las vinazas y la proteína residual del proceso de producción de alcohol; también del café se pueden obtener la pulpa, la cascarrilla de café, el mucílago y las aguas residuales del proceso. Para estas mismas regiones es posible contar con **leña** que proviene de aserraderos, también el aserrín y la burucha.

En la Región Brunca se produce **piña**, de la cual se extrae del campo el rastrojo y del proceso industrial la corona. La **palma aceitera** se produce en las regiones Brunca y Pacífico Central; esta produce la fibra de mesocarpio, la cascarilla del coquito y la fibra de pinzote. El **arroz** se procesa en la región Central y Pacífico Central, y la principal producción de biomasa es la cascarilla y el rastrojo del campo.

Para respaldar la información se muestra el siguiente gráfico:

Gráfico 70. *Potencial regional de energía bruta de las actividades generadoras de biomasa.*

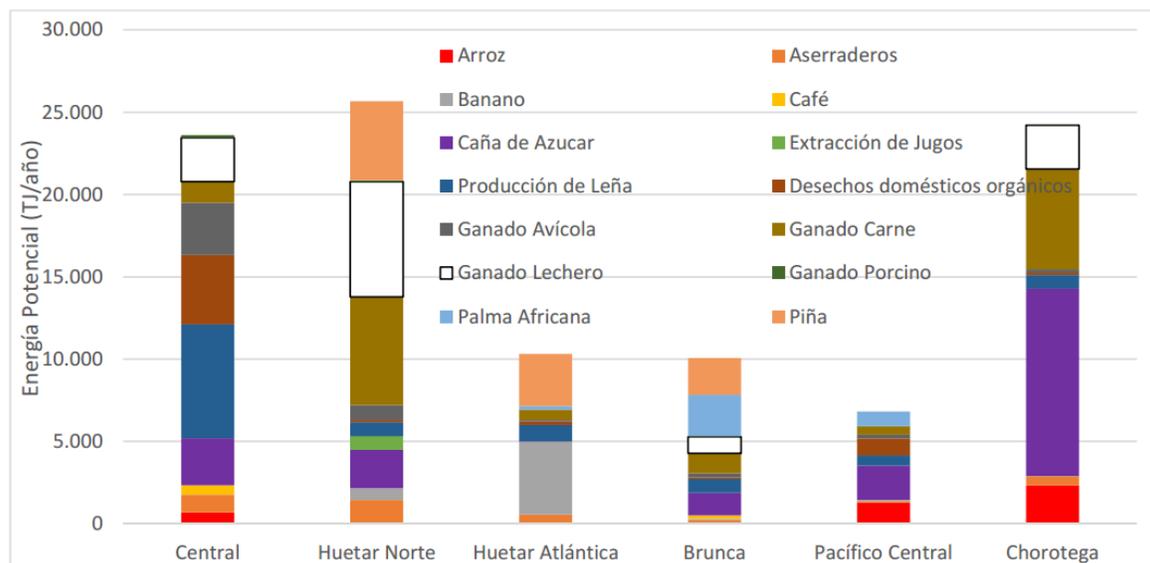


Ilustración 14. Potencial de generación de energía biomásica por región

Fuente: Energía, Medio Ambiente y Desarrollo (EMA) (2018, p. 230)

11.10 Alternativas de fuentes biomásicas comerciales

Pellets: según lo indicado por la empresa “Pelletics Energía Renovable”, los pellets son realizados a base de desechos de madera (aserrín, burucha y ramas), pasando por procesos de secado hasta contar con menos del 10% de humedad (Pelletics, 2021). Las dimensiones de este producto y el poder calorífico neto se muestran en la siguiente imagen:

Certificado de calidad del combustible pellets de madera basado en la Norma CEN/TS 14961	
PRODUCTOR	Pelletics
ORIGEN	residuos de madera
CÓDIGO COMERCIAL	Pellets de madera
NORMATIVA	Dimensiones: diámetro 6mm, largo <30mm (D06) Contenido de humedad: <10% (M10) Ceniza: <1.5 w-% (A1.5) Durabilidad Mecánica: >97.5% (DU97.5) Partículas finas: < 1-w% (F1) Sin aditivos
ESPECIFICACIÓN	Poder Calorífico Neto: 18.5 MJ/kg

Ilustración 15. Especificaciones técnicas pellets distribuidos por la empresa Pelletics

Fuente: Pelletics (2021)

11.11 Fuentes energéticas derivadas del petróleo para la industria en Costa Rica

En Costa Rica, el ente encargado de la distribución y comercialización de combustibles es RECOPE (Refinadora Costarricense de Petróleo S.A), y los precios e información relevante de los combustibles son los estipulados por esta organización. Los combustibles son importados, y su enfoque es garantizar la seguridad energética del país y el cumplimiento con la seguridad ambiental que conlleva el manejo de estos productos (RECOPE, 2022).

Entre sus productos, principalmente en la industria y para la generación de calor, se utilizan el Gas Licuado de Petróleo (GLP), el búnker C, el keroseno y el gasóleo. Para este estudio se van a considerar el GLP y el búnker C, que se van a describir seguidamente más adelante, esto para tomar en cuenta sus propiedades para la generación de vapor y las condiciones que implican su uso.

De acuerdo con la información disponible por RECOPE, describe el **GLP** como “una mezcla de hidrocarburos gaseosos provenientes de la refinación del petróleo, su uso ofrece grandes ventajas desde el punto de vista ambiental, ya que produce menos emisiones de gases contaminantes que los combustibles líquidos” (RECOPE, 2022, p. 21). En la industria se utiliza principalmente en hornos que trabajan a alta temperatura.

El **Búnker C** es “un combustible residual de la destilación y craqueo del petróleo que está formado por hidrocarburos de cadena larga” (RECOPE, 2022, p. 26). Este combustible se clasifica del 1 al 6, según su punto de ebullición y la aplicación que se necesita, y también influye en la viscosidad y el precio. Para el caso en análisis se utilizan los valores característicos del Fuel Oil N° 6.

11.12 Electricidad como fuente de energía para caldera

De acuerdo con lo descrito por Osejo Martínez (2017), manifiesta que este tipo de calderas cuentan con unas resistencias eléctricas que se sumergen en el agua, donde el calor es transmitido por estar resistente al fluido y es el mecanismo por el cual se transfiere el calor. Tienen altos costos de operación y baja eficiencia para el proceso de calentamiento. Como ventaja es que no producen residuos, por lo que resultan idóneas en lugares que requieren condiciones de limpieza especiales (Osejo Martínez , 2017, p. 20).

También existen del tipo de calderas eléctricas que utilizan electrodos; en estas la corriente eléctrica fluye a través del agua, y por medio de las diversas configuraciones es posible generar el vapor y el fluido eléctrico, que se da en el sentido por el cual se transmite el agua del compartimiento de almacenamiento al generador de vapor (Recursos Biblio, s.f., p. 131). A continuación, se muestran algunos tipos de calderas eléctricas de electrodo:

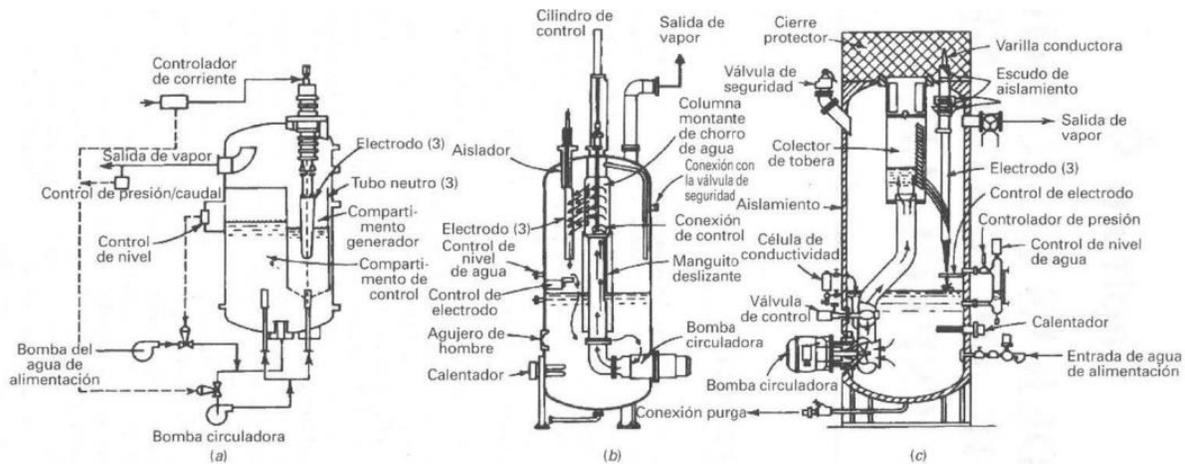


Figura 4.1. Tipos de calderas de electrodo. (a) La corriente fluye a través del fluido hasta la pared del compartimento generador. (b) Caldera de alta tensión con electrodo rociado con manguito deslizable de control para regular el caudal de agua. (c) Caldera de alta tensión con electrodo rociado y con caudal de agua regulado por un distribuidor rotativo.

Ilustración 16. Tipos de calderas de electrodo

Fuente: Recursos Biblio (s.f., p. 132)

Parte de las configuraciones que se muestran en la ilustración es lo que se puede encontrar en el mercado, ya que el método transfiere la energía directamente al agua, por lo que las pérdidas de energía en la generación de vapor son mínimas. Los tamaños y el diseño de los equipos van a depender de la necesidad; sin embargo, es posible regularlos para ajustarse a la demanda de energía en el momento dentro del rango que se necesiten.

12 Marco metodológico

12.1 Enfoque metodológico

Esta investigación se lleva a cabo mediante el enfoque cuantitativo; cada tarea realizada es necesaria para poder continuar con los demás puntos de la investigación, por lo que presenta un orden secuencial en cuanto al manejo de la información y el tratamiento de esta. Además, Hernández Sampieri et al. mencionan que se debe dar un análisis de las mediciones hechas, parte de lo que se realiza para este estudio, para poder definir puntos importantes en cuanto a la problemática existente (Hernández Sampieri et al., 2010, p. 4).

Estos mismos autores describen el proceso cuantitativo por medio de fases, las que se aplican en esta investigación para poder trabajar con base en la perspectiva planteada. El proceso mencionado es el que se muestra en la siguiente imagen:

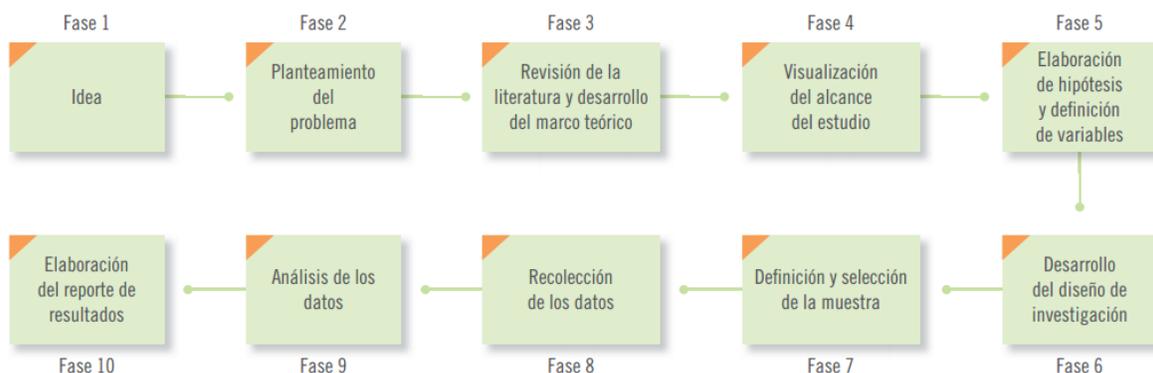


Ilustración 17. Fases del proceso cuantitativo

Fuente: Hernández Sampieri et al. (2010, p. 5)

Otra de las justificantes principales, para definir en la investigación, es que se pretende buscar un resultado acotado para cada una de las variables en estudio. Por esta razón, se deben relacionar las mediciones y los datos históricos con la teoría utilizada, para generar los cálculos necesarios para cada uno de los indicadores establecidos. Con los mencionados anteriormente, se define este enfoque y se justifica mediante cada uno de los pasos desarrollados para abordar el estudio.

12.2 Tipo de investigación

El tipo de investigación cuenta con una tendencia mayor a ser explicativo, ya que busca relacionar el comportamiento de variables; por ejemplo, el consumo de combustible en relación con las condiciones necesarias para cumplir con el proceso de secado de café. Al tomar como referencia lo mencionado por Hernández Sampieri et al., el estudio trata de proporcionar un sentido de entendimiento para el fenómeno en estudio y las condiciones en las cuales se desarrolla (Hernández Sampieri et al., 2010, pp. 83-86).

También, es posible que una investigación cuente con diferentes tipos de alcances durante el desarrollo, pero para definir el tipo de investigación se toma en cuenta el punto de vista final. Es basado en comparar diferentes variables y las condiciones en las que se desarrollan, para generar las conclusiones y recomendaciones que dé como resultado el estudio, y por esto se define este tipo de alcance.

12.3 Hipótesis o preguntas generadoras

1. ¿Es posible identificar alternativas de biomasa en la zona, para realizar el proceso de secado del café sin alterar el sistema de vapor actual?
2. ¿Cuál es la demanda energética del proceso relacionada con el sistema de vapor?
3. ¿Qué cambios deben generarse para implementar una nueva fuente de energía para la generación de vapor, que cumpla con las condiciones necesarias para el secado de café?
4. ¿Qué cambios se requieren en el cuarto de calderas para implementar las soluciones planteadas?

12.4 Definición de variables

Tabla 2. Definición de variables de estudio

Objetivos	Variable	Dimensión	Indicador
Analizar la viabilidad de la sustitución de madera como fuente energética en las calderas de la empresa CoopeTarrazú por otro combustible alternativo, que cumpla con las condiciones necesarias para que se realice el proceso de secado del café con aire caliente a una temperatura que oscile entre 60-65 °C, esto en el segundo semestre del año 2021 y primero del 2022.	Energía	Poder calorífico del combustible	(Unidad de energía demandada) / Producción (fanegas procesadas)
Investigar alternativas para el cambio de combustible de las calderas actuales por alguna otra fuente de energía biomásica disponible, o en su defecto búnker, gas o electricidad, para que cumpla con las condiciones necesarias para el proceso de secado del café.	Disponibilidad	Volumen consumido	(Unidad medida combustible) / Producción (fanegas procesadas)
Determinar el impacto ambiental en toneladas de CO ₂ del proceso de secado de café para la evaluación de la fuente energética menos contaminante.	Gases de efecto invernadero	Huella de carbono	(Toneladas de CO ² según combustible) / Producción (fanegas procesadas)
Realizar un estudio técnico de las alternativas planteadas para la determinación del alcance que cada una requiere y la estimación de la implementación.	Factibilidad	Complejidad alcance a implementar	Tiempo para realizar el cambio
Generar un estudio económico para la determinación de la opción que genere mayor rentabilidad en un lapso de 10 cosechas posteriores.	Inversión para la implementación	Retorno inversión	Tasa Interna de Retorno [TIR], Período de Recuperación [PR], Valor Actual Neto [VAN]

Fuente: Elaboración propia (2022)

12.5 Población

La población en estudio se basa en las diferentes alternativas de combustible disponibles para el funcionamiento de calderas, considerando combustibles tradicionales y alternativas biomásicas. La muestra es tomada mediante el criterio no probabilístico (muestra dirigida), que consiste en la elección de los elementos a estudiar de acuerdo con las características presentes en la investigación. Según lo anterior, serán estudiados los siguientes combustibles: GLP (gas licuado de petróleo), búnker C, electricidad, bagazo, cascarilla de café, fibra de mesocarpio, cascarilla de coquito, leña, aserrín, burucha, cascarilla de arroz y pellets; la selección de los residuos biomásicos es basada en la producción del país, motivo por el cual se piensa considerar estas alternativas.

12.6 Técnicas e instrumentos para recolectar información

Como el fin del estudio es plantear una solución con base en un sistema que ya se tiene en la empresa y algunas variables se llevan bajo control, la idea es utilizar la información disponible e ir generando el estudio con base en esta, para abordar la problemática del abastecimiento de la madera de acuerdo con la demanda requerida. Se espera aplicar lo siguiente para la recolección de datos:

1. Tabular información histórica de la empresa, consumos, proceso y demanda.
2. Diagnóstico de la situación actual del sistema.
3. Investigación para alternativas de fuentes de biomasa disponibles, que puedan satisfacer la demanda de combustible de las calderas existentes.
4. Planos suministrados por la empresa y visitas para identificar las dimensiones disponibles.

12.7 Desarrollo de la investigación

12.7.1 Diagnóstico

1. Croquis del sistema de vapor.
2. Identificación de consumidores de vapor y su objetivo.
3. Conocimiento del proceso de beneficiado e identificar valores relacionados con el secado de café, tomando en cuenta el flujo de energía que se da por medio de la generación de vapor.
4. Termografía general del sistema, para determinar puntos que puedan generar desperdicios de energía.
5. Estimar pérdidas de energía en el sistema.

12.7.2 Dimensionar el sistema y asignar consumos

1. Identificar la demanda de energía requerida para cada caldera, según los puntos que alimenta.
2. Seccionar consumos por tramos, identificando la capacidad de vapor requerida para cada punto.
3. Identificar la capacidad de secado que debe manejar el proceso.

12.7.3 Históricos de consumo y producción

1. Consolidar históricos de consumo de madera existentes y tabular la información; lo mismo con los datos de fanegas procesadas.

12.7.4 Estimación de demanda energética y pérdidas de energía en proceso

1. Calcular el consumo energético de las guardiolas, para cumplir con el secado de café.
2. Generar el cálculo por medio de la extracción de humedad del grano, y comparar con el calculado según los consumos teóricos de los intercambiadores de calor.
3. Seccionar los consumos según los tramos manejados por cada caldera.

4. Agregar pérdidas identificadas según el estado actual del sistema y calcular el calor total requerido.
5. Estimar la eficiencia del proceso con y sin los desperdicios de energía calculados, para dimensionar un posible ahorro de energía para el sistema actual.

12.7.5 Definición y análisis de fuentes de energía a comparar

1. Definir las fuentes que se van a comparar en el estudio.
2. Describir características de importancia en relación con el estudio (poder calorífico, emisiones de CO₂, disponibilidad, costo, almacenamiento, entre otras).
3. Calcular indicador de emisiones, consumo del combustible, capacidad calórica que requiere el sistema, según el producto procesado.
4. Identificar variantes que se generarían en el sistema.
5. Generar estudio económico para las alternativas planteadas.
6. Generar matriz de selección para la propuesta recomendada.

13 Presentación y análisis de resultados

13.1 Conocimiento básico para el proceso de secado de café

- **Recibo de café:** al beneficio se presentan los diferentes camiones que son parte de la cooperativa, con el propósito de dejar el café proveniente de cada uno de los recibidores asignados para entregar en este sitio, y de algunos asociados que hacen la entrega ahí.
- **Despulpe y lavado:** luego el café se transporta al proceso de selección; en él se filtran los granos de café que den una menor calidad. Posterior a esto, se realizan el despulpado del café y el lavado del grano, que se llevan a cabo mediante maquinaria especializada. Después, se da el transporte del café por medio de bandas; estas se conectan con el beneficio y es donde se da el paso del grano hacia el proceso de oreado.
- **Presecado:** para el proceso de secado se cuenta con secadoras oreadoras verticales de tipo cascada. En este se elimina la humedad superficial del grano, y también las secadoras funcionan como acumuladoras temporales de este, en tiempos donde se maneja a tope la producción. La humedad que adquiere el grano, al pasar por este proceso, se encuentra en el promedio del 55%, y se trabaja con temperaturas para el aire en un rango de 60 a 70 °C. Los equipos utilizados para este proceso cuentan con hornos alimentados por cascarilla de café, independientes del sistema de vapor. En esta parte también se trabaja en la extracción de humedad, toma las condiciones del grano que proviene de la etapa de oreado y se trabaja bajo las mismas condiciones de temperatura. El grano sale con una humedad aproximada del 20% y, al igual que en el proceso anterior, las secadoras se alimentan de madera y cascarilla de café; además, son independientes del proceso de secado.

- **Secado:** en este punto el café debe alcanzar un 11% de humedad para estar en condiciones óptimas y poder ser almacenado. Para realizar esta tarea se utilizan las secadoras tipo guardiola; a ellas ingresa el aire caliente que proviene del intercambiador de calor gracias al ventilador; este aire se debe mantener en un rango de 60-65 °C. Los intercambiadores de calor se alimentan con el vapor generado por las calderas y son solo estos para los que se utilizan las calderas. Se cuenta con un total de 37 intercambiadores.
- **Almacenamiento:** al cumplir con los parámetros de calidad, el grano de café es descargado de la guardiola y se transporta por medio de tornillos sin fin a los silos de almacenamiento.
- **Trillado:** posterior al almacenamiento de café y para ir preparando el producto final se realiza el trillado, que consiste en eliminar la cáscara del grano de café.
- El proceso final es el de hacer los empaques, cumplir con los controles de calidad y realizar el chequeo final, pesado y definido por tipo de café.

13.2 Generación y flujo de vapor en el beneficio

Para la generación de vapor se utiliza madera y cascarilla de café actualmente; a madera es controlada según el traslado desde el punto de salida al consumidor a quien se dirige. La cascarilla de café, al ser un residuo generado del proceso de trillado, no tiene un control en cuanto a inventario, pero con base en información brindada por la empresa, se tiene un estimado de que por cada fanega procesada se utilizan 10 kg de cascarilla, y estos mismos son los que generan una fanega, derivada del proceso de trillado.

La madera recibida en el beneficio para las calderas se acomoda en grandes montones y se trata de separar por tamaño, los troncos para la caldera Wickes (caldera grande) y los trozos de ramas y tablas para la caldera Lambda (caldera pequeña). El operario de cada una de las calderas se encarga del acomodo y el ingreso del material en el horno, y trata de mantener las condiciones de temperatura y presión del vapor con estabilidad. Con la siguiente imagen se pretende mostrar el proceso para la generación de vapor:

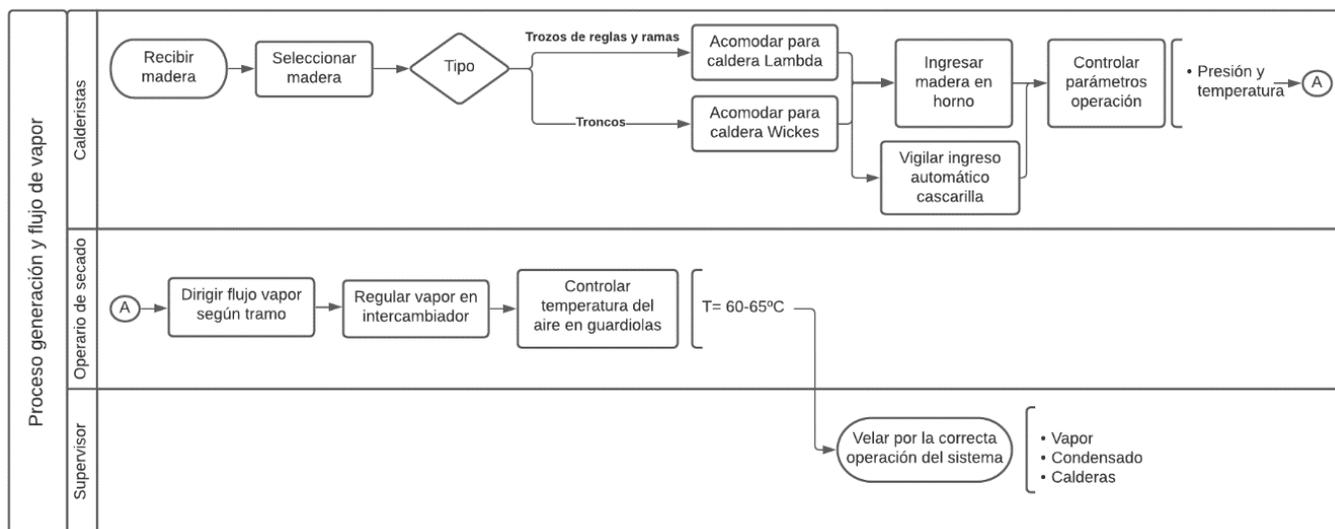


Ilustración 18. Proceso de generación y flujo de vapor

Fuente: Elaboración propia (2022)

En ambas calderas se trata de trabajar alrededor de 3 kg/cm^2 de presión de vapor; sin embargo, es común encontrar este valor cerca de 2 a 2.5 kg/cm^2 en ambos casos. Se ve afectado constantemente al realizar ingresos de madera; al abrir la compuerta es evidente la caída de temperatura en el horno y una alteración en presión de vapor; por ejemplo, en una observación en el ingreso de madera en la caldera Lambda se observó una temperatura mínima de 398°C y 2.4 kg/cm^2 pasar a un máximo de 606°C y 2.7 kg/cm^2 , esto en un lapso de 10 minutos.

13.3 Diagnóstico y detalles del sistema de vapor

Los equipos en estudio, que forman parte del sistema de vapor y el proceso de secado de café, son los siguientes:

1. 37 intercambiadoras de calor.
2. 32 guardiolas con capacidad de 60 fanegas de café, 5 con capacidad de 150 fanegas.
3. Tubería principal, secundaria y de alimentación de vapor a intercambiadores.
4. Tubería principal y secundaria de condensado.
5. Tanque de almacenamiento de agua y condensado.
6. 37 trampas de vapor.
7. Caldera pirotubular Lambda, constructora Field y caldera acuotubular Wickes Boiler.
8. Almacenamiento de madera.

Para obtener las medidas aproximadas del sistema de vapor, se realizó una visita en el sitio para el levantamiento de un croquis. Por medio de una cinta métrica en rollo, con ayuda del ingeniero encargado del beneficio (Ing. Mariano Castro), se tomaron las medidas de cada uno de los tramos del sistema de vapor, al no existir documentos donde se tuvieran el debido registro.

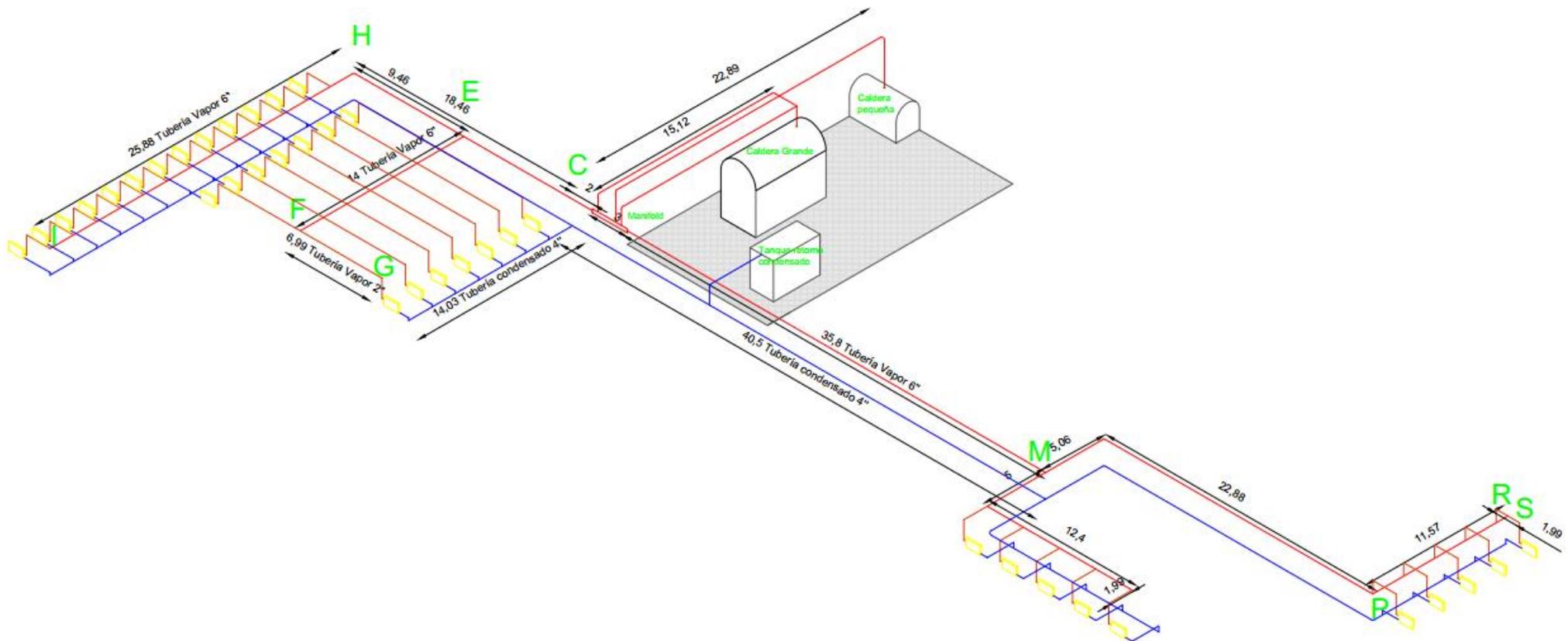


Ilustración 19. Croquis del sistema de vapor en Beneficio Central CoopeTarrazú

Fuente: Elaboración propia (2022)

Del croquis anterior se puede obtener el siguiente resumen para cada uno de los tramos:

Tabla 3. Resumen de tramos e intercambiadores del sistema de vapor

Tramo	Distancia (m)	Intercambiadores	Numeración guardiolas	Diámetro tubería (vapor principal /condensado/salidas vapor)
H-I	25.88	13	#15-#27	6"/4"/2"
E-H	9.46	0	-	6"/4"
E-F	14	14	#1-#14	6"/4"/2"
F-G	6.99	0	-	2"/4"
Caldera pequeña-Manifold	22,89	0	-	6"/--
Caldera grande-Manifold	15.12	0	-	6"/--
E-C	9	0	-	6"/4"
C-M	35.8	0	-	6"/--
C-M	40.5	0	-	--/4"
M-Final	20.5	5	#33-#37	6"/4"/2"
M-P-R	41.14	5	#28-#32	6"/4"/2"

Fuente: Elaboración propia (2022)

Se tiene el área disponible para las calderas de 251.75 m² aproximadamente. En esta región se encuentran ambas calderas, chimeneas, retorno de agua de ambos hidrociclones para sedimentar partículas de las chimeneas, sistemas de bombeo para agua de suministro, pequeños tanques para el tratamiento de agua y tolvas de alimentación de cascarilla. Las dimensiones aproximadas para las calderas y el tanque de almacenamiento de agua son las siguientes:

Tabla 4. Dimensiones aproximadas de calderas

Caldera	Imagen referencia	Dimensiones
<p>Caldera pequeña: Lambda, Constructora Field S.A, Barcelona</p>		<p>Diámetro x Longitud = 2.9 m x 6 m</p>
<p>Caldera grande: The Wickes Boiler Co., Saginaw- Michigan, U.S.A 1958</p>		<p>Ancho x Largo x Altura = 3.5 m x 4.98 m x 8.5 m (considerando desde el horno hasta la parte superior)</p>
<p>Tanque de condensado</p>		<p>Largo x Ancho x Alto = 2.4 m x 1.2 m x 4.05 m</p>

Fuente: Elaboración propia (2022)

13.4 Consumo de madera a partir de históricos

La madera utilizada en la cooperativa para los diferentes equipos que utilizan madera como fuente de energía es almacenada en “patios” a la intemperie, algunos grupos cubiertos con plástico negro. De estos lugares se traslada la madera hasta el beneficio y es donde se lleva el control del inventario de madera, que es consumida por las calderas. Para el consumo diario se descarga lo más cerca posible de las calderas, de ahí se dividen por tamaño y tipo: los troncos grandes se utilizan principalmente en la caldera Wickes, por las condiciones con las que cuenta el acceso del material en la hoguera.

A continuación, se presentan los datos de consumo de madera en las cosechas anteriores con las que se cuenta en el registro:

Tabla 5. Historial de consumos de madera para la generación de vapor

Cosecha	Mes	Caldera grande (m³)	Caldera pequeña (m³)
2018 - 2019	Octubre	0	5.35
	Noviembre	21.4	306.4
	Diciembre	1193.82	540.02
	Enero	720.09	1033
	Febrero	1009.67	725.19
2019 - 2020	Noviembre	0	425.25
	Diciembre	1914.88	536.23
	Enero	1743.31	1460.59
	Febrero	512.39	460.97
	Marzo	549.25	123.5
2020 - 2021	Noviembre	0	258.12
	Diciembre	945.76	963.72
	Enero	1761.78	201.5
	Febrero	1104.25	1286.42
	Marzo	504.48	460.29

Fuente: Elaboración propia (2022)

Es posible observar que los mayores consumos se relacionan con los meses de diciembre, enero y febrero, periodo en el cual se da la tendencia de mayor beneficiado de café. Las condiciones de maduración y climatológicas de la zona hacen que el consumo de madera en este lapso se haga en mayor cantidad, ya que se relaciona directamente con las cantidades de café que debe tratar el beneficio para poder almacenar el grano.

13.5 Estimación de la energía requerida para extraer la humedad del grano

Al ser la humedad el factor de calidad para poder almacenar el grano en buenas condiciones, se va a estimar la demanda de energía según la diferencia de entrada con la salida de este. Según la información recopilada, los rangos de humedad con los que ingresa el café en las guardiolas son de un 30% a un 35%.

Para este valor se toma como referencia la tabla del anexo 5, cuyo propósito es estimar las equivalencias en volumen y peso que se puede manejar durante la cosecha. Con esto se pueden obtener los kilogramos totales del café seco; a partir de este valor calcular los kilogramos que representa la humedad en base húmeda (b.h) contenida en el grano (relación entre el cociente de masa de agua, en comparación con la masa total que posee el grano) y lo que se debe extraer en el secado; para esto se muestra la siguiente tabla:

Tabla 6. Kilogramos de agua según % de humedad contenido en grano por cosecha

Cosecha	Fanegas	Quintales	kg (35% b.h)	kg (30% b.h)	kg (11% b.h)
2018-2019	216 161.00	213 175.00	3 859 660.90	3 308 280.77	1 362 962.11
2019-2020	213 810.08	212 249.79	3 817 684.07	3 272 300.63	1 348 138.84
2020-2021	223 403.42	213 730.42	3 988 977.87	3 419 123.89	1 408 627.82

Fuente: Información suministrada por la empresa (2022)

La tabla anterior hace referencia al total de kilogramos de agua que se extrae en cada una de las cosechas. También los diferentes porcentajes toman en cuenta las condiciones en las cuales entra el grano en las guardiolas y al que se debe dejar salir para ser almacenado. Con esta misma información se obtienen los kilogramos de agua que contiene cada fanega y, de esta manera, relacionar los kilogramos por hora que pueden manejar las guardiolas mientras extraen la humedad en el tiempo esperado. En la siguiente tabla se muestran los valores de kilogramos de agua por fanega según el porcentaje de humedad en el grano:

Tabla 7. Kilogramos de agua por fanega según % de humedad contenido en grano

kg/ff (35% b.h)	kg/ff (30% b.h)	kg/ff (11% b.h)
17.86	15.30	6.31

Fuente: Elaboración propia (2022)

13.5.1 Capacidad de procesamiento de café de las guardiolas con un tiempo óptimo para el secado de 20 horas

El proceso final de secado se lleva a cabo en las secadoras tipo guardiola, que cuentan con una capacidad determinada, y el tiempo óptimo con el que se espera llevar el grano a un 11% de humedad es de 20 horas; si este se prolonga, es probable que haya problemas con el flujo del proceso para el café que viene entrando. Uno de los problemas principales sería el retraso en la línea, porque en el transcurso del proceso se utiliza cada parte como acumulador. Al ser un proceso continuo, es posible almacenar café en los distintos puntos del proceso, en el área del beneficio, las tolvas de café chancado y las secadoras verticales, por ejemplo. Se toman en cuenta las guardiolas, ya que en este punto es donde se utiliza el vapor y llevan el café de un 30-35% de humedad al 11% esperado; esta es su capacidad:

Tabla 8. Capacidad de procesamiento de café en guardiolas por tramo de descrito en ruta de vapor

Tramo	Numeración de guardiolas	Capacidad de secado (fanegas)	Capacidad total del tramo (fanegas)
E - F'	#1 - #7	60	420
E - F	#8 - #14	60	420
H - I	#15 - # 27	60	780
P - R	#28 - #32	60	300
M - Final	#33 - #37	150	750
			2670

Fuente: Elaboración propia (2022)

Al relacionar la información del indicador de kilogramos de agua por fanega, es posible obtener la cantidad de kilogramos por hora que se puede extraer trabajando al 100% de la capacidad, lo cual se realiza en el beneficio. Se considera que el grano ingresa en las guardiolas con un 35% de humedad y se retira con el 11% recomendado; esta sería la capacidad que puede manejar el beneficio por hora para el secado de café:

Tabla 9. Capacidad de secado de agua en kg/h

Tramo	# Guardiola	Capacidad de secado (fanegas)	Capacidad total (fanegas)	Humedad en grano (kg agua)	Capacidad de secado (kg agua/hora)
E - F'	#1 - #7	60.00	420.00	4851.08	242.55
E - F	#8 - #14	60.00	420.00	4851.08	242.55
H - I	#15 - # 27	60.00	780.00	9009.14	450.46
P - R	#28 - #32	60.00	300.00	3465.05	173.25
M - Final	#33 - #37	150.00	750.00	8662.64	433.13
-	-	-	2670.00	30838.98	1541.95

Fuente: Elaboración propia (2022)

Con base en la capacidad de secado por hora, se estima la carga térmica que se debe manejar en este proceso, teniendo en cuenta los siguientes puntos: se considera un trabajo continuo de 20 horas, las 37 guardiolas operando de acuerdo con su capacidad, un diferencial de temperatura estimado del grano en la tolva (antes del ingreso en la guardiola) de 25 °C y un máximo alcance de 60 °C en el interior de la guardiola. Según lo anterior, se tiene como resultado **3,862,444.05 kJ/h** como la demanda máxima de energía, solamente por la extracción de humedad del grano.

13.6 Consumo de energía según capacidad de intercambiadores de calor instalados

En el anexo 8 se puede observar el dato de consumo teórico para cada uno de los intercambiadores de calor; con este dato es posible identificar el consumo de vapor máximo por cada tramo, y así tener una relación de los kilogramos por hora que se deben producir por cada fanega procesada. Los cálculos realizados por este método van a servir de comparación con la energía que demanda la extracción de humedad con la energía que demandan los intercambiadores para poder operar correctamente.

El consumo teórico para cada uno de los intercambiadores es de 181.44 kg/hora de vapor; para un total de 37 se deben generar 6713.17 kg/hora de vapor y estarían funcionando todas las guardiolas. La relación de la capacidad de manejo de café en las guardiolas se compara con el consumo de vapor y, con estos valores, se realiza el cálculo con el consumo de vapor general para las cosechas anteriores, tal y como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 10. Consumo de vapor de intercambiadores estimado por cosecha

Cosecha	(kg/h vapor) / fanega (ff)	(kg/h vapor) /cosecha
2018-2019	2.51	543492.51
2019-2020		537581.60
2020-2021		561702.09

Fuente: Elaboración propia (2022)

Se muestra un consumo similar con base en el histórico de las cosechas pasadas; con este dato se relaciona el consumo de vapor por cada intercambiador que se encuentra conectado a cada una de las guardiolas y se puede esperar un consumo similar al calculado. Siempre, al tener en cuenta que este consumo de vapor se genera debido al consumidor instalado, para el total de intercambiadores y según el consumo teórico de los mismos, se tiene una demanda de energía de **14 711 235.30 kJ/h**; para este cálculo se toma en cuenta la entalpía a presión de 2.3 kg/cm² (0.23 MPa).

13.7 Estimación de demanda de energía total por capacidad máxima en

Guardiolas

Para estimar la demanda de energía se utiliza la combinación de valores teóricos y prácticos; esto se lleva a cabo para poder estimar el consumo energético que requiere el proceso trabajando con un total de guardiolas. Las estimaciones se muestran en la siguiente tabla, y se detallan más adelante los métodos utilizados para obtener ese valor:

Tabla 11. Descripción de parámetros calculados para demanda total de energía

# Parámetro	Descripción	Unidad	Valor estimado
1	Carga extracción de humedad (no se incluye en cálculo la demanda de energía total)	kJ/h	3,862,444.05
2	Carga intercambiadores	kJ/h	14,711,235.30
3	Pérdida tuberías y accesorios	kJ/h	243,975.26
4	Pérdida retorno condensado	kJ/h	284,994.81
5	Pérdida chimenea caldera Wickes	kJ/h	1,467,321.68
6	Pérdida chimenea caldera Lambda	kJ/h	1,917,126.81
7	Pérdida transferencia caldera Wickes	kJ/h	13,468.20
8	Pérdida transferencia caldera Lambda	kJ/h	29,075.67
9	Pérdida eficiencia caldera Wickes (cálculo para toda la demanda)	kJ/h	3,360,095.59
10	Pérdida eficiencia caldera Lambda (cálculo para 15 guardiolas)	kJ/h	2,648,724.00
11	Demanda de energía TOTAL (kJ/h)	kJ/h	24,676,017.33

Fuente: Elaboración propia (2022)

A continuación, se describirán los métodos utilizados para estimar cada uno de los parámetros que se encuentran en la tabla anterior:

- **Parámetro 1:** se estima considerando la capacidad total de las guardiolas, tomando como referencia los valores de humedad de entrada y salida del grano, que en realidad es el agua que debe ser removida en el proceso. El valor calculado es de 1541.95 kg/h de agua que debe evaporarse, considerando el total de guardiolas trabajando.

Este se calcula estimando el calor sensible y el calor latente para obtener el total, como diferencial de temperatura se utiliza 35 °C (25 °C de entrada y 60 °C dentro del intercambiador de calor), el calor específico del agua como 4.18 kJ/(kg*°C) y la entalpía de evaporización a 60 °C, que es 2,358.47 kJ/kg. Al calcular se obtiene como calor sensible 225,803.05 kJ/kg y para el calor latente 3,862,444.05 kJ/kg.

Con este valor, se pretende comparar el consumo de energía existente con base en la carga térmica instalada, para poder extraer la humedad del producto. No se incluye en la sumatoria total de la demanda energética, ya que ambos son dos cargas finales, una la demanda energética instalada y la otra la demanda energética que requiere el proceso.

- **Parámetro 2:** la carga de intercambiadores se toma de su consumo teórico en kg/h de vapor; el mismo se detalla en el anexo 8 (400 lb/h – 181.44 kg/h por cada intercambiador). Para un total de 37 unidades se debería generar un aproximado de 6,713.17 kg/h con base en la carga instalada. La presión de operación, en que se tomó como referencia el valor en el que se encuentran trabajando las calderas en el sitio, 2.3 kg/cm² (0.23 MPa), al ser alimentadas con biomasa y el operador deber abrir la hoguera para ingresar la madera, este valor tiene variaciones que se dan en un lapso corto de tiempo, pero es repetitivo a lo largo de la jornada.

Según el dato de presión, se toma la entalpía de evaporación cuyo valor es de 2,191.40 kJ/kg; al calcular el calor total se tiene como resultado 14,711,235.30 kJ/kg.

- **Parámetro 3:** para estimar las pérdidas en las tuberías y accesorios, se realizaron tomas térmicas utilizando la cámara Fluke TI125, con la que cuenta la universidad; con esta fue posible identificar puntos calientes en los diferentes tramos, calderas y el comportamiento térmico de las guardiolas al estar funcionando. Se identifica la longitud equivalente en accesorios y tuberías, temperaturas en trampas de vapor e intercambiadores; también se aplican factores para las zonas con y sin aislamiento, y así se calcula la tasa de condensación generada por la transferencia de calor al medio ambiente, emitida por estos tramos.

Para desarrollar este cálculo se utilizó la fórmula que se muestra en el anexo 18; con esta se estiman las pérdidas de calor por radiación, las que se dan al estar en contacto el metal con el ambiente, ya que generan una emisión de calor a este y genera condensado en las líneas. Se consideran como pérdidas, porque es energía que se pierde en el trayecto y no en el consumidor final.

Se identificó la longitud en los tramos aislados y sin aislar, la tubería de vapor cuenta con dimensiones de 6", 4" y 2". Cada una se cuantificó de la siguiente manera: tubería de 6" sin aislar 17.6 m y aislada 155.69 m, tubería de 4" aislada 0.70 m y sin aislar 19.80 m, tubería de 2" aislada 81.26 m y sin aislar 90.60 m. Los resultados del cálculo fueron los siguientes:

Tabla 12. Tasa de condensación en tubería

Tubería	Longitud equivalente tubería (m)	Tasa condensación (kg/h)
6" aislada	155.69	26.70
6" sin aislar	17.60	20.12
4" aislada	0.70	0.09
4" sin aislar	19.80	16.30
2" aislada	81.26	5.71
2" sin aislar	90.60	42.42

Fuente: Elaboración propia (2022)

La diferenciación entre tubería aislada y sin aislar es para poder aplicar los factores recomendados. Con la entalpía de evaporación mencionada en el parámetro 2, es posible calcular el calor total que genera el total de la tasa de condensación. El resultado es de 243,975.26 kJ/h, que es el valor estimado en pérdidas para las tuberías y los accesorios.

- **Parámetro 4:** actualmente, el retorno de condensado no es aprovechado; para estimar la pérdida se utiliza la misma tasa de condensación calculada en el parámetro anterior, el diferencial de temperatura se considera estimando la temperatura de entrada del agua a 20 °C y la salida del condensado a 80 °C (valor aproximado al medir la temperatura con la cámara termográfica). La entalpía de evaporización para esta temperatura es 2308.80 kJ/kg; al calcular el calor sensible y el calor latente se tiene una pérdida estimada en 284,994.81 kJ/h.
- **Parámetros 5 y 6:** las pérdidas de calor estimadas en la chimenea se calcularon tomando los valores del flujo volumétrico medido en los reportes operacionales del año 2021 para cada una de las calderas. La temperatura de salida del humo fue medida utilizando la cámara termográfica, la caldera Wickes tiene una temperatura de salida aproximada de 60 °C y la caldera Lambda de 80 °C; en ambas condiciones se toma la entalpía del aire a temperaturas similares del anexo 17. Al realizar los cálculos del calor sensible y latente emitido al ambiente, se obtiene un calor total de 3,384,448.49 kJ/kg como pérdidas de calor en ambas chimeneas.
- **Parámetros 7 y 8:** para calcular estos parámetros también fue de gran ayuda la cámara termográfica, identificando puntos calientes y calculando su área aproximada; estos puntos calientes en la estructura de la caldera pueden representar puntos de corrosión o daños en el refractario, que facilitan el flujo de calor en estas zonas. El cálculo se lleva a cabo utilizando la fórmula que se encuentra en el gráfico del anexo 13. Para pérdidas de calor en paredes exteriores, ya con el área aproximada y el promedio de las temperaturas para los diferentes puntos, se procede con el cálculo, dando como resultado 42,543.87 kJ/h de calor, que se dan por transferencia de calor al medio.

- **Parámetros 9 y 10:** los valores de eficiencia son datos teóricos tomados de un estudio anterior en las calderas de la empresa, que se muestran en el anexo 15. El cálculo se desarrolló sumando el total de la energía que demandan los intercambiadores de calor y las pérdidas; a este valor se le aplica el dato de la eficiencia y se estima la cantidad de energía de más que debería generar un combustible. La caldera Wickes tiene la capacidad para generar el vapor que requieren todas las guardiolas trabajando; para la caldera Lambda se dividió la energía total en 37 y se sumaron solo 15 partes que, según la experiencia, es la capacidad de vapor que puede manejar en condiciones estables esta caldera.

13.8 Selección de alternativas de combustibles

Para este estudio, se considerarán los combustibles tradicionales utilizados para la generación de vapor y diferentes alternativas de biomasa que pueden ser tomadas en cuenta para la generación de energía mediante vapor. A continuación, se muestran los criterios utilizados para seleccionar estos combustibles biomásicos:

Tabla 13: Criterio para la selección de combustible biomásico

#	Producto	Combustible	Región productiva de interés	Estacionalidad	Capacidad almacenamiento	Uso principal	Excedente
1	Caña	Bagazo	Brunca-Central-Pacífico Central	Diciembre-Mayo	-	Energético	9.4% (100 769 toneladas)
2	Café	Cascarilla de café	Brunca-Central-Pacífico Central	Octubre-Abril	Sí	Energético	0.2 % (27 toneladas, 99.2% uso interno)
3	Palma aceitera	Fibra de mesocarpio	Brunca-Pacífico Central	Todo el año (picos julio y agosto)	Sí	Energético	10% (10 184 toneladas)
4	Palma aceitera	Cascarilla de coquito	Brunca-Pacífico Central	Todo el año (picos julio y agosto)	Sí	Energético	19% (7834 toneladas)
5	Madera	Leña	Brunca-Central-Pacífico Central	Todo el año	Sí	Energético	20% (215 924 toneladas, uso actual)
6	Madera	Aserrín	Brunca-Central-Pacífico Central	Todo el año	Sí	Energético	8% (7 694 toneladas)
7	Madera	Burucha	Brunca-Central-Pacífico Central	Todo el año	Sí	Energético	4.9% (349 toneladas)
8	Arroz	Cascarilla de arroz	Pacífico Central-Brunca	Agosto-marzo principalmente	Sí	Energético	30% (44 480 toneladas para venta)

Fuente: EMA (2018)

Nota: Para la región productiva de interés, se toma en cuenta la ubicación geográfica de Tarrazú (regiones Central, Pacífico Central, Brunca) y a partir de esto las zonas cercanas que generan el residuo biomásico para analizar.

Además, se valorará la fuente de biomasa comercial de los pellets de madera. Como combustibles tradicionales serán considerados el búnker C, el GLP (gas licuado de petróleo) y la electricidad.

13.9 Alternativas de combustibles biomásicos

13.9.1 Leña, Cascarilla (combustibles actuales)

En la actualidad, las calderas son alimentadas con leña y cascarilla; a la caldera Wickes que cuenta con un mayor tamaño se le ingresan troncos y trozos de madera grandes. En la caldera Lambda se utilizan sobrantes de reglas, astillas, y trozos de madera de un menor tamaño; en ambos casos el consumo de madera se mide por cosecha, por lo que este control es cuantificable.

Para el caso de la cascarilla consumida se cuenta con un silo donde se almacena, y con un sistema de tornillos sin fin, que la dirigen a la tolva de almacenamiento previo a las calderas. El ingreso de esta es automático en el horno, para estabilizar las condiciones de temperatura y presión en momentos donde la madera no las mantiene.

La leña y la cascarilla cuentan con las siguientes características, para ser utilizadas como combustible:

Tabla 14. Características de cascarilla de café y leña

Combustible	Poder calórico superior (MJ/kg)	Poder calórico inferior (MJ/kg)	Humedad en base húmeda (%)	Densidad (kg/m ³)	Precio (¢)
Cascarilla de café	17.93 ¹	17.20 ³	11	274.70 ¹	0.03 \$/kg
Leña	19.29 ²	19.28 ²	25.56 ²	546.9 ²	15.59 \$/m ³

Fuente: Coto Chinchilla (2013, pp. 9,60)¹; Escuela de Ingeniería Química (2019, p. 2)²; Benavides (2014, p. 75)³; BCCR (2022, parr. 1)

13.9.2 Alternativas de fuentes biomásicas a evaluar

Al considerar otras fuentes de biomasa se toma como referencia el estudio realizado por Chacón, Coto y Flores (“Actualización de la encuesta de biomasa como insumo para su incorporación en la matriz energética de Costa Rica”) (EMA, 2018), donde se plantea la capacidad de generación de energía a partir de los desechos derivados de los residuos agrícolas orgánicos en cada zona del país. CoopeTarrazú se ubica cerca del límite entre la Región Central, que colinda con el Pacífico Central y la Región Brunca; por esta razón se toman en cuenta las fuentes de biomasa producidas en estas tres zonas.

Entre los principales productos que generan residuos orgánicos están la caña, el arroz y la palma aceitera. Los derivados de estos productos y que se utilizan como fuente de energía son los siguientes:

Tabla 15. Características de las alternativas biomásicas seleccionadas

#	Producto	Combustible	Poder calórico superior (MJ/kg)	Poder calórico inferior (MJ/kg)	Humedad en base húmeda (%)	Densidad (kg/m ³)	Precio (\$/unidad)
1	Caña	Bagazo	17.50 ¹	13.80 ⁵	50.00 ¹	165.6 ⁸	19.90 \$/m ³ ¹
2	Café	Cascarilla de café	17.93 ¹	17.20 ⁶	11.00 ¹	274.70 ⁷	0.03 \$/kg
3	Palma aceitera	Fibra de mesocarpio	19.43 ¹	14.70 ⁷	37.00 ¹	71.30 ¹⁰	1.16 \$/ton ¹
4	Palma aceitera	Cascarilla de coquito	22.94 ¹	20.23 ¹⁰	17.00 ¹	497.00 ¹⁰	1.16 \$/ton ¹
5	Madera	Leña	19.29 ²	19.28 ²	25.56 ²	546.90 ²	15.59 \$/m ³
6	Madera	Aserrín	18.50 ¹	17.86 ⁹	32.00 ¹	167.00 ⁹	13.58 \$/m ³ ¹
7	Madera	Burucha	18.50 ¹	17.86 ⁹	33.00 ¹	26.67 ¹¹	24.53 \$/m ³ ¹
8	Arroz	Cascarilla de arroz	15.43 ¹	15.41 ³	13.00 ¹	100 ³	0.06 \$/kg ¹
9	Madera	Pellets	18.50 ⁴	16.50 ⁴	10.00 ⁴	650 ⁴	0.22 \$/kg

Fuente: EMA (2018)¹; Escuela de Ingeniería Química (2019)²; Acero Peñafiel y Rodríguez Alvarado (2011, p. 50)³; Pelletics (2021)⁴; Vivas Carmona et al. (2007, p. 172)⁵; Benavides (2014, p. 6)⁶; Coto Chinchilla (2013, p. 60)⁷; Martínez et al. (2014)⁸; Serret-Guash (2016)⁹; Paucar, s.f., p. 9)¹⁰; Fernández (2018, p. 66)¹¹; BCCR (2022)

La tabla anterior es la referencia para las alternativas biomásicas por analizar; cuenta con las propiedades necesarias para poder estimar el consumo de cada una de ellas y un costo referencial al adquirirlas, actualizado al 29 de marzo del 2022. La densidad es un valor importante para dimensionar el almacenamiento y el transporte del material, y al relacionar un eventual consumo por cosecha se pueden calcular estos valores.

13.9.3 Fuentes de combustible tradicionales (GLP, Búnker C, Electricidad)

Para el análisis de las fuentes tradicionales de combustibles para calderas, se van a tener en cuenta el búnker C, el Gas Licuado de Petróleo (GLP) y la electricidad. Para cada una se tendrán en cuenta las condiciones de poder calorífico, almacenamiento, peligrosidad e impacto ambiental por emisiones, todas las anteriores para el caso que aplique, y los costos de los combustibles se consideran al 29 de marzo del 2022. A continuación, se muestra información recopilada del GLP y Búnker C:

Tabla 16. Características GLP y Búnker C

Combustible	Poder calorífico (MJ/L)	Densidad (kg/m ³)	Temperatura inflamación (°C)	Temperatura almacenamiento (°C)	Volatilidad (°C)	Presión almacenamiento (atm)	Precio (\$/L)
GLP	48.00	535.2	-	-	0.26	2-10	0.44
Búnker C	41.50	982	93.7	60	-	-	0.62

Fuente: RECOPE (2022); BCCR (2022)

Para el caso de la electricidad, será relacionada la demanda de energía para el proceso con la que debería generar el equipo. Las condiciones en comparación con los demás combustibles varían, ya que el equipo es quien requiere de cierta capacidad para poder trabajar en la manera que se desea. En la tabla anterior se pueden comparar los poderes caloríficos y la densidad de los combustibles, para su eventual almacenamiento.

Desde el punto de vista ambiental, es posible contar con los siguientes indicadores, para poder cuantificar las emisiones de dióxido de carbono que generan estas alternativas (véanse los anexos 18 y 19), los cuales se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 17. Indicadores de emisiones de dióxido de carbono para combustibles comunes

Combustible	Factor emisión (kg CO₂/L)	Factor emisión (kg CO₂/kWh)
GLP	1.611	-
Búnker C	3.101	-
Electricidad	-	0.0282

Fuente: Instituto Meteorológico Nacional [IMN] (2021, pp. 2, 4)

Con los valores de la tabla anterior, es posible estimar el impacto ambiental generado al utilizar alguno de los combustibles, relacionando el consumo esperado con el indicador y obtener el estimado de CO₂ emitido al ambiente. Con este dato se puede estimar el inventario de gases de efecto invernadero que genera el proceso.

Para analizar el tema de disponibilidad, en el caso del búnker C y el GLP, RECOPE cuenta con un polducto (véase el anexo 22) que atraviesa el territorio nacional; en Cartago cuenta con la “Terminal El Alto” y es la que por cercanía a CoopeTarrazú podría ser utilizada como punto de distribución para estos combustibles. Al tomar como referencia el anexo 23, la distancia entre este punto y la cooperativa es de 45.8 km y, con base en esto, se tomarían en cuenta el costo por el transporte y un tiempo esperado para el transporte.

Para el caso de la electricidad, Coopesantos es quien se encarga de la distribución y generación de electricidad en la zona. Sería a quien se debe contactar para ver temas de capacidades de entrega de energía requerida en el beneficio, para el proceso de secado.

En cuanto a temas de peligrosidad, se deben considerar las recomendaciones y pautas que se pueden obtener de las hojas de seguridad para cada uno de los combustibles. Principalmente, se mencionan los peligros físicos que pueden causar en las personas y las condiciones que deben tenerse en el ambiente para su adecuada manipulación.

En cuanto a peligrosidad, se puede observar la simbología en el anexo 25 para el búnker, donde, entre los símbolos, se encuentran los siguientes: peligro para la salud, peligro grave para la salud, peligro para el medio ambiente. Para el GLP se tienen los siguientes: gas a presión, inflamable; en ambos casos puntos de partida para considerar su manipulación. Al manipular equipos eléctricos, se requiere de un profesional calificado que utilice el equipo y traje de protección de acuerdo con la potencia que deba operar.

13.9.4 Estimar consumo de combustible para cada opción

Para realizar el cálculo de los consumos de los combustibles, se consideró la demanda de energía máxima calculada (24,676,017.33 kJ/h) dividida por 10^3 para convertirla en MJ/h, tomando los valores de las tablas 15 y 16 (características de la biomasa y combustibles tradicionales) para los valores de poder calorífico inferior que se tienen en MJ/Unidad combustible. Al dividir la energía total por hora entre el poder calorífico inferior del combustible, da como resultado el consumo esperado por hora y, relacionando este valor con la densidad, se puede obtener un volumen aproximado del consumo en los combustibles biomásicos. A continuación, se muestran los resultados para los combustibles en estudio:

Tabla 18. Consumo estimado para cada alternativa de combustible según consumo energético estimado

#	Producto	Combustible	Consumo (kWh/h)	Consumo (kg/h)	Consumo (m ³ /h)	Consumo (L/h)
1	Caña	Bagazo	-	1,788.12	10.80	-
2	Café	Cascarilla de café	-	1,434.65	5.22	-
3	Palma aceitera	Fibra de mesocarpio	-	1,678.64	23.54	-
4	Palma aceitera	Cascarilla de coquito	-	1,219.77	2.45	-
5	Madera	Leña	-	1,279.88	2.34	-
6	Madera	Aserrín	-	1,381.64	8.27	-
7	Madera	Burucha	-	1,381.64	51.81	-
8	Arroz	Cascarilla de arroz	-	1,601.09	16.01	-
9	Madera	Pellets	-	1,495.52	2.30	-
10	Petróleo	Gas Licuado de Petróleo (GLP)	-	-	-	514.08
11	Petróleo	Búnker C	-	-	-	594.60
12	Electricidad	Electricidad	4,275.72	-	-	-

Fuente: Elaboración propia (2022)

La tabla anterior funciona como referencia para poder cuantificar consumos según el pronóstico para cada cosecha, la autonomía esperada según la capacidad en la cual se esté trabajando (ya sea en el máximo de producción o en los períodos bajos) y los espacios que se deben destinar a almacenamiento. Se calcula con base en el consumo energético actual; sin embargo, dependiendo de los componentes que se evalúen cambiar en los puntos siguientes, este consumo de energía puede disminuir al evaluar componentes con eficiencias mayores y evitar algunas pérdidas estimadas en los componentes actuales.

13.9.5 Calcular indicador de la huella de carbono para cada alternativa

Para el cálculo del indicador de la huella de carbono, se relacionan los consumos de combustible estimados por hora con los factores de emisión que se encuentran en los anexos 20 y 21 (resumidos en la tabla 17). Se considera 0 emisiones de carbono para la biomasa, ya que en su crecimiento las plantas absorben CO₂ y este se es equivalente con el que produce al quemarse, dando un resultado neutro para este tipo de combustibles y por lo cual no se calcula algún indicador. En la siguiente tabla se muestran los indicadores calculados:

Tabla 19. Emisiones de CO₂ estimadas por combustibles

Producto	Combustible	Consumo	Emisión (kg CO₂/h)
Petróleo	Gas Licuado de Petróleo (GLP)	514.08 L/h	828.19
Petróleo	Búnker C	594.60 L/h	1,843.86
Electricidad	Electricidad	4,275.72 kWh/h	120.58

Fuente: Elaboración propia (2022)

Según la tabla anterior, se pueda observar que la electricidad es el combustible que genera menores emisiones de CO₂. En Costa Rica, casi la totalidad de la energía producida viene de energías limpias; sin embargo, el factor utilizado hace referencia a las emisiones generadas por los usos que se la da a la electricidad, y es por esta razón que se cuantifica. Además, es un valor de comparación con los combustibles derivados del petróleo, y es evidente que las emisiones generadas van a ser menores.

Para generar un valor de comparación, se van a cuantificar las toneladas métricas para un tiempo de trabajo de 20 horas y considerando la operación total de los intercambiadores instalados. Este cálculo se desarrolla al multiplicar el indicador de emisión por el tiempo considerado; las toneladas de CO₂ serían las mostradas en la siguiente tabla:

Tabla 20. Toneladas métricas de CO₂ generadas en 20 horas de trabajo

Producto	Combustible	Tiempo (h)	Toneladas métricas (Ton CO₂)
Petróleo	Gas Licuado de Petróleo (GLP)	20	16.56
Petróleo	Búnker C	20	36.88
Electricidad	Electricidad	20	2.41

Fuente: Elaboración propia (2022)

Al utilizar la calculadora para equivalencias (EPA, 2022), es posible comparar las emisiones generadas con otro tipo de elementos más comunes, y tener una idea más clara de qué representa producir una tonelada métrica de CO₂. Enseguida, se muestra la comparación con el área de bosque necesaria para capturar el CO₂ generado de la tabla 20.

Tabla 21. Equivalencia bosque necesario para absorber CO₂ generado en 20 h de trabajo

Producto	Combustible	Acres (ac)	Hectáreas (ha)
Petróleo	Gas Licuado de Petróleo (GLP)	20.3	8.2
Petróleo	Búnker C	45.2	18.3
Electricidad	Electricidad	3	1.21

Fuente: Elaboración propia (2022), de acuerdo con datos de EPA (2022)

La tabla hace comparación del área de bosque necesaria para absorber el CO₂ generado en 20 horas de trabajo para cada una de las alternativas de biomasa, siendo el Búnker C el combustible que emite mayor cantidad de dióxido de carbono al medio y, por lo tanto, requiere una mayor área de bosque para poder absorber el generado durante el tiempo de operación.

13.9.6 Identificar las variantes que generaría cada una de las alternativas planteadas, técnicas y de implementación

Sistema y combustibles actuales para ambas calderas: leña, cascarilla de café

El sistema actual cuenta con ciertos componentes que hacen funcionar las calderas, y que cumple con los requerimientos solicitados en los reportes operacionales. Como la causa principal del estudio es la problemática con el abastecimiento de madera, este combustible debe dejarse de lado. En los siguientes párrafos se enumeran los equipos encontrados y que se relacionan con los procesos de combustión:

- **Caldera Wickes:**

1. Dos compartimentos para hornos:

En estos hornos se colocan unas placas metálicas, donde se acumulan las cenizas y el carbón generado de la combustión de madera y la cascarilla; es el punto más bajo de la caldera. Cada horno posee una compuerta, y los agujeros que se observan al fondo es por donde ingresa aire para colaborar con la combustión. Cuando está operando la caldera, el aire se hace ingresar desde la chimenea para que entre a alta temperatura; en estas imágenes se encontraban completamente limpios:



Ilustración 20. Hornos, Caldera Wickes

Fuente: Elaboración propia (2022)

2. Dos compuertas para alimentación de madera:

Cuando la caldera está en funcionamiento, se coloca una plataforma que queda por encima de las compuertas de los hornos; en esta se coloca la madera que se va a ingresar en la caldera, el operador se aproxima y es por estas compuertas que se hace entrar la madera en la caldera; al ingresarla cae directamente al horno.



Ilustración 21. Compartimientos alimentación de madera, Caldera Wickes

Fuente: Elaboración propia (2022)

3. Dos alimentadores de cascarilla de café:

Se tiene en el sitio un tanque para almacenar la cascarilla y mediante los tubos cuadrados se hace llegar al horno, la cascarilla cae por encima y el ingreso se da por medio de un sistema de tornillos sin fin; el flujo de la cascarilla se da con un control que regula la velocidad en los tornillos.



Ilustración 22. Alimentadores de cascarilla, Caldera Wickes

Fuente: Elaboración propia (2022)

4. Una tolva de almacenamiento de cascarilla y dos divisiones para las alimentaciones:

La tolva de almacenamiento se divide al final, para poder distribuir la cascarilla en las dos entradas que se conectan directamente con la caldera.



Ilustración 23. Tolva alimentación de cascarilla y divisiones, Caldera Wickes

Fuente: Elaboración propia (2022)

5. Hidrociclón:

El hidrociclón es conectado en la salida de humo previo a entrar en la chimenea, para remover partículas y disminuir la temperatura de salida al ambiente.

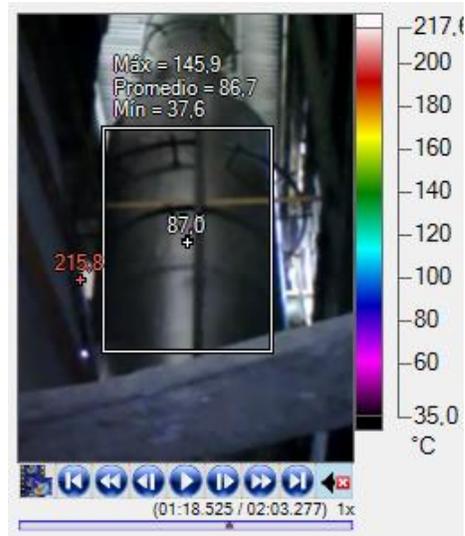


Ilustración 24. Hidrociclón, Caldera Wickes

Fuente: Elaboración propia (2022)

6. Chimenea:

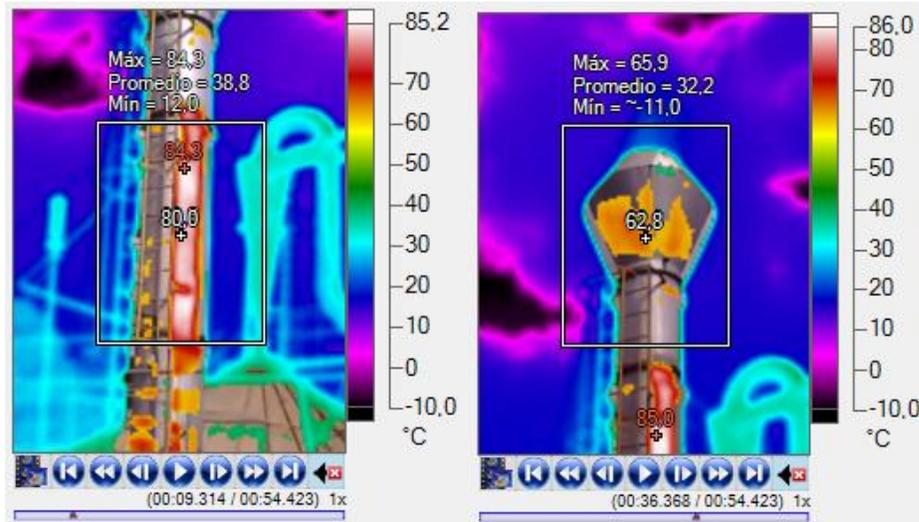


Ilustración 25. Chimenea, Caldera Wickes

Fuente: Elaboración propia (2022)

- **Caldera Lambda:**

1. Hogar y compuerta para alimentación de madera:

En esta caldera se ingresan trozos pequeños de madera y tablilla por la compuerta que se muestra en la imagen.

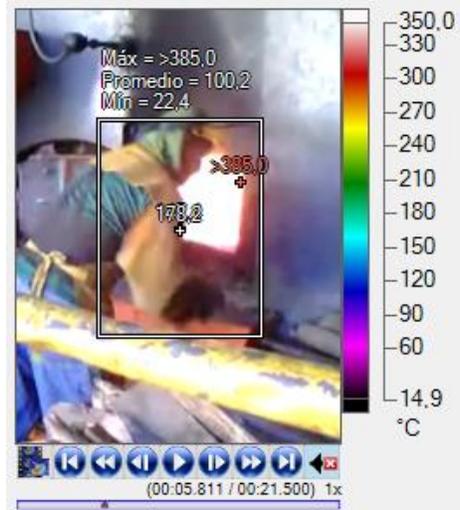


Ilustración 26. Hogar y compuerta de alimentación madera, Caldera Lambda

Fuente: Elaboración propia (2022)

2. Una tolva de almacenamiento de cascarilla y alimentación a caldera:

La tolva de almacenamiento se encuentra por encima de la caldera, cuenta con un control de velocidad manual que manipula el operador, y el transporte de esta se da por medio de tornillos sin fin.



Ilustración 27. Tolva de almacenamiento de cascarilla y alimentación a caldera, Caldera Lambda

Fuente: Elaboración propia (2022)

3. Hidrociclón:

El hidrociclón se encuentra entre la chimenea de salida de humo al ambiente y la chimenea de la caldera, retira las partículas y disminuye la temperatura de los gases.



Ilustración 28. Hidrociclón, Caldera Lambda

Fuente: Elaboración propia (2022)

4. Chimenea:

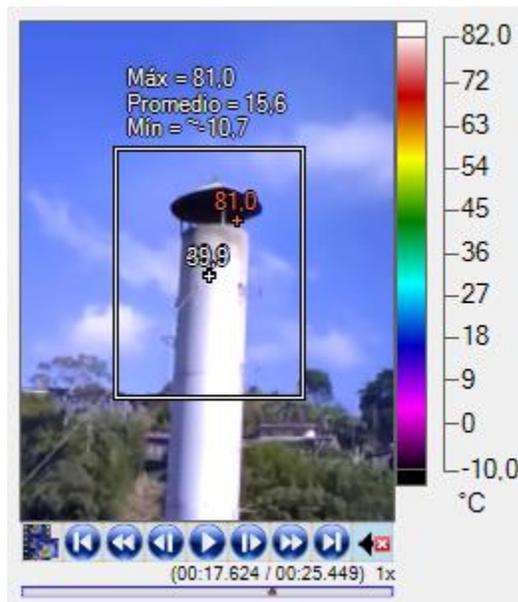


Ilustración 29. Chimenea, Caldera Lambda

Fuente: Elaboración propia (2022)

Los puntos mencionados anteriormente para cada una de las calderas son parte del sistema actual; se pretende mantener lo que se tiene y proponer alternativas que generen un menor impacto en el sistema. Para las propuestas biomásicas se van a trabajar bajo ciertos criterios; para discriminar algunas alternativas, las variables a considerar son las siguientes:

1. Indicador consumo por fanega procesada

Este indicador se calcula tomando un tiempo de trabajo óptimo de 20 horas, el procesamiento máximo de las guardiolas que suman 2670 fanegas y el consumo del combustible calculado por hora, esto de la siguiente manera:

$$\frac{kg}{ff} = \left(\frac{kg}{h_{Combustible}} \times 20 h \right) / 2670 ff$$

2. Costo por unidad de combustible

Los costos de combustible se recopilaron mediante investigación, y se tiene el valor para cada combustible según las unidades calculadas para consumos. Las conversiones realizadas son con base en la densidad de cada opción, por lo que se optó por convertir las unidades de costo en \$/m³.

3. Autonomía según disponibilidad

Los valores para la disponibilidad se tomaron de la tabla 13, donde se muestran los valores de excedentes que pueden ser utilizados como fuentes de energía. Para el caso de la cascarilla de café, la cooperativa produce este combustible y, de acuerdo con la tabla de conversiones del anexo 5, por cada fanega que se procesa se obtienen 10.9 kg de cascarilla que sería parte de la autonomía que puede manejarse. Como referencia se toma la cosecha 2020-2021, y el cálculo de la autonomía se hizo de la siguiente manera:

$$h = \frac{kg_{Excedente/Autonomía}}{\frac{kg}{h_{Combustible}}}$$

Los tres puntos mencionados anteriormente se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 22. Criterios para escogencia de fuentes biomásicas por evaluar

Producto	Combustible	Excedente (toneladas)	Consumo (kg/h)	Consumo (m ³ /h)	Indicador consumo por fanega (kg/ff)	Precio (\$/m ³)	Abastecimiento según excedente (horas)	Autonomía (horas cosecha 2020-2021)
Caña	Bagazo	100769.00	1788.12	10.80	13.39	19.90	56354.81	-
Café	Cascarilla de café	27.00	1434.65	5.22	10.75	8.39	18.82	1697.34
Palma aceitera	Fibra de mesocarpio	10184.00	1678.64	23.54	12.57	0.08	6066.81	-
Palma aceitera	Cascarilla de coquito	7834.00	1219.77	2.45	9.14	0.58	6422.50	-
Madera	Leña	215924.00	1279.88	2.34	9.59	15.59	168706.91	-
Madera	Aserrín	7694.00	1381.64	8.27	10.35	13.58	5568.76	-
Madera	Burucha	349.00	1381.64	51.81	10.35	24.53	252.60	-
Arroz	Cascarilla de arroz	44480.00	1601.09	16.01	11.99	6.13	27781.05	-

Fuente: Elaboración propia (2022)

De la tabla anterior, para las ocho alternativas, se van a priorizar por las tres variables de selección de mayor a menor según el criterio, en una escala del 1 al 8. Para el menor indicador de consumo se colocará el 8 y de manera descendente para las demás alternativas, lo mismo con el costo y de modo inverso para la autonomía, ya que un valor mayor hace referencia a disponibilidad del combustible. Esto se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 23. Priorización de combustibles biomásicos

Producto	Combustible	Indicador consumo por fanega (kg/ff)	Precio	Abastecimiento / Autonomía (horas)	Sumatoria
Madera	Burucha	5	2	1	8
Caña	Bagazo	1	1	6	8
Madera	Aserrín	6	4	2	12
Palma aceitera	Fibra de mesocarpio	2	8	3	13
Arroz	Cascarilla de arroz	3	6	5	14
Madera	Leña	7	3	7	17
Café	Cascarilla de café	4	5	8	17
Palma aceitera	Cascarilla de coquito	8	7	4	19

Nota: La cascarilla se le coloca la mayor ponderación para el abastecimiento, ya que es el único combustible que se deriva de los procesos de trillado de la cooperativa.

Fuente: Elaboración propia (2022)

Para la cascarilla de café se coloca el valor más alto para el abastecimiento, a pesar de no ser el mayor en horas de consumo, esto por ser un derivado de las actividades de la cooperativa (derivado del proceso de trillado, que es de donde se extrae la cáscara) y colaboraría en la autonomía del proceso. Como se mencionó anteriormente, por cada fanega procesada se produce un aproximado de 10.9 kg de cascarilla y, de acuerdo con el indicador de consumo, serían necesarios 10.75 kg de cascarilla para procesar una fanega, otra razón por la cual se le asigna ese valor.

Según los resultados, la leña sería la tercera opción por escoger; sin embargo, este combustible ha dado problemas con el abastecimiento para la cooperativa y es la razón por la que se buscan alternativas. Además, los precios son elevados en comparación con la cascarilla de café, la cascarilla de arroz y el coquito.

Por lo tanto, se van a analizar las primeras tres ponderaciones para las alternativas biomásicas, las cuales son las siguientes: cascarilla de café, cascarilla de coquito y cascarilla de arroz. Junto con los pellets (biomasa comercial), el Gas Licuado de Petróleo (GLP), el búnker C y la electricidad, se evaluarán los ajustes necesarios para que puedan operar en la cooperativa.

Las diferentes alternativas se van a trabajar en grupos, con el fin de describir variantes que funcionen en el sistema actual de generación de vapor, y las fuentes biomásicas provenientes de residuos agrícolas se mantienen en conjunto. Para los demás casos, se va a mantener un sistema dual de la alternativa de combustible con la cascarilla de café, al ser un subproducto del proceso de trillado que debe realizarse en el beneficio.

Para llevar a cabo lo que se menciona en el párrafo anterior, se toma el ejemplo de la empresa argentina American Burners, la cual realiza conversiones en calderas acoplando quemadores para diferentes tipos de combustibles (American Burners, 2022). Para las fuentes de biomasa utilizan los quemadores distribuidos por el fabricante Natural Fire; de los modelos de quemadores van a tomarse como referencia los que realiza esta empresa y se tienen disponibles en el sitio web (Natural Fire, 2022). Además, un representante de American Burners en Costa Rica es la empresa ALHESA, quien hace este tipo de trabajos y distribuye quemadores para biomasa y otro tipo de combustibles (ALHESA, 2022).

Los grupos se van a manejar de la siguiente manera:

Tabla 24. Grupos de combustibles para análisis de variantes

Grupo	Combustibles	Observaciones
1	Cascarilla de café, cascarilla de arroz y cascarilla de coquito	Incorporación quemadores biomasa en ambas calderas
2	Pellets y cascarilla de café	Incorporación quemadores biomasa en ambas calderas
3	Cascarilla de café y respaldo búnker C	Doble sistema de quemadores (biomasa y búnker) para hacer cambio
4	Cascarilla de café y respaldo GLP	Doble sistema de quemadores (biomasa y GLP) para hacer cambio
5	Electricidad y cascarilla de café	Incorporar quemador para caldera Lambda para cascarilla de café y sustituir caldera Wickes por eléctrica

Fuente: Elaboración propia (2022)

La tabla anterior será analizada en párrafos posteriores, donde se considere cada punto. Como parte importante para dimensionar los quemadores, se van a tabular los valores de placa y los consumos de energía estimados para cada una de ellas:

Tabla 25. Valores de placas y calculados para las calderas

Información placa	Caldera Wickes	Caldera Lambda
Evaporación máxima continua	-	5000 kg/h
Presión máxima de trabajo	14 kg/cm ²	8 kg/cm ²
Presión prueba hidráulica	-	15 kg/cm ²
Superficie de calefacción	241 m ²	150 m ²
Marca registrada Volumen	-	11 m ³
Año construcción	1958	1982
Clasificación (Reporte operacional)	B	B
Tipo	Acuatubular	Piro tubular
Valores calculados	-	-
Demanda de energía (kJ/h)	20,081,090.85	8,439,186.87
Demanda energía (kWh/h)	5,578.08	2,344.22
Demanda energía (BTU/h)	19,033,259.52	7,998,830.10
Demanda de vapor (kg/h)	9,163.59	3,851.05

Fuente: Elaboración propia (2022)

Las modificaciones y equipos que se requieren se comentan en los siguientes puntos:

Grupo 1 Residuos Biomásicos (Adaptación al sistema actual): Cascarilla de café, cascarilla de coquito, cascarilla de arroz

- Caldera Lambda:

Quemador: se requiere adaptar un quemador cuya potencia sea basada en la generación de vapor requerida para la caldera, esto según consumo de energía calculado para la caldera bajo las condiciones del manejo de energía actual en la empresa. El quemador debe ser capaz de quemar estos tres tipos de biomasa en caso de ser necesario, y se propone el siguiente modelo:

Tabla 26. Información de quemador para combustibles derivados de residuos biomásicos, caldera Lambda

Parámetro	Información
Marca	Natural Fire
Modelo	Modelo Y-2000
Potencia calórica	350-2500 kW
Tipo	Quemador de biomasa
Eficiencia	99%
Combustibles	3 tipos programables en quemador
Rango temperatura	0-1100 °C
Capacidad de adaptación	Sí

Fuente: Natural Fire (2022)

De acuerdo con la tabla anterior, este tipo de quemador es funcional para la caldera Lambda según la demanda energética calculada; además, cuenta con la opción de programar los tres tipos de combustibles propuestos para calcular el consumo del combustible. Según el diseño del fabricante, este puede acoplarse en la caldera y funcionar directamente desde la compuerta al horno, cuenta con un autómatas programable para el control de los parámetros (temperatura, alimentación de combustible, limpieza automática).

Abastecimiento de combustible: actualmente, la cascarilla de café es transportada desde los silos de almacenamiento hasta la tolva de almacenamiento previo a alimentación de la caldera, por medio de tornillo sin fin; desde ahí cae por gravedad hasta el fondo del tanque y se conecta a través del tubo corrugado, que da directamente con la alimentación hacia la caldera. La velocidad de transporte hasta la tolva se regula manualmente mediante perilla de ajuste; esto lo manipula el operador de la caldera, donde el ingreso de cascarilla en la caldera es regulado por medio de un sistema automático según la temperatura del horno.

El sistema pensado como propuesta es aprovechar la tolva de almacenamiento actual, colocarla en una posición más baja para que el tornillo sin fin de alimentación se pueda conectar desde el fondo y coincidir con el sistema del quemador. Como referencia, se puede analizar la siguiente ilustración para tener una idea clara de la propuesta:

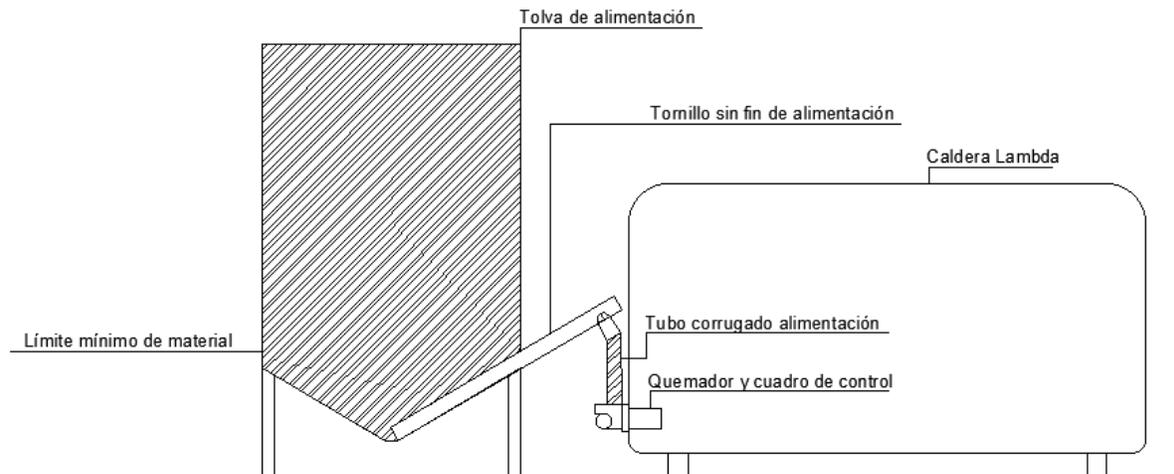


Ilustración 30. Imagen ilustrativa del sistema de alimentación propuesto para biomasa en caldera Lambda

Fuente: Elaboración propia (2022)

El consumo de combustible y el cálculo para la autonomía de la tolva de alimentación para las fuentes de biomasa se realiza de la siguiente manera:

$$\text{Consumo combustible} \left(\text{kg o m}^3 / \text{h} \right) = \frac{\text{Demanda Energía} \left(\text{MJ} / \text{h} \right)}{\text{PCI}_{\text{Combustible}} \left(\text{MJ} / \text{kg o m}^3 \right)}$$

$$\text{Autonomía}_{\text{Tolva alimentación}} (h) = \frac{\text{Capacidad tolva} \left(\text{m}^3 \right)}{\text{Consumo combustible} \left(\text{m}^3 / \text{h} \right)}$$

Fuente: (Gamboa, 2014, p. 63)

Se estiman los consumos máximos de combustible en caso de utilizar cada alternativa individualmente y el tiempo que tardaría en consumirse la tolva de almacenamiento (actualmente se cuenta con un flujo constante); la demanda energética se toma de la tabla 25 para la caldera Lambda. Las dimensiones aproximadas de la tolva de almacenamiento son las siguientes: 2.5 m x 1.2 m x 1.5 m (alto x ancho x largo), lo que equivale a 4.5 m³. La información se resume en la siguiente tabla:

Tabla 27. Consumo de combustibles biomásicos, caldera Lambda

Combustible	Poder calorífico Inferior (MJ/kg)	Consumo (kg/h)	Consumo (m³/h)	Autonomía (h)
Cascarilla de café	17.20	490.65	1.79	2.51
Cascarilla de coquito	20.23	417.16	0.84	5.36
Cascarilla de arroz	15.41	547.57	5.48	0.82

Fuente: Elaboración propia (2022)

De acuerdo con la autonomía de la tolva de alimentación, sería el tiempo de respuesta para atender algún inconveniente en el sistema de suministro actual. Para la cascarilla de coquito y la cascarilla de arroz, al ser combustibles que deben comprarse, debe evaluarse destinar un silo de almacenamiento que pueda dar una autonomía acorde con los tiempos de entrega del combustible. Es relevante recalcar que quemar la cascarilla del café tiene mayor importancia que utilizar las demás alternativas, ya que es un residuo derivado del proceso y que se almacenan sobrantes de la cosecha anterior.

- **Caldera Wickes:**

Quemadores: esta caldera cuenta con dos hornos, tal y como se muestra en la ilustración 20, en cada uno se pretende colocar un quemador de biomasa para alcanzar la energía requerida y utilizar ambos compartimientos. Al llevar a cabo entrevistas con el distribuidor de quemadores ALHESA, los quemadores se pueden realizar según las necesidades del cliente, razón por la cual es posible tener en cuenta esta alternativa. La necesidad es la siguiente:

Tabla 28. Información de quemador para combustibles derivados de residuos biomásicos, caldera Wickes

Parámetro	Información
Marca	Natural Fire
Modelo	Según requerimiento
Potencia calórica requerida	5600 kW (2800 kW c/u)
Cantidad	2
Tipo	Quemadores de biomasa
Eficiencia	-
Combustibles	3 tipos programables en quemador
Rango temperatura	0-1100 °C
Capacidad de adaptación	Sí

Fuente: Natural Fire (2022)

La capacidad calórica colocada es la que debe entregar el quemador para la demanda energética máxima; debe presentar las condiciones para ajustar los parámetros del combustible que se estén incorporando. A continuación, se muestra la opción para colocar los quemadores según la instalación actual:

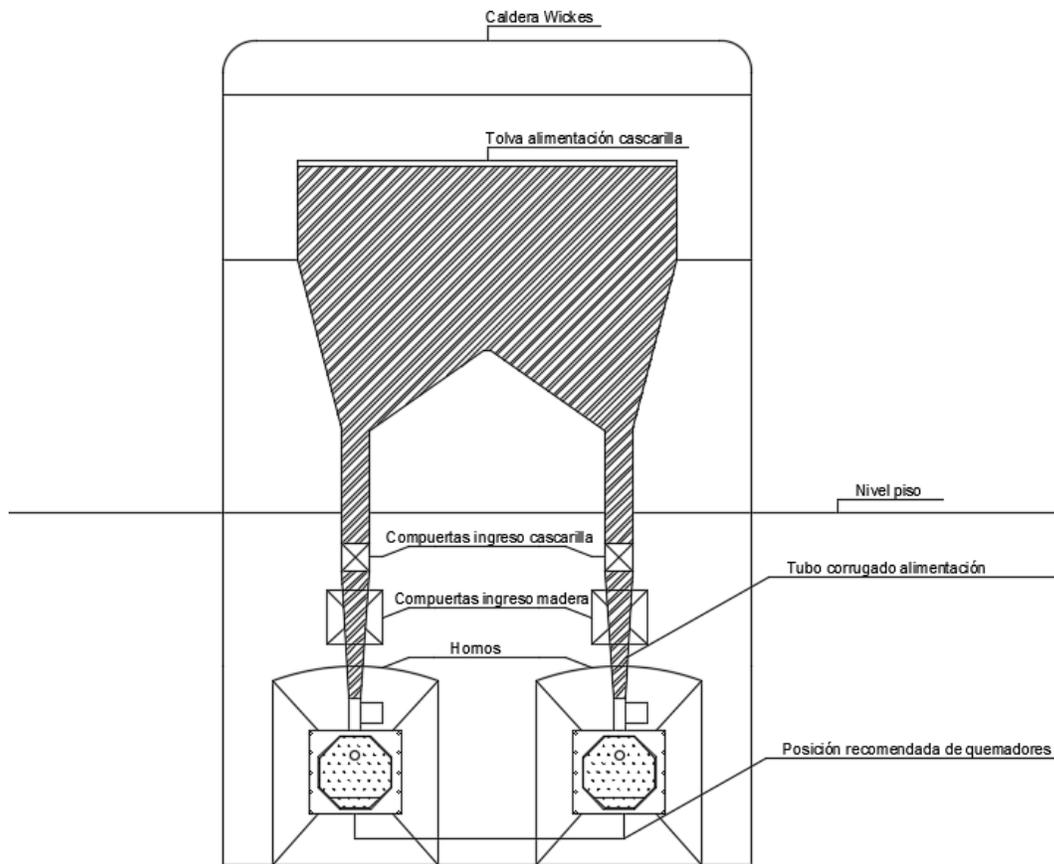


Ilustración 31. Imagen ilustrativa del sistema de alimentación propuesto para biomasa en caldera Wickes

Fuente: Elaboración propia (2022)

Abastecimiento de combustible: al igual que para el cálculo de consumo de combustibles, que se realizó para la caldera Lambda, se estima el consumo estimado para la caldera Wickes; la tolva de almacenamiento cuenta con las siguientes dimensiones aproximadamente: 4 m x 2 m x 2 m (largo x alto x ancho) = 16 m³. Según el consumo estimado para los combustibles, se muestra la autonomía con la cual contaría esta tolva de alimentación, al trabajar ambos quemadores a carga máxima:

Tabla 29. Consumo de combustibles biomásicos, caldera Wickes

Combustible	Poder calorífico Inferior (MJ/kg)	Consumo (kg/h)	Consumo (m³/h)	Autonomía (h)
Cascarilla de café	17.20	1167.51	4.25	3.76
Cascarilla de coquito	20.23	992.64	2.00	8.00
Cascarilla de arroz	15.41	1302.95	13.03	1.23

Fuente: Elaboración propia (2022)

Grupo 2 Biomasa comercial (Adaptación al sistema actual): Pellets y cascarilla de café

Para este caso se mantiene lo planteado en el grupo 1, las posiciones de los quemadores y los consumos de energía necesarios para el proceso. La única variante para el quemador es que en este caso serán propuestos dos tipos de combustible diferentes, para lo cual cumplen en ambas calderas. Los consumos para estos dos combustibles serían los siguientes para ambas calderas:

Tabla 30. Consumo cascarilla de café y pellets, ambas calderas

Caldera	Combustible	Poder calorífico Inferior (MJ/kg)	Consumo (kg/h)	Consumo (m³/h)	Autonomía (h)
Lambda	Cascarilla de café	17.20	490.65	1.79	2.51
	Pellets	16.50	511.47	0.79	5.70
Wickes	Cascarilla de café	17.20	1167.51	4.25	3.76
	Pellets	16.50	1217.04	1.87	8.56

Fuente: Elaboración propia (2022)

De acuerdo con el punto para la autonomía de los combustibles, es interesante observar el comportamiento de la autonomía para las tolvas de almacenamiento al utilizar pellets, la cual es una fuente de biomasa comercial. La característica al realizar este producto principalmente es la compresión, lo que genera una densidad mayor a la de las fuentes biomásicas y se requiera un menor consumo de m³ por hora. Al pensar en el almacenamiento esta es una gran ventaja, ya que se deben destinar menores espacios para este fin.

Grupo 3 Derivados del petróleo y biomasa (Adaptación al sistema actual): Cascarilla de café y búnker C

Para este caso se requieren dos tipos de sistemas, tanto para los quemadores (quemador de biomasa y quemador de búnker) e incorporar un sistema de almacenamiento de búnker. La propuesta es plantear como combustible principal la cascarilla de café y mantener el sistema de búnker como respaldo, casos en los que no se cuente con cascarilla o algún fallo en la distribución de este combustible.

Al igual que en los dos grupos anteriores, la energía requerida para el proceso es la misma, las condiciones del quemador de cascarilla de café se mantienen para ambas calderas, al igual que en el grupo dos. Por lo tanto, sería necesario contar con la adaptación para realizar el cambio a búnker en caso de ser necesario; para esto se requiere el sistema de almacenamiento y distribución de búnker hasta el punto donde lo requieren las calderas.

- **Quemador de búnker, ambas calderas:**

El quemador de búnker propuesto cuenta con las siguientes características:

Tabla 31. Información quemador búnker

Parámetro	Información
Distribuidor	ALHESA
Modelo	Tipo C
Rango de capacidad	98 000 - 19 000 100 BTU/h (103 395.16– 20 046 105.80 kJ/h)
Cantidad	3 (1 Lambda, 2 Wickes)
Tipo	Quemador de búnker
Capacidad de adaptación	Sí

Fuente: ALHESA (2022)

El rango de capacidades se puede adaptar a lo que necesitan las calderas, razón por la cual es funcional este modelo; además, debe presentar compatibilidad con el modelo para quemar biomasa para poder realizar el cambio en la misma posición.

- **Abastecimiento de búnker:** para esta opción, debe instalarse un tanque de almacenamiento de búnker con capacidad para entregarlo a ambas calderas. El consumo de combustible en períodos máximos de producción sería el siguiente:

Tabla 32. Consumo de búnker C en ambas calderas

Caldera	Combustible	Poder calorífico (MJ/L)	Consumo (L/h)	Consumo (m³/h)
Lambda	Búnker C	41.50	203.35	0.21
Wickes			483.88	0.49
Total			687.23	0.7

Fuente: Elaboración propia (2022)

Para calcular la autonomía necesaria se van a considerar los siguientes puntos: jornada de 24 horas de lunes a viernes y 12 horas el sábado (132 horas), se van a tomar en cuenta dos tanques de almacenamiento que deben contar con un mínimo de 30 m³ (30000 litros), con base en consultas realizadas para el posible abastecimiento de camiones cisterna. La autonomía sería la siguiente:

Tabla 33. Autonomía consumo de búnker por caldera

Caldera	Consumo (L/semana)	Autonomía (Relleno por semana)
Lambda	26842.20	0.45
Wickes	63872.16	1.05
	Total	1.50

Fuente: Elaboración propia (2022)

Al trabajar a carga completa en una semana, se deberían solicitar 1.5 recargas de combustible (una recarga completa por semana), esto dejando de lado el uso de la cascarilla de café por completo, en caso de tener problemas de abastecimiento y en los sistemas instalados. El sistema de almacenamiento de búnker requiere de los siguientes elementos básicos para su funcionamiento: sistema de bombeo de combustible, tuberías de alimentación, sistema de calentamiento del búnker, tanque de almacenamiento, válvulas reguladoras y de distribución, medidores de nivel del tanque, acoples a quemador.

Grupo 4 Derivados del petróleo y biomasa (Adaptación al sistema actual): Cascarilla de café y GLP

De acuerdo con el orden con que se ha venido trabajando para los grupos de combustible, se realiza la propuesta del quemador para Gas Licuado de Petróleo (GLP), que está bajo el mismo objetivo, donde se plantea un quemador de búnker como respaldo para el funcionamiento del sistema de alimentación de cascarilla de café. Las posiciones propuestas se mantienen para este tipo de quemador y, para el caso de la cascarilla de café, se mantienen las condiciones de los quemadores de biomasa propuestos en los grupos anteriores.

- **Quemador de GLP, ambas calderas:** para adaptar quemadores de GLP a calderas existen varias opciones. Se propone el siguiente quemador que se adapta al rango de energía necesario:

Tabla 34. Información quemador Gas Licuado de Petróleo (GLP)

Parámetro	Información
Distribuidor	ALHESA
Modelo	Tipo C
Rango de capacidad	98 000 - 19 000 100 BTU/h (103 395.16– 20 046 105.80 kJ/h)
Cantidad	3 (1 Lambda, 2 Wickes)
Tipo	Quemador de GLP
Capacidad de adaptación	Sí

Fuente: ALHESA (2022)

- **Abastecimiento de GLP:**

El consumo de GLP estimado sería el siguiente:

Tabla 35. Consumo de Gas Licuado de Petróleo (GLP) en ambas calderas

Caldera	Combustible	PC (MJ/L)	Consumo (L/h)	Consumo (m ³ /h)
Lambda	Gas Licuado de Petróleo (GLP)	41.50	175.82	0.33
Wickes			418.33	0.78
		Total	594.15	1.11

Fuente: Elaboración propia (2022)

Para el cálculo de la autonomía de combustible, se van a trabajar dos baterías de tanques para almacenamiento de 500 galones (1892.71 litros) cada uno; cada batería será de seis tanques (3000 galones-11356.26 litros), para un total de 6000 galones (22712.52 litros), esto según consultas realizadas a la empresa Gas Sánchez sobre capacidad para tanques de almacenamiento de GLP (Gas Sánchez, 2022); la jornada de trabajo semanal se considera de 132 horas por semana en los períodos pico de producción. La autonomía calculada sería la siguiente:

Tabla 36. Autonomía consumo de Gas Licuado de Petróleo (GLP) por caldera

Caldera	Consumo (L/semana)	Autonomía (Relleno por semana)
Lambda	23208.24	1.02
Wickes	55219.56	2.43
	Total	3.45

Fuente: Elaboración propia (2022)

Según los cálculos y el sistema de almacenamiento mencionado, sería necesario un suministro constante en los períodos pico de producción, y sería necesario trabajar con este combustible. Para instalar un sistema de suministro de gas se requieren los siguientes componentes: tanques de almacenamiento de gas, válvula reguladora primera etapa, válvula antisísmica, válvula solenoide, regulador de segunda etapa, válvula de bola, tuberías de distribución del gas.

Grupo 5 Electricidad y cascarilla de café (Sistema nuevo y adaptación):

Incorporación de quemador en caldera Lambda y sustitución caldera Wickes por eléctrica

Con esta opción, se pretende mantener la caldera Lambda para que pueda quemar la cascarilla de café, que siempre se genera, para poder consumirla durante la cosecha y que trabaje en los tiempos donde se tenga una producción manejable (alrededor de 15 intercambiadores de calor trabajando). También, al eliminar la caldera Wickes, se despeja un área aproximada de al menos 50 m², ya que sería eliminado el espacio de la caldera, más lo que cubre la chimenea y el hidrociclón que se encuentra cerca.

El quemador recomendado para la caldera Lambda se mantiene, al igual que en los demás grupos. Para la caldera eléctrica se va a recalcular el consumo energético, al no contar con algunas pérdidas relacionadas con la caldera actual, y el cálculo se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 37. Consumo energético estimado para caldera eléctrica

# Parámetro	Descripción	Unidad	Valor estimado
1	Carga intercambiadores	kJ/h	14,711,235.30
2	Pérdida tuberías y accesorios	kJ/h	243,975.26
3	Pérdida retorno condensado	kJ/h	284,994.81
4	Pérdida eficiencia caldera eléctrica 99% (cálculo para toda la demanda)	kJ/h	152,402.05
-	Demanda de energía TOTAL	kJ/h	15,392,607.42
		kWh/h	4,275.72
5	Pérdida chimenea caldera Wickes	kJ/h	-1,467,321.68
6	Pérdida transferencia caldera Wickes	kJ/h	- 13,468.20
7	Pérdida eficiencia caldera Wickes (cálculo para toda la demanda)	kJ/h	-3,360,095.59
-	Pérdidas excluidas (kJ/h)	kJ/h	4,840,885.47

Fuente: Elaboración propia (2022)

Para estimar los cálculos mostrados en la tabla anterior, fue utilizada la “Tabla 11: Descripción de parámetros calculados para demanda total de energía” (apartado de presentación y análisis de resultados); sobre el cálculo de la demanda energética total del proceso, se consideraron los puntos relacionados con la caldera Wickes. En la actualidad, existen equipos eléctricos con altas eficiencias en el mercado que llegan hasta el 99% en su mayoría, por lo que se utiliza este valor para estimar las pérdidas por eficiencia.

Según los cálculos, se requiere una caldera eléctrica con la capacidad de entregar 4.3 MWh/h en su máxima demanda de energía; esto representa las siguientes equivalencias:

Tabla 38. Consumo energético caldera eléctrica

Equipo	Consumo energético
Caldera eléctrica	15,392,607.43 kJ/h
	7,024.10 kg vapor/h
	4,275.72 kWh/h
	14,589,421.18 BTU/h

Fuente: Elaboración propia (2022)

Para dimensionar el consumo energético, al igual que con las opciones de búnker y GLP, se utiliza también un tiempo de 132 horas, lo que representa un consumo de energía eléctrica por semana de 564,395.04 kWh. Esta caldera eléctrica requiere la instalación de un sistema completamente nuevo en la cooperativa, por lo que irá en relación con el dispositivo que se opte por adquirir. \

Como referencia, se utiliza la siguiente caldera eléctrica, de acuerdo con la ficha técnica de características:

Tabla 39. Información caldera eléctrica

Parámetro	Información
Distribuidor	ATTSU
Modelo	GE-8500
Producción vapor	7,455 kg/h
Capacidad térmica	4800 kW
Tipo	Eléctrica

Fuente: ATTSU (2022)

Según lo mencionado para cada uno de los grupos, se deben manejar como proyectos de implementación y tener una clara comunicación con los proveedores seleccionados. Para estos se deben tener etapas y puntos donde se revisen las propuestas, se tomen decisiones de implementación según el proyecto seleccionado y una idea de los pasos a seguir para dividirlos en tareas. Se presenta el siguiente diagrama a modo de resumen para los grupos realizados:

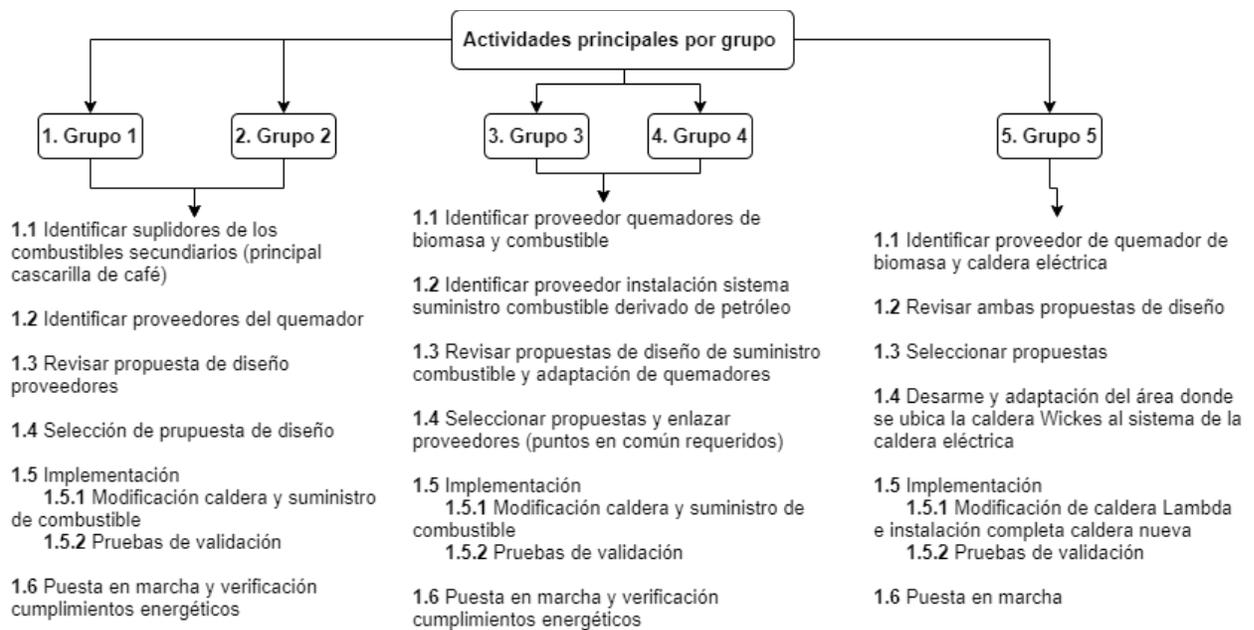


Ilustración 32. Actividades principales por grupo

Fuente: Elaboración propia (2022)

Con lo anterior, al tener identificadas las actividades principales que se requieren para cada grupo, se debe estimar un tiempo de implementación, definiendo los grupos que manejan situaciones similares que se pueden analizar en conjunto, pues los estudios de implementación por los proveedores llevan procesos de adaptación similares. Por ejemplo, con los grupos 1 y 2, que hacen referencia a adaptaciones de quemadores biomásicos, se deben realizar pasos similares y las adaptaciones, en cuanto a alimentación del combustible, cuentan con las mismas condiciones.

Para el grupo 3 y 4 se requiere instalar un sistema nuevo para el suministro de combustible y los quemadores de biomasa, junto con la adaptación para poder hacer el cambio de los quemadores, para trabajar ya sea con gas o búnker. Además, la relación con las tuberías que alimentan el combustible a los quemadores debe contar con la capacidad de adaptarse al cambio, quedando ambas posibilidades de manera individual para cada quemador.

Para el grupo 5, como se trata de un ajuste en el sistema, se debe tener en cuenta la adaptación del quemador en la caldera Lambda y el cambio total de la caldera Wickes, por lo que es importante tener en cuenta el tiempo para el desmantelamiento de la caldera y los sistemas relacionados.

13.9.7 Estudio económico para las alternativas planteadas que abarque un rango de 10 cosechas y muestre cuál alternativa generaría mayor rentabilidad ante una eventual implementación

Para el tratamiento del análisis económico, se propone analizar los principales indicadores, que son el VAN (Valor Actual Neto del proyecto), la TIR (Tasa Interna de Retorno) y el PR (Período de Recuperación). Esto se va a realizar para cada grupo mencionado en el punto anterior, y se resumirá la información para incluirse en la tabla comparativa para la selección del proyecto.

La producción de café se contabiliza mediante cosechas, estas siempre relacionan el año de inicio de la cosecha con el año que termina; por esto el análisis será considerado para las próximas 10 cosechas, ya que el consumo de los combustibles se manejaría según esto. Por ejemplo, la cosecha siguiente pertenece al año 2022-2023, por lo que será de esta manera la escala de tiempo a utilizar para el análisis económico.

Se tendrán en cuenta los precios de cada combustible, según la investigación, para realizar la proyección según el consumo esperado. Para esto será utilizado el indicador propuesto de consumo por fanega procesada (estimar consumo combustible) y los precios por unidad para cada uno, teniendo así la comparación en las mismas unidades. Para el caso de la electricidad, se considera el consumo energético de la fecha con máxima demanda, con valores brindados por la empresa, el cual es de febrero del año 2022. Para el cálculo se considera la sumatoria de los tres periodos (punta, valle y nocturno) facturados por energía y consumo por hora, dividido entre el total de kWh consumidos, y se convierte este monto a dólares, tomando el precio en \$/kWh para estimar montos totales.

Los indicadores para los combustibles, que serán evaluados en los cinco grupos, son los siguientes:

Tabla 40. Consumo y precio de combustibles por evaluar

Producto	Combustible	Indicador consumo por fanega		Precio
Café	Cascarilla de café	10.75 kg/ff	0.04 m ³ /ff	8.39 \$/m ³
Palma aceitera	Cascarilla de coquito	9.14 kg/ff	0.02 m ³ /ff	0.58 \$/m ³
Arroz	Cascarilla de arroz	11.99 kg/ff	0.12 m ³ /ff	6.13 \$/m ³
Madera	Pellets	11.20 kg/ff	0.02 m ³ /ff	144.71 \$/m ³
Petróleo	Gas Licuado de Petróleo (GLP)	3.85 L/ff		0.44 \$/L
Petróleo	Búnker C	4.45 L/ff		0.62 \$/L
Electricidad	Electricidad	32.03 kWh/ff		18.04 \$/kWh ¹

Fuente: Elaboración propia (2022), de acuerdo con históricos de consumo eléctrico de la empresa (2018 en adelante)

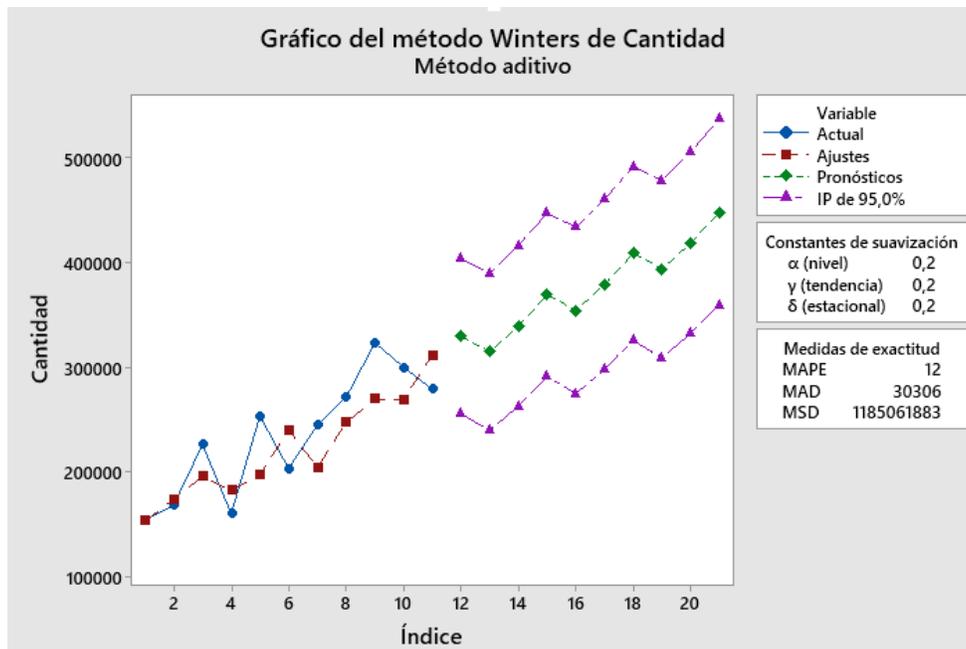
Con base en la información de las cosechas registradas para el Beneficio Central en CoopeTarrazú (véase el gráfico 2), se tienen los siguientes datos y la estimación del consumo por cosecha para los combustibles actuales. Con estos valores se pretende referenciar los posibles consumos para cada uno de ellos; sin embargo, para el tratamiento por grupo de trabajo se considerarán ciertos parámetros para el cálculo de consumo de combustible:

Tabla 41. Consumos promedio combustible según histórico de cosechas

Combustible	Consumo 2018-2019	Consumo 2019-2020	Consumo 2020-2021	Consumo 2021-2022	Consumo promedio
Cascarilla de café	8456.37 m ³	8364.40 m ³	8739.70 m ³	7825.64 m ³	8520.16 m ³
Cascarilla de coquito	3973.92 m ³	3930.70 m ³	4107.06 m ³	3677.52 m ³	4003.89 m ³
Cascarilla de arroz	25924.60 m ³	25642.65 m ³	26793.20 m ³	23990.99 m ³	26120.15 m ³
Pellets	3725.41 m ³	3684.89 m ³	3850.23 m ³	3447.54 m ³	3753.51 m ³
Gas Licuado de Petróleo (GLP)	832,395.85 L	823,342.89 L	860,285.06 L	770,310.67 L	838,674.60 L
Búnker C	962,771.10 L	952,300.21 L	995,028.50 L	890,961.74 L	970,033.27 L
Electricidad	6,923,182.30 kWh	6,847,887.28 kWh	7,155,141.79 kWh	6,406,809.01 kWh	6,975,403.79 kWh

Fuente: Elaboración propia (2022)

Para las siguientes 10 cosechas, se pretende estimar el comportamiento con los datos que se tienen desde el 2018 a la fecha, utilizando el método de regresión lineal. Los estimados para las cosechas serán utilizados para la conversión de consumo de combustibles por medio del indicador, los mismos se colocarán para el estudio económico; para esto será utilizado el software Minitab, a través del método estadístico para el análisis de tendencia de las series de tiempo. El método utilizado es Winters, con un análisis de estaciones de tres cosechas; el historial de fanegas considerado es el general de la cooperativa, ya que cuenta con más valores para el análisis, y es el que se muestra a continuación:



	Cosecha	Cantidad
1	2011-2012	153548
2	2012-2013	168001
3	2013-2014	225775
4	2014-2015	159814
5	2015-2016	252985
6	2016-2017	202895
7	2017-2018	244867
8	2018-2019	271010
9	2019-2020	322900
10	2020-2021	299613
11	2021-2022	278525

Pronósticos			
Período	Pronóstico	Inferior	Superior
12	329169	254920	403417
13	314341	238929	389753
14	339203	262494	415913
15	368796	290662	446929
16	353967	274290	433645
17	378830	297495	460166
18	408423	325323	491523
19	393594	308630	478559
20	418457	331535	505380
21	448050	359081	537018

Ilustración 33. Pronóstico cosechas, método estadístico Winters

Fuente: Elaboración propia (2022)

El método Winters fue el seleccionado, debido a que se ajusta a series de tiempo con comportamientos similares. Para el gráfico del proceso actual se observan patrones variables con tendencia creciente y se repite con más frecuencia cada tres rangos de valores. Dos cosechas son intermedias y una tiende a subir, siempre manteniendo el valor creciente en los valores. Se va a trabajar con el rango inferior del pronóstico, ya que el pronóstico calculado es mucho mayor a la mejor cosecha recibida según el historial, y el rango menor es el que se acerca a la realidad y mantiene el comportamiento mencionado anteriormente. Además, el error

porcentual absoluto medio (MAPE) es de un 12%, lo que se considera un error bajo para la variabilidad presente en los datos.

El Beneficio Central procesa una parte del total de fanegas que se reciben en la cooperativa. Para el pronóstico de consumos de combustible asociados al indicador se va a considerar el porcentaje promedio de fanegas del total que se ha trabajado en el beneficio a partir de la cosecha 2018-2019. Con esto, se generarían el pronóstico de fanegas que trabajaría el beneficio y el consumo de combustible estimado para el análisis económico. En la siguiente tabla se muestran los porcentajes calculados y el porcentaje promedio:

Tabla 42. Porcentaje promedio de fanegas recibidas en Beneficio Central

Cosecha	Cantidad fanegas recibidas en Beneficio Central	Total de fanegas recibidas en la cooperativa	% recibido en Beneficio Central
2018-2019	216161.00	271010.40	80 %
2019-2020	213810.08	322900.10	66 %
2020-2021	223403.42	299613.00	75 %
2021-2022	200038.39	278525.00	72 %
		% promedio	73 %

Fuente: Elaboración propia (2022)

De acuerdo con lo que se resumen en la tabla anterior, el porcentaje promedio de la cosecha que ha manejado el beneficio es de un 73% del total que recibe la cooperativa; con este valor se va a trabajar para el pronóstico realizado multiplicando este porcentaje para cada cosecha. Esto se resume en la siguiente tabla, y es con base en este pronóstico que será estimado el consumo de combustibles:

Tabla 43. Pronóstico de fanegas Beneficio Central

Cosecha	Fanegas
2022-2023	186321.87
2023-2024	174633.99
2024-2025	191857.73
2025-2026	212445.81
2026-2027	200479.46
2027-2028	217440.07
2028-2029	237779.65
2029-2030	225578.68
2030-2031	242320.02
2031-2032	262453.48

Fuente: Elaboración propia (2022)

Por medio del indicador de consumo de combustible por fanega, se estimarían estos consumos para calcular el total requerido y los posibles costos por este. A continuación, se muestra la proyección del consumo para cada una de las alternativas:

Tabla 44. Pronóstico consumo de combustibles próximas 10 cosechas

Combustible	Pronóstico consumo de combustibles									
	2022-2023	2023-2024	2024-2025	2025-2026	2026-2027	2027-2028	2028-2029	2029-2030	2030-2031	2031-2032
Cascarilla de café (m³)	7289.04	6831.81	7505.61	8311.03	7842.90	8506.41	9302.11	8824.80	9479.73	10267.37
Cascarilla de coquito (m³)	3425.35	3210.48	3527.12	3905.62	3685.63	3997.43	4371.36	4147.05	4454.83	4824.96
Cascarilla de arroz (m³)	22345.94	20944.19	23009.87	25479.03	24043.89	26078.01	28517.37	27054.09	29061.91	31476.55
Pellets (m³)	3211.15	3009.71	3306.56	3661.38	3455.15	3747.45	4097.99	3887.72	4176.24	4523.23
Gas licuado de petróleo (L)	717,490.88	672,483.05	738,808.46	818,089.34	772,009.16	837,321.32	915,645.25	868,661.58	933,129.37	1,010,659.59
Búnker C (L)	829,868.97	777,811.72	854,525.44	946,223.82	892,926.25	968,468.03	1,059,059.56	1,004,717.01	1,079,282.17	1,168,955.67
Electricidad (kWh)	5,967,497.56	5,593,159.52	6,144,799.56	6,804,192.59	6,420,935.61	6,964,148.31	7,615,582.18	7,224,810.81	7,761,000.72	8,405,833.17

Fuente: Elaboración propia (2022)

En la inversión inicial se tendrán en cuenta los principales componentes del sistema, que se resumen de la siguiente manera:

Grupo 1: Cascarilla arroz, café y coquito

1. Un sistema quemador para tres combustibles biomásicos, modelo Y-2000.
2. Dos sistemas quemadores para tres combustibles biomásicos, con capacidad de 2800kW cada uno.
3. Modificación del sistema actual alimentación combustibles.

Grupo 2: Pellets y cascarilla de café

1. Un sistema quemador para dos combustibles biomásicos, modelo Y-2000.
2. Dos sistemas quemadores para dos combustibles biomásicos, con capacidad de 2800kW cada uno.
3. Dos sistemas de alimentación de pellets.

Grupo 3: Cascarilla de café y respaldo búnker C

1. Un sistema quemador para dos combustibles biomásicos, modelo Y-2000.
2. Dos sistemas quemadores para dos combustibles biomásicos, con capacidad de 2800kW cada uno.
3. Tres sistemas quemadores de búnker, modelo Tipo C.
4. Sistema de almacenamiento de combustible, tanque 30 m³.

Grupo 4: Cascarilla de café y respaldo GLP

1. Un sistema quemador para un combustible biomásico, modelo Y-2000.
2. Dos sistemas quemadores para un combustible biomásico, con capacidad de 2800kW cada uno.
3. Tres sistemas quemadores de Gas Licuado de Petróleo (GLP), modelo Tipo C.
4. Dos tanques de almacenamiento de combustible, para 500 galones.

Grupo 5: Electricidad y cascarilla de café

1. Un sistema quemador para un combustible biomásico, modelo Y-2000.
2. Caldera eléctrica, con capacidad mínima requerida de 4,275.72 kWh/h.

Para la depreciación, se considerarán los porcentajes que se deprecian anualmente y el tiempo de vida útil establecidos según los reglamentos vigentes. Los que se van a tomar en cuenta son los que se muestran a continuación, de acuerdo con las inversiones iniciales propuestas para cada grupo:

Tabla 45. Supuestos para valoración de la depreciación

Bien o actividad	% anual depreciación	Años de vida útil
Calderas y accesorios	7	15
Quemadores	7	15
Tanques (todo tipo)	7	15

Fuente: Procuraduría General de la República (2009)

Al tomar como referencia el punto anterior, se aplica a cada equipo cotizado el método de depreciación por medio de la línea recta; el tiempo considerado para el análisis será de 10 años en relación con la propuesta del análisis económico. Esto se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 46. Depreciación de equipos

GRUPO	Cantidad	Descripción	Valor	Años	Valor residual	DLR
GRUPO 1	1	Sistema quemador modelo Y-2000, tres combustibles biomásicos	\$ 95,767.50	10	\$ 28,730.25	\$ 6,703.73
	2	Sistema quemador 2800 kW, tres combustibles biomásicos	\$ 268,149.00	10	\$ 80,444.70	\$ 18,770.43
GRUPO 2	1	Sistema quemador modelo Y-2000, dos combustibles biomásicos	\$ 95,767.50	10	\$ 28,730.25	\$ 6,703.73
	2	Sistema quemador 2800 kW, dos combustibles biomásicos	\$ 268,149.00	10	\$ 80,444.70	\$ 18,770.43
GRUPO 3	1	Sistema quemador modelo Y-2000, tres combustibles biomásicos	\$ 95,767.50	10	\$ 28,730.25	\$ 6,703.73
	2	Sistema quemador 2800 kW, dos combustibles biomásicos	\$ 268,149.00	10	\$ 80,444.70	\$ 18,770.43
	3	Sistema quemador modelo Tipo C, combustible búnker	\$ 57,120.00	10	\$ 17,136.00	\$ 3,998.40
	2	Tanque almacenamiento búnker 30 m ³	\$43,295.99	10	\$12,988.80	\$3,030.72
GRUPO 4	1	Sistema quemador modelo Y-2000, un combustible biomásico	\$ 95,767.50	10	\$ 28,730.25	\$ 6,703.73
	2	Sistema quemador 2800 kW, un combustible biomásico	\$ 268,149.00	10	\$ 80,444.70	\$ 18,770.43
	3	Sistema quemador modelo Tipo C, combustible Gas Licuado de Petróleo (GLP)	\$ 57,120.00	10	\$ 17,136.00	\$ 3,998.40
	2	Tanque almacenamiento GLP 500 galones	\$96,393.97	10	\$28,918.19	\$6,747.58
GRUPO 5	1	Sistema quemador modelo Y-2000, un combustible biomásico	\$ 95,767.50	10	\$ 28,730.25	\$ 6,703.73
	1	Caldera eléctrica modelo GE-8500	\$ 748,800.00	10	\$ 224,640.00	\$ 52,416.00

Fuente: Elaboración propia (2022)

De la tabla anterior, la línea que tiene el encabezado "DLR" indica el monto anual en el que se deprecia cada uno de los equipos. Este valor se disminuye en el flujo de efectivo estimado, ya que es dinero invertido inicialmente y que va perdiendo valor a lo largo del proyecto.

13.9.8 Definir variables a evaluar para la selección del combustible

Para la selección del grupo de combustibles planteado, se van a considerar variables que se han trabajado a lo largo del documento, donde se realice una comparación para cada caso y sea posible justificar su escogencia. A continuación, se va a realizar una breve descripción del por qué se consideran estas variables, las mismas influyen en cada uno de los grupos seleccionados:

- Indicador de consumo de combustible: para este caso se tomará en cuenta el indicador de consumo de combustible y el costo de este, relacionando ambos indicadores y teniendo las dos variables a partir de esta (**Unidad consumo/ff** multiplicado por **Costo Combustible/Unidad de consumo**, donde queda **Costo Combustible/ff**). Esto se va a ser utilizado para cada uno de los grupos realizados.
- Emisiones de CO₂: las emisiones de CO₂ fueron calculadas solamente para los combustibles derivados del petróleo y la electricidad, serán consideradas en el grupo que aplique, por lo que solo para este caso serán tomados tal cual se calcularon, considerando el indicador en **kg CO₂/h**.
- Indicadores económicos: los indicadores económicos para tomar en cuenta serán el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Período de Recuperación (PR). Todos estos indicadores fueron calculados para cada uno de los grupos, por lo que se tendrá con claridad el valor obtenido para cada proyecto. Además, en ellos se incluye lo esperado para alguna eventual inversión inicial, por lo que el impacto en los cambios de mayor peso se verá reflejados en este punto.

Lo anterior será colocado en la matriz de selección multicriterio, y el grupo o proyecto con mayor ponderación será el escogido.

13.9.9 Establecer una matriz de selección para combustible propuesto

Como se mencionó en el punto anterior, cada grupo será evaluado según el resultado obtenido por la ponderación realizada, donde se toma la escala de 1 a 5 para cada uno de los grupos y, en cada caso donde se obtenga el "mejor resultado", será colocada la mayor puntuación. Al final, la mayor ponderación dará como resultado la propuesta; esto se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 47. Matriz selección proyecto

GRUPO	COMBUSTIBLES	INDICADORES CONSUMO COMBUSTIBLE			Puntos	EMISIONES DE CO ₂	Puntos	INDICADORES ECONÓMICOS			Puntos	Calificación
		Unidad combustible / ff	\$ / Unidad combustible	\$ / ff		Ton CO ₂		VAN	TIR	PR		
G1	Cascarilla café	0.04 m ³ /ff	8.39	0.33	5.00	0.00	5.00	(641,489.16)	Error	(1.31)	5.00	15.00
	Cascarilla coquito	0.02 m ³ /ff	0.58	0.01		0.00						
	Cascarilla arroz	0.12 m ³ /ff	6.13	0.74		0.00						
G2	Cascarilla de café	0.04 m ³ /ff	8.39	0.33	3.00	0.00	5.00	(1,491,115.14)	Error	(0.32)	4.00	12.00
	Pellets	0.02 m ³ /ff	144.71	2.49		0.00						
G3	Cascarilla de café	0.04 m ³ /ff	8.39	0.33	2.00	0.00	1.00	(6,131,891.86)	Error	(0.08)	2.00	5.00
	Búnker C	4.45 L/ff	0.62	2.76		36.88						
G4	Cascarilla de café	0.04 m ³ /ff	8.39	0.33	4.00	0.00	2.00	(3,514,374.33)	Error	(0.15)	3.00	9.00
	GLP	3.85 L/ff	0.44	1.71		16.56						
G5	Electricidad	32.03 kWh/ff	18.04	577.94	1.00	2.41	3.00	(1,076,228,929.28)	Error	(0.00)	1.00	5.00
	Cascarilla de café	0.04 m ³ /ff	8.39	0.33		0.00						
Escala	1 al 5	Nota: Menor precio cuenta con mayor ponderación al igual que las emisiones; mayores valores en indicadores económicos representan una mayor ponderación							CRITERIOS DE PUNTUACIÓN			
Orden	5 mayor											
	1 menor											

Fuente: Elaboración propia (2022)

La información que contiene la tabla anterior resume los datos que se han ido trabajando a lo largo de la investigación; en la parte de los indicadores de consumo de combustible relaciona los consumos energéticos con los poderes caloríficos para cada uno. Además, para los primeros tres grupos se plantea la cascarilla como fuente principal de combustible y los demás como respaldo, trabajando este con un 16%, de acuerdo con un manejo de 420 fanegas de café distribuido en un total de siete guardiolas.

Se toma el indicador del costo por fanega, ya que relaciona la multiplicación de los primeros dos indicadores, en este tiene una mayor ponderación el grupo 1, pues el costo total por procesar una fanega es el menor. Las emisiones de CO₂ en el caso de las fuentes relacionadas con la biomasa tienen una puntuación mayor, donde es al grupo 1 a quien se le asigna la mayor puntuación al manejar residuos directos de procesos, y con mayor importancia al tener como principal el derivado del proceso de café.

Para los indicadores económicos se presentaron problemas para poder interpretar los resultados; en todos los casos los proyectos corresponden a inversiones para mejorar un sistema que tiene problemas para abastecer el combustible actual. Al caso de la cascarilla se le deriva un costo asociado, a pesar de ser derivado del proceso debe invertirse dinero en extraerlo; esta comparación con la madera da un costo mayor relacionándolos directamente. Lo anterior es con el fin de mostrar que no se tendría ningún ahorro al cambiar solamente de combustible, mucho menos considerando la inversión inicial para pensar en un posible retorno de la inversión.

El indicador de Tasa Interna de Retorno (TIR) da error de fórmula, ya que, al igualarse la ecuación a 0 despejando del VAN se tendrían valores con un mismo signo, ambos negativos, lo que no daría igual a 0 de ninguna manera, y es por esto por lo que este indicador no se puede contemplar en este caso. Según lo mencionado anteriormente, para la puntuación en este punto se consideró el monto del Valor Actual Neto (VAN), el que represente un menor monto es al proyecto que se le asigne una mayor puntuación y, para este caso, también se tiene el grupo 1 mejor posicionado.

De acuerdo con lo anterior, el proyecto que representa una mayor puntuación es el Grupo 1, considerando un cambio de combustibles a fuentes biomásicas, y

propone el ajuste en las calderas para utilizar nuevos quemadores; a este grupo será el que se le hará la propuesta de un diseño según lo planteado para los mismos.

13.9.10 Propuesta de diseño

Para este caso, se retoma la información recopilada al analizar las posibles variantes que se generarían en el sistema para cada una de las calderas. Toma en cuenta la adaptación de los quemadores y el requerimiento para adaptar el sistema de almacenamiento de cascarilla actual en la alimentación de los combustibles. Se resume en las siguientes líneas:

Caldera Lambda:

- Consumo de energía: 2344.22 kW/h
- Capacidad tolva actual combustible: 4.5 m³
- Consumo máximo cascarilla por hora: 1.79 m³ / h

Caldera Wickes:

- Consumo de energía: 5578.08 kW/h
- Capacidad tolva actual combustible: 16 m³
- Consumo máximo cascarilla por hora: 4.25 m³ / h

Las tolvas de almacenamiento son las que posee el sistema actual; el transporte desde los silos de almacenamiento se da por medio de tornillos sin fin, desde la salida de la tolva se va a plantear el mismo sistema. Además, es parte del sistema propuesto por los fabricantes de los quemadores propuestos. Este sistema es el que se va a calcular para conocer las dimensiones requeridas, con el propósito de adaptarlo al sistema.

El tornillo sin fin para cada alimentación tendrá en cuenta la capacidad máxima de consumo de combustible (como referencia la cascarilla de café, véanse los cálculos en el apéndice 2): en la caldera Lambda se requiere un tornillo que alimente desde la tolva hasta el quemador con un diámetro de 0.1248 m a 150 rev/min, cuya capacidad sería la máxima; en la caldera Wickes se necesitaría un alimentador de tornillo sin fin con un diámetro de 0.1322 m, trabajando también a 150 rev/min el motor encargado de transportar el material.

Para la potencia calculada para los tres motores que se necesitan, se considera lo siguiente: potencia accionamiento en vacío, potencia requerida para desplazar el material y potencia que se requiere por la inclinación estimada del tornillo. El motor para la caldera Lambda requiere una potencia calculada de 9.07 W, y los dos motores para la caldera Wickes necesitan una potencia de 9.64 W cada uno; al tener lo anterior en cuenta y al consultar tamaños estándar para motores trifásicos, se opta por trabajar con motores de $\frac{1}{2}$ hp (372.85 W), lo que supera por mucho la potencia calculada.

Se consultaron las fichas técnicas de los quemadores Y-2000 de la marca Natural Fire, y este fue el punto de partida para estimar los consumos por control, los ventiladores, los dispositivos de ignición y alimentación del combustible. Con base en esto, se estiman las acometidas que necesita cada uno de ellos y sus respectivas canalizaciones.

14 Conclusiones

1. Al estimar el consumo de energía máximo para ambas calderas y cumplir con las condiciones del proceso de secado, se definió el indicador de consumo de vapor por fanega en $((2.51 \text{ kg}_{\text{vapor}}/\text{h})/\text{fanega (ff)})$ actual para los consumidores, y adicionar las pérdidas estimadas en el proceso por medio del cálculo aproximado de estas (análisis termográfico y aplicación de ecuaciones de intercambio de calor); así fue posible relacionarlo con los requerimientos de las alternativas de combustible planteadas.
2. Las fuentes de energía biomásicas se consideran neutras en emisiones de CO_2 debido al ciclo cerrado del carbono; la electricidad cuenta con un menor impacto que el generado por los combustibles derivados del petróleo.
3. Como parte de las variantes establecidas para cada grupo de combustibles, se determinó la posibilidad de generar una adaptación de quemadores en las calderas actuales, con capacidad de ajuste para la demanda y diferentes tipos de combustibles, antes de pensar en un cambio completo del sistema actual.
4. La empresa maneja un estimado de 10 kg de cascarilla de café que se recolecta por fanega, derivado del proceso de trillado; el indicador de consumo de combustible estimado es de 10.75 kg/ff (sin la reducción de las pérdidas actuales), por lo que estaría cerca de poder autoabastecerse y controlar los residuos, obteniendo así el máximo provecho del proceso.
5. Para cada una de las alternativas propuestas no se genera un retorno de la inversión; al comparar directamente los consumos estimados de estas con el combustible actual, se generan valores negativos aún sin considerar inversiones iniciales; a la cascarilla de café, a pesar de ser un derivado del proceso, se le da valor a cada kilogramo, debido a que la empresa debe invertir para obtenerlo.

6. El uso de residuos biomásicos (Grupo 1) es la propuesta escogida, de acuerdo con la puntuación de factores en la matriz de selección de proyecto (obtiene 15 puntos de los 15 posibles), lo que incurre en adaptación de quemadores para los hornos de las calderas actuales y la modificación en el punto final de distribución del combustible para el uso principalmente de cascarilla de café.
7. El diagnóstico general del sistema de vapor deja como resultado un croquis representativo, conocimiento del proceso y, por medio de la termografía, se evidencian puntos calientes que es importante intervenirlos, en calderas y tuberías, además de las temperaturas de salida del humo en las chimeneas. Para la caldera Wickes estas pérdidas son estimadas en 1 480 789.88 kJ/h (representan 86.09 kg/h de cascarilla de café), y en la caldera Lambda de 1 946 202.48 kJ/h (representan 113.15 kg/h de cascarilla de café).

15 Recomendaciones

1. Las pérdidas máximas que se determinaron en el proceso se estiman en un total de 9 964 782.03 kJ/h (equivalente a 579.35 kg/h de cascarilla) trabajando ambas calderas. Al disminuir este valor, es posible ahorrar grandes cantidades de combustible.
2. Se deben corregir tramos de la tubería sin aislamiento, puntos calientes de transferencia de calor en las calderas, temperatura de los gases de salida en las chimeneas (posibles pérdidas estimadas en este estudio). Esto se define con ayuda del análisis termográfico realizado en todos los tramos de la tubería.
3. Corregir equipos de medición dañados en los puntos de salida de vapor; la totalidad de manómetros están dañados, por lo que controlar la presión de trabajo en cada punto no tiene un valor de referencia.
4. Generar un sistema cerrado de vapor para el retorno de condensado; las pérdidas actuales se estiman en 284 994.81 kJ/h (equivalente a 16.57 kg/h de cascarilla). Con esto se puede calentar el agua de alimentación que entra en la caldera, se disminuye el tratamiento químico y se evitan desperdicios de agua.
5. La propuesta que se obtiene del trabajo consiste en adaptar quemadores de biomasa en las calderas actuales, consumir la totalidad de cascarilla de café, la cual, por medio de los cálculos, se demuestra que es un combustible con capacidad suficiente para abastecer la demanda de energía. Los cambios, en resumen, serían los siguientes:
 - Aumentar la capacidad volumétrica de tolvas para almacenamiento previo a consumo en quemadores; el actual de la caldera Lamba tiene un estimado de 4.5 m³ (2.51 horas de autonomía para consumo de cascarilla de café en consumo máximo) y el de la caldera Wickes cuenta con 16 m³ de capacidad (3.76 horas de autonomía). Lo anterior es con el fin de solventar alguna problemática sin detener el funcionamiento de la caldera.

- Implementar los quemadores de biomasa: existen proveedores a nivel nacional, esto para consumir sus propios residuos y aprovechar las instalaciones actuales de las calderas, almacenamiento y distribución.
 - Considerar los apéndices del 2 al 4 de la presente investigación, en estos se determina el diámetro del canal y tornillo sin fin para abastecer desde la tolva al quemador; el funcionamiento del motor de alimentación debe relacionarse con el quemador para abastecer según la demanda.
6. Mantener y mejorar las bases de datos de consumo de combustible (actual madera y cascarilla) en relación con los intercambiadores de calor que se encuentran funcionando. Para esta investigación fueron de gran ayuda los históricos generales de las cosechas a partir del 2018, por lo que, si no hay un cambio a corto plazo, claramente va a ser de más ayuda en un trabajo futuro tener estos datos organizados.
7. Valorar como oportunidad de negocio el mercado de la cascarilla de café para comparar rentabilidad con otra alternativa de combustible, ya que el costo por obtenerlo (a pesar de ser parte del proceso) resulta superior al consumirlo como fuente de energía comparándose directamente con utilizar madera.

Capítulo 3: Parte final

16 Referencias Bibliográficas

- Abarca Bahamondes, P. (s.f.). *Descripción de calderas y generadores de vapor*.
<http://www.achs.cl/portal/trabajadores/Capacitacion/CentrodeFichas/Documents/agua-de-alimentacion-de-calderas.pdf>
- Acero Peñafiel, H. E., y Rodríguez Alvarado, J. M. (2011). *Escuela Superior Politecnica del Litoral*. Obtenido de <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/20037/1/INFORME%20DE%20MATERIA%20DE%20GRADUACION.pdf>
- ALHESA. (2022). *ALHESA equipos y servicios de calidad*. Obtenido de <https://alhesa.net/>
- Alomá, E., y Malaver, M. (2007). *Enseñanza de las ciencias: revista de investigación y experiencias didácticas*. Obtenido de <https://www.raco.cat/index.php/Ensenanza/article/download/87934/216424>
- American Burners. (2022). *American Burners*. Obtenido de <https://www.rubcarborghi.com.ar/>
- Araya Rojas, C., Castro Navarro, J., Meneses Fernández, F., y Varela Otárola, A. (2016). *Diseño de retorno de condensado y oportunidad de inversión en secador de madera en Beneficio de Café Coopetarrazú*. Cartago: TEC.
- Armstrong. (1998). *Guía para la conservación de vapor en el drenado de condensados: evaluación y selección de trampa de vapor*. Michigan: Armstrong International, Inc.
- ATTSU. (2022). *ATTSU*. Obtenido de <https://www.attsu.com/es/productos/calderas-de-vapor/electricas/modelo-ge.html>
- BCCR. (29 de marzo de 2022). *Tipo de cambio de compra del dólar de los Estados Unidos de América*. Obtenido de <https://gee.bccr.fi.cr/indicadoreseconomicos/Cuadros/frmVerCatCuadro.aspx?CodCuadro=367&Idioma=1&FecInicial=2018/01/01&FecFinal=2022/03/29>

- Benavides, J. A. (2014). *Determinación de parámetros fisicoquímicos y cinéticos de la degradación térmica de broza y cascarilla de café para ser utilizados en simulaciones computacionales del proceso de gasificación*. San José: Universidad de Costa Rica, Facultad de Ingeniería.
- Cengel, Y. A., y Boles, M. A. (2009). *Termodinámica*. México, D.F.: McGraw-Hill.
- Cengel, Y., y Ghajar, A. (2011). *Transferencia de calor y masa*. México, D.F.: McGraw Hill.
- Chapman, S. J. (2012). *Máquinas eléctricas*. México, D.F.: McGraw-Hill.
- Cleaver Brooks. (1976). *Manual de calderas SELMEC*. México: Sociedad Electromecánica, S.A.
- Coopesantos. (marzo de 2022). *Coopesantos*. Obtenido de <https://www.coopesantos.com/acerca-de-nosotros/coopesantos-hoy/>
- CoopeTarrazú R.L. (2021). *CoopeTarrazú R.L.* Obtenido de <https://www.coopetarrazu.com/>
- Coto Chinchilla, O. (2013). *Evaluación de la generación de Residuos Agrícolas Orgánicos (RAO) en Costa Rica e identificación de sector prioritario*. San José. Informe de consultoría
- Domínguez Cerdeira, J. M., Cid, J. S., Uceda Martínez, J., Garrido Otaola, P., Lahoz Pequerul, J., y Almeida, J. (2012). *Calderas industriales eficientes*. Madrid: Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid. <https://www.ingenieros.es/files/proyectos/Guia-basica-calderas-industriales-eficientes-fenercom-2013.pdf>
- ECHA. (2022). *European Chemicals Agency*. Obtenido de <https://echa.europa.eu/es/regulations/clp/clp-pictograms>
- Energía, Medio Ambiente y Desarrollo (EMA). (2018). *Actualización de la encuesta de biomasa como insumo para su incorporación en la matriz energética de Costa Rica*. San José. https://septea.cambioclimatico.go.cr/wp-content/uploads/2022/04/Informe_Final_Actualizacion_Encuesta_Biomasa_SEPSE_CRUSA_EMA_2018.pdf
- EPA. (2022). *EPA*. Obtenido de <https://www.epa.gov/sites/default/files/widgets/ghg-calc-es/calculator-es.html#results>

ErbiaEnergy. (s.f.). *ErbiaEnergy*. Obtenido de <https://erbiaenergy.com/pellets-contras-el-cambio-climatico/>

Fernández, E. I. (2018). *Repositorio TEC*. Obtenido de <https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/10325/oferta-demanda-biomasa-forestal.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Gamboa, Y. A. (2014). *Justificación de la sustitución de una caldera de búnker por una caldera de biomasa por Eco Solutions en Bridgestone de Costa Rica*. Cartago: Tecnológico de Costa Rica.

Gas Sánchez. (2022). *Gas Sánchez*. Obtenido de <https://gassanchez.business.site/>

Google. (marzo de 2022). *Google Maps*. Obtenido de [https://www.google.co.cr/maps/dir/CoopeTarraz%C3%BA+R.L,+San+Juan,+San+Jos%C3%A9,+San+Marcos/V3W5%2BX7H+Refinadora+Costarricense+de+Petr%C3%B3leo+\(Recope\),+Ochomogo,+Provincia+de+Cartago,+Cartago/@9.7876319,-84.0379109,11.78z/data=!4m14!4m13!1m5!1m1!1s0x8](https://www.google.co.cr/maps/dir/CoopeTarraz%C3%BA+R.L,+San+Juan,+San+Jos%C3%A9,+San+Marcos/V3W5%2BX7H+Refinadora+Costarricense+de+Petr%C3%B3leo+(Recope),+Ochomogo,+Provincia+de+Cartago,+Cartago/@9.7876319,-84.0379109,11.78z/data=!4m14!4m13!1m5!1m1!1s0x8)

Gutiérrez Flores, J. M., Sanz Uribe, J. R., Oliveros Tascón, C. E., y Orozco Incapié, C. A. (febrero de 2012). *Cenicafé*. Obtenido de <https://www.cenicafe.org/es/publications/lib37751.pdf>

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., y Baptista Lucio, M. d. (2010). *Metodología de la investigación*. México, D.F.: McGraw-Hill.

Instituto Meteorológico Nacional. (2021). *Instituto Meteorológico Nacional*. Obtenido de <http://cglobal.imn.ac.cr/index.php/publications/factores-de-emision-gei-decima-edicion-2021/>

Jaramillo, O. A. (20 de noviembre de 2007). *Centro de Investigación en Energía*. Obtenido de <https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/34520227/Intercambiadores-with-cover-page-v2.pdf?Expires=1634697596&Signature=fpPQAnvC6xYTFthmNnqLK0TnrcXoZgkrDQnyQy9ARGq6i9uAmPUKwdBEraITql~hWBPV0wkWQg~hPQwOIL8lyxIT9K24zgboAyGvQVZFhcdoczxxJzVP54vdQW0hFP8PXM45~dpuAxz>

- Junta de Castilla y León. (2009). *Mejoras horizontales de ahorro y eficiencia energética Sector Industrial Energía Térmica*. Junta de Castilla y León, Consejería de Economía y Empleo, Ente Regional de Energía de Castilla y León.
- Levenspiel, O. (2018). *eLibro*. Obtenido de <https://elibro-net.ezproxy.utn.ac.cr/es/ereader/biblioutn/106541>
- Loaiza Pereira, S. I. (2020). *Modelo de gestión de la energía para el sistema de vapor del Hospital San Juan de Dios bajo los criterios de la Norma INTE/ISO 50001*. Cartago: Escuela de Ingeniería Electromecánica, Tecnológico de Costa Rica. <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/12310>
- MAG. (Ministerio de Agricultura y Ganadería. (mayo de 2010). *MAG Biblioteca Virtual*. Obtenido de <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/Q02-5836.pdf>
- MAG. (s.f.). *MAG*. Obtenido de <http://www.mag.go.cr/legislacion/1978/de-7944.pdf>
- MAG. (2014). *MAG*. Obtenido de <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/Q70-10721.pdf>
- Manual de calderas industriales. (s.f.). *5. Combustión*. Universidad de Burgos.
- Martínez Nodal, P. d., Rodríguez Rico, I., Esperanza Pérez, G., y Leiva Mas, J. (2014). *Caracterización y evaluación del bagazo de caña de azúcar como biosorbente de hidrocarburos*. Santa Clara: Universidad Central de las Villas.
- MIDEPLAN. (2020). *Ministerio de Planificación Nacional y Política Pública Económica*. Obtenido de <https://documentos.mideplan.go.cr/share/s/KLpLoXCwT0yU96gKSI4PVQ>
- MINAE y DSE. (2017). *Hoja de ruta de tecnologías con base en residuos de biomasa para generación de energía térmica en el sector industrial en Costa Rica 2030*. San José. <https://rise.esmap.org/data/files/library/costa-rica/Costa%20Rica%202030%20Technology%20Roadmap%20for%20Thermal%20Energy%20Generation%20from%20Waste%20Biomass%20in%20the%20Industrial%20Sector.pdf>
- Ministerio de Hacienda. (2021). *Marco fiscal de mediano plazo*. San José: Ministerio de Hacienda.
- Miravete, A., y Larrodé, E. (1996). *Transportadores y elevadores*. Barcelona: Editorial Reverté S.A.

- Natural Fire. (2022). *Natural Fire*. Obtenido de <https://naturalfire.es/>
- NFPA. (2014). *NEC*. NFPA.
- Orellana, D. E. (2018). *Estudio, puesta en marcha y proposición de ensayos para un transportador de tornillo de laboratorio*. Valparaíso: Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.
- Osejo Martínez, D. E. (2017). *Diseño de una caldera de generación de vapor piro-tubular de 10 BHP expandible a 25 BHP mediante módulos*. Bogotá: Fundación Universidad de América. <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/6507/1/4062032-2017-2-IM.pdf>
- Paucar, W. (s.f.). *UISEK*. Obtenido de <https://repositorio.uisek.edu.ec/bitstream/123456789/3646/1/PRESENTACION%20FINAL%20PROY%20TIT%20WP.pdf>
- Pelletics. (2021). *Pelletics energía renovable*. Obtenido de https://pelletics.com/?page_id=17
- Pineda Mejía, C. M., Reyes Fernández, C., y Oseguera, F. A. (febrero de 2017). *InfoCafés*. Obtenido de <http://infocafes.com/portal/wp-content/uploads/2017/02/Tec-Guia-Beneficiado.pdf>
- Procuraduría General de la República. (23 de noviembre de 2009). *Sistema Costarricense de Información Jurídica*. Obtenido de http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=67206&nValor3=79528&strTipM=TC#:~:text=Depreciaci%C3%B3n%3A%20Es%20la%20distribuci%C3%B3n%20sistem%C3%A1tica,activo%20durante%20su%20vida%20%C3%BA
- Real Academia Española. (2021). *Real Academia Española*. Definición de termómetro Obtenido de <https://dle.rae.es/term%C3%B3metro>
- RECOPE. (2022). *Manual de productos 2021*. RECOPE. <https://www.recope.go.cr/productos/>

- RECOPE. (15 de febrero de 2022). *RECOPE*. Obtenido de <https://www.recope.go.cr/quienes-somos/poliducto/>
- RECOPE. (2022). *RECOPE seguridad energética*. Obtenido de <https://www.recope.go.cr/>
- Recursos Biblio.* (s.f.). Calderas eléctricas y de aplicaciones especiales. Obtenido de http://recursosbiblio.url.edu.gt/publicjlg/biblio_sin_paredes/fac_ing/Manu_cal/l/cap/04.pdf
- Repositorio Universidad Científica del Sur.* (2019). Obtenido de <https://repositorio.cientifica.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12805/1261/TB-Huaytalla%20B.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Romero Arias, J. A. (2018). *Estudio de la viabilidad financiera, ambiental y energética para la sustitución de una de las calderas de búnker por una de biomasa en la planta San Rafael de la empresa Cargil Costa Rica*. Cartago: Tecnológico de Costa Rica. https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/10461/estudio_viabilidad_financiera_ambiental_energetica_sustitucion_calderas_bunker_biomasa_planta_san_rafael_empresa_cargill_costa_rica.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Segarra, J. J. (2014-2015). *Estudio de la viabilidad de la generación de vapor para usos industriales basado en combustión de biomasa*. Valencia: Escuela Técnica Superior Ingenieros Industriales Valencia.
- Serret-Guasch, N., Giralt Ortega, G., y Quintero Ríos, M. (setiembre de 2016). *SCIELO*. Obtenido de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852016000300012
- Spirax Sarco. (1999). *Guía de referencia técnica distribución de vapor*. Buenos Aires: Spirax Sarco.
- Theodore L., B., LeMay, H., Bursten, B. E., y Murphy, C. J. (2009). *Química, la ciencia central* (10ª ed.). México: Cámara Nacional de la Industria Editorial Mexicana. Reg. Núm. 1031.

- Torres, C., Jiménez, A. "Informe Final: Determinación de propiedades de distintas biomاسas usadas con fines energéticos en la industria costarricense". Escuela de Ingeniería Química, Universidad de Costa Rica, 2019.
- Urquiza, J., Acero, U., y Rodríguez, J. (2011). *Escuela Superior Politécnica del Litoral*. Obtenido de <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/19195/1/resumen%20ocascarilla%20de%20arroz.pdf>
- Vinueza, J. S. (enero de 2016). *Aprovechamiento del recurso biomasa a partir de los desechos de madera para una caldera de vapor*. Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/11994/3/UPS-KT01220.pdf>
- Vivas Carmona, S. M., Paz Torres, G., y Rojas Carvajal, Á. H. (2007). *Red UAO*. Obtenido de <https://red.uao.edu.co/bitstream/handle/10614/6180/T04187.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

17 Apéndices

17.1 Apéndice 1: Propuestas de análisis económico

	Cosecha	Cosecha	Cosecha	Cosecha	Cosecha	Cosecha	Cosecha	Cosecha	Cosecha	Cosecha	Cosecha
	2022-2023	2023-2024	2024-2025	2025-2026	2026-2027	2027-2028	2028-2029	2029-2030	2030-2031	2031-2032	
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Precio cascarilla de café (\$/m3)	\$ 8.39	\$ 8.50	\$ 8.55	\$ 8.59	\$ 8.59	\$ 8.59	\$ 8.59	\$ 8.59	\$ 8.59	\$ 8.59	\$ 8.59
Precio cascarilla de coquito (\$/m3)	\$ 0.58	\$ 0.58	\$ 0.59	\$ 0.59	\$ 0.59	\$ 0.59	\$ 0.59	\$ 0.59	\$ 0.59	\$ 0.59	\$ 0.59
Precio cascarilla de arroz (\$/m3)	\$ 6.13	\$ 6.21	\$ 6.25	\$ 6.28	\$ 6.28	\$ 6.28	\$ 6.28	\$ 6.28	\$ 6.28	\$ 6.28	\$ 6.28
Consumo combustible cascarilla de café (m3)	7289.04	6831.81	7505.61	8311.03	7842.90	8506.41	9302.11	8824.80	9479.73	10267.37	
Consumo combustible cascarilla de coquito (m3)	269.41	252.51	277.41	307.18	289.88	314.40	343.81	326.17	350.38	379.49	
Consumo combustible cascarilla de arroz (m3)	138.23	129.56	142.34	157.62	148.74	161.32	176.41	167.36	179.78	194.72	
Costos consumo combustible cascarilla de café (\$)	\$ 61,126.80	\$ 58,037.15	\$ 64,201.82	\$ 71,370.05	\$ 67,350.02	\$ 73,047.84	\$ 79,880.82	\$ 75,781.97	\$ 81,406.13	\$ 88,169.86	
Costos consumo combustible cascarilla de coquito (\$)	\$ 154.94	\$ 147.11	\$ 162.74	\$ 180.90	\$ 170.72	\$ 185.16	\$ 202.48	\$ 192.09	\$ 206.34	\$ 223.49	
Costos consumo combustible cascarilla de arroz (\$)	\$ 847.62	\$ 804.78	\$ 890.26	\$ 989.66	\$ 933.91	\$ 1,012.92	\$ 1,107.67	\$ 1,050.84	\$ 1,128.82	\$ 1,222.61	
Transporte nuevo combustible											
Precio combustible actual-madera (\$/m ³)	\$ 15.59	\$ 15.80	\$ 15.90	\$ 15.97	\$ 15.97	\$ 15.97	\$ 15.97	\$ 15.97	\$ 15.97	\$ 15.97	\$ 15.97
Consumo combustible actual-madera (m ³)	3266.20	3061.31	3363.24	3724.15	3514.38	3811.70	4168.25	3954.37	4247.84	4600.78	
Costo consumo combustible actual-madera (\$)	\$ 50,928.06	\$ 48,353.91	\$ 53,490.02	\$ 59,462.27	\$ 56,112.96	\$ 60,860.13	\$ 66,553.05	\$ 63,138.08	\$ 67,823.87	\$ 73,459.10	
Ahorro cosecha	-\$ 11,201.30	-\$ 10,635.13	-\$ 11,764.79	-\$ 13,078.34	-\$ 12,341.69	-\$ 13,385.79	-\$ 14,637.92	-\$ 13,886.81	-\$ 14,917.43	-\$ 16,156.86	
% Ahorro	-18%	-18%	-18%	-18%	-18%	-18%	-18%	-18%	-18%	-18%	
Ahorro (moneda)	-\$ 11,201.30	-\$ 10,635.13	-\$ 11,764.79	-\$ 13,078.34	-\$ 12,341.69	-\$ 13,385.79	-\$ 14,637.92	-\$ 13,886.81	-\$ 14,917.43	-\$ 16,156.86	
Depreciación quemador Y-2000	\$ 6,703.73	\$ 6,703.73	\$ 6,703.73	\$ 6,703.73	\$ 6,703.73	\$ 6,703.73	\$ 6,703.73	\$ 6,703.73	\$ 6,703.73	\$ 6,703.73	
Depreciación quemador 2800 kW	\$ 18,770.43	\$ 18,770.43	\$ 18,770.43	\$ 18,770.43	\$ 18,770.43	\$ 18,770.43	\$ 18,770.43	\$ 18,770.43	\$ 18,770.43	\$ 18,770.43	
Valor de rescate											\$ 109,174.95
Flujo neto de efectivo	-\$ 363,916.50	-\$ 36,675.46	-\$ 36,109.29	-\$ 37,238.94	-\$ 38,552.50	-\$ 37,815.84	-\$ 38,859.95	-\$ 40,112.07	-\$ 39,360.97	-\$ 40,391.58	-\$ 67,543.94
Flujo neto acumulado	-\$ 36,675.46	-\$ 72,784.74	-\$ 110,023.68	-\$ 148,576.18	-\$ 186,392.02	-\$ 225,251.97	-\$ 265,364.04	-\$ 304,725.01	-\$ 345,116.59	-\$ 277,572.66	
Flujo neto valor presente	-\$ 36,675.46	-\$ 36,109.29	-\$ 37,238.94	-\$ 38,552.50	-\$ 37,815.84	-\$ 38,859.95	-\$ 40,112.07	-\$ 39,360.97	-\$ 40,391.58	-\$ 67,543.94	
Flujo neto acumulado valor presente	-\$ 36,675.46	-\$ 72,784.74	-\$ 110,023.68	-\$ 148,576.18	-\$ 186,392.02	-\$ 225,251.97	-\$ 265,364.04	-\$ 304,725.01	-\$ 345,116.59	-\$ 277,572.66	

VNA	-\$277,572.66
VAN	-\$641,489.16
TIR	#¡NUM!
PR	-1.31
ID	-0.76
%G	-1.76

Ilustración 34. Propuesta análisis económico Grupo 1

Fuente: Elaboración propia (2022)

	Cosecha 0	Cosecha 2022-2023 1	Cosecha 2023-2024 2	Cosecha 2024-2025 3	Cosecha 2025-2026 4	Cosecha 2026-2027 5	Cosecha 2027-2028 6	Cosecha 2028-2029 7	Cosecha 2029-2030 8	Cosecha 2030-2031 9	Cosecha 2031-2032 10	
Precio cascarrilla de café (\$/m3)	\$	8.39	\$ 8.50	\$ 8.55	\$ 8.59	\$ 8.59	\$ 8.59	\$ 8.59	\$ 8.59	\$ 8.59	\$ 8.59	
Precio pellets (\$/m3)	\$	144.71	\$ 146.59	\$ 147.61	\$ 148.18	\$ 148.18	\$ 148.18	\$ 148.18	\$ 148.18	\$ 148.18	\$ 148.18	
Consumo combustible cascarrilla de café (m3)		7289.04	6831.81	7505.61	8311.03	7842.90	8506.41	9302.11	8824.80	9479.73	10267.37	
Consumo combustible pellets (m3)		505.12	473.44	520.13	575.95	543.51	589.49	644.63	611.55	656.94	711.52	
Costos consumo combustible cascarrilla de café (\$)	\$	61,126.80	\$ 58,037.15	\$ 64,201.82	\$ 71,370.05	\$ 67,350.02	\$ 73,047.84	\$ 79,880.82	\$ 75,781.97	\$ 81,406.13	\$ 88,169.86	
Costos consumo combustible pellets (\$)	\$	73,097.10	\$ 69,402.41	\$ 76,774.29	\$ 85,346.25	\$ 80,538.99	\$ 87,352.60	\$ 95,523.66	\$ 90,622.14	\$ 97,347.67	\$ 105,435.93	
Transporte												
Precio combustible actual-madera (\$/m ³)	\$	15.59	\$ 15.80	\$ 15.90	\$ 15.97	\$ 15.97	\$ 15.97	\$ 15.97	\$ 15.97	\$ 15.97	\$ 15.97	
Consumo combustible actual-madera (m ³)		3266.20	3061.31	3363.24	3724.15	3514.38	3811.70	4168.25	3954.37	4247.84	4600.78	
Costo consumo combustible actual-madera (\$)	\$	50,928.06	\$ 48,353.91	\$ 53,490.02	\$ 59,462.27	\$ 56,112.96	\$ 60,860.13	\$ 66,553.05	\$ 63,138.08	\$ 67,823.87	\$ 73,459.10	
Ahorro cosecha	-\$	83,295.84	-\$ 79,085.65	-\$ 87,486.08	-\$ 97,254.03	-\$ 91,776.04	-\$ 99,540.32	-\$ 108,851.43	-\$ 103,266.03	-\$ 110,929.93	-\$ 120,146.68	
% Ahorro		-62%	-62%	-62%	-62%	-62%	-62%	-62%	-62%	-62%	-62%	
Ahorro (moneda)	-\$	83,295.84	-\$ 79,085.65	-\$ 87,486.08	-\$ 97,254.03	-\$ 91,776.04	-\$ 99,540.32	-\$ 108,851.43	-\$ 103,266.03	-\$ 110,929.93	-\$ 120,146.68	
Depreciación quemador modelo Y-2000	\$	6,703.73	\$ 6,703.73	\$ 6,703.73	\$ 6,703.73	\$ 6,703.73	\$ 6,703.73	\$ 6,703.73	\$ 6,703.73	\$ 6,703.73	\$ 6,703.73	
Depreciación quemador 2800 kW	\$	18,770.43	\$ 18,770.43	\$ 18,770.43	\$ 18,770.43	\$ 18,770.43	\$ 18,770.43	\$ 18,770.43	\$ 18,770.43	\$ 18,770.43	\$ 18,770.43	
Depreciación tolva y sistema alimentación pellets	\$	-	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	
Valor de rescate											\$ 109,174.95	
Flujo neto de efectivo	-\$	363,916.50	-\$ 108,769.99	-\$ 104,559.81	-\$ 112,960.23	-\$ 122,728.19	-\$ 117,250.20	-\$ 125,014.47	-\$ 134,325.58	-\$ 128,740.19	-\$ 136,404.09	-\$ 36,445.89
Flujo neto acumulado	-\$	108,769.99	-\$ 213,329.80	-\$ 326,290.04	-\$ 449,018.23	-\$ 566,268.42	-\$ 691,282.90	-\$ 825,608.48	-\$ 954,348.67	-\$ 1,090,752.76	-\$ 1,127,198.64	
Flujo neto valor presente	-\$	108,769.99	-\$ 104,559.81	-\$ 112,960.23	-\$ 122,728.19	-\$ 117,250.20	-\$ 125,014.47	-\$ 134,325.58	-\$ 128,740.19	-\$ 136,404.09	-\$ 36,445.89	
Flujo neto acumulado valor presente	-\$	108,769.99	-\$ 213,329.80	-\$ 326,290.04	-\$ 449,018.23	-\$ 566,268.42	-\$ 691,282.90	-\$ 825,608.48	-\$ 954,348.67	-\$ 1,090,752.76	-\$ 1,127,198.64	

VNA	-\$1,127,198.64
VAN	-\$1,491,115.14
TIR	#¡NUM!
PR	-0.32
ID	-3.10
%G	-4.10

Ilustración 35. Propuesta análisis económico Grupo 2

Fuente: Elaboración propia (2022)

	Cosecha 0	Cosecha 2022-2023 1	Cosecha 2023-2024 2	Cosecha 2024-2025 3	Cosecha 2025-2026 4	Cosecha 2026-2027 5	Cosecha 2027-2028 6	Cosecha 2028-2029 7	Cosecha 2029-2030 8	Cosecha 2030-2031 9	Cosecha 2031-2032 10	
Precio cascarilla de café (\$/m3)		\$ 8.39	\$ 8.50	\$ 8.55	\$ 8.59	\$ 8.59	\$ 8.59	\$ 8.59	\$ 8.59	\$ 8.59	\$ 8.59	
Precio búnker C (\$/L)		\$ 0.62	\$ 0.63	\$ 0.63	\$ 0.63	\$ 0.63	\$ 0.63	\$ 0.63	\$ 0.63	\$ 0.63	\$ 0.63	
Consumo combustible cascarilla de café (m3)		7289.04	6831.81	7505.61	8311.03	7842.90	8506.41	9302.11	8824.80	9479.73	10267.37	
Consumo combustible búnker C (L)		829,868.97	777,811.72	854,525.44	946,223.82	892,926.25	968,468.03	1,059,059.56	1,004,717.01	1,079,282.17	1,168,955.67	
Costos consumo combustible cascarilla de café (\$)		\$ 61,126.80	\$ 58,037.15	\$ 64,201.82	\$ 71,370.05	\$ 67,350.02	\$ 73,047.84	\$ 79,880.82	\$ 75,781.97	\$ 81,406.13	\$ 88,169.86	
Costos consumo combustible búnker C (\$)		\$ 514,530.67	\$ 488,523.73	\$ 540,414.40	\$ 600,752.48	\$ 566,914.14	\$ 614,875.21	\$ 672,391.30	\$ 637,889.50	\$ 685,230.52	\$ 742,163.75	
Transporte												
Precio combustible actual-madera (\$/m³)		\$ 15.59	\$ 15.80	\$ 15.90	\$ 15.97	\$ 15.97	\$ 15.97	\$ 15.97	\$ 15.97	\$ 15.97	\$ 15.97	
Consumo combustible actual-madera (m³)		7289.04	6831.81	7505.61	8311.03	7842.90	8506.41	9302.11	8824.80	9479.73	10267.37	
Costo consumo combustible actual-madera (\$)		\$ 113,654.07	\$ 107,909.43	\$ 119,371.50	\$ 132,699.51	\$ 125,224.99	\$ 135,819.06	\$ 148,523.72	\$ 140,902.66	\$ 151,359.76	\$ 163,935.67	
Ahorro cosecha		-\$ 462,003.40	-\$ 438,651.46	-\$ 485,244.72	-\$ 539,423.02	-\$ 509,039.16	-\$ 552,104.00	-\$ 603,748.39	-\$ 572,768.81	-\$ 615,276.89	-\$ 666,397.94	
% Ahorro		-80%	-80%	-80%	-80%	-80%	-80%	-80%	-80%	-80%	-80%	
Ahorro (moneda)		-\$ 462,003.40	-\$ 438,651.46	-\$ 485,244.72	-\$ 539,423.02	-\$ 509,039.16	-\$ 552,104.00	-\$ 603,748.39	-\$ 572,768.81	-\$ 615,276.89	-\$ 666,397.94	
Depreciación quemador modelo Y-2000		\$ 6,703.73	\$ 6,703.73	\$ 6,703.73	\$ 6,703.73	\$ 6,703.73	\$ 6,703.73	\$ 6,703.73	\$ 6,703.73	\$ 6,703.73	\$ 6,703.73	
Depreciación quemador 2800 kW		\$ 18,770.43	\$ 18,770.43	\$ 18,770.43	\$ 18,770.43	\$ 18,770.43	\$ 18,770.43	\$ 18,770.43	\$ 18,770.43	\$ 18,770.43	\$ 18,770.43	
Depreciación quemador modelo Tipo C		\$ 3,998.40	\$ 3,998.40	\$ 3,998.40	\$ 3,998.40	\$ 3,998.40	\$ 3,998.40	\$ 3,998.40	\$ 3,998.40	\$ 3,998.40	\$ 3,998.40	
Depreciación tanque almacenamiento búnker 30 m3		\$ 6,747.58	\$ 6,747.58	\$ 6,747.58	\$ 6,747.58	\$ 6,747.58	\$ 6,747.58	\$ 6,747.58	\$ 6,747.58	\$ 6,747.58	\$ 6,747.58	
Valor de rescate											\$ 139,299.75	
Flujo neto de efectivo		-\$ 464,332.49	-\$ 498,223.53	-\$ 474,871.59	-\$ 521,464.85	-\$ 575,643.16	-\$ 545,259.29	-\$ 588,324.13	-\$ 639,968.53	-\$ 608,988.94	-\$ 651,497.02	-\$ 563,318.33
Flujo neto acumulado		-\$ 498,223.53	-\$ 973,095.12	-\$ 1,494,559.97	-\$ 2,070,203.13	-\$ 2,615,462.42	-\$ 3,203,786.55	-\$ 3,843,755.08	-\$ 4,452,744.02	-\$ 5,104,241.04	-\$ 5,667,559.37	
Flujo neto valor presente		-\$ 498,223.53	-\$ 474,871.59	-\$ 521,464.85	-\$ 575,643.16	-\$ 545,259.29	-\$ 588,324.13	-\$ 639,968.53	-\$ 608,988.94	-\$ 651,497.02	-\$ 563,318.33	
Flujo neto acumulado valor presente		-\$ 498,223.53	-\$ 973,095.12	-\$ 1,494,559.97	-\$ 2,070,203.13	-\$ 2,615,462.42	-\$ 3,203,786.55	-\$ 3,843,755.08	-\$ 4,452,744.02	-\$ 5,104,241.04	-\$ 5,667,559.37	

VNA	-\$5,667,559.37
VAN	-\$6,131,891.86
TIR	#¡NUM!
PR	-0.08
ID	-12.21
%G	-13.21

Ilustración 36. Propuesta análisis económico Grupo 3

Fuente: Elaboración propia (2022)

	Cosecha 0	Cosecha 2022-2023 1	Cosecha 2023-2024 2	Cosecha 2024-2025 3	Cosecha 2025-2026 4	Cosecha 2026-2027 5	Cosecha 2027-2028 6	Cosecha 2028-2029 7	Cosecha 2029-2030 8	Cosecha 2030-2031 9	Cosecha 2031-2032 10	
Precio cascarilla de café (\$/m3)		\$ 8.39	\$ 8.50	\$ 8.55	\$ 8.59	\$ 8.59	\$ 8.59	\$ 8.59	\$ 8.59	\$ 8.59	\$ 8.59	
Precio GLP (\$/L)		\$ 0.44	\$ 0.45	\$ 0.45	\$ 0.46	\$ 0.46	\$ 0.46	\$ 0.46	\$ 0.46	\$ 0.46	\$ 0.46	
Consumo combustible cascarilla de café (m3)		7289.04	6831.81	7505.61	8311.03	7842.90	8506.41	9302.11	8824.80	9479.73	10267.37	
Consumo combustible GLP (L)		717,490.88	672,483.05	738,808.46	818,089.34	772,009.16	837,321.32	915,645.25	868,661.58	933,129.37	1,010,659.59	
Costos consumo combustible cascarilla de café (\$)		\$ 61,126.80	\$ 58,037.15	\$ 64,201.82	\$ 71,370.05	\$ 67,350.02	\$ 73,047.84	\$ 79,880.82	\$ 75,781.97	\$ 81,406.13	\$ 88,169.86	
Costos consumo combustible GLP (\$)		\$ 318,820.34	\$ 302,705.58	\$ 334,858.76	\$ 372,246.25	\$ 351,278.88	\$ 380,997.16	\$ 416,636.04	\$ 395,257.58	\$ 424,591.65	\$ 459,869.38	
Transporte												
Precio combustible actual-madera (\$/m ³)		\$ 15.59	\$ 15.80	\$ 15.90	\$ 15.97	\$ 15.97	\$ 15.97	\$ 15.97	\$ 15.97	\$ 15.97	\$ 15.97	
Consumo combustible actual-madera (m ³)		7289.04	6831.81	7505.61	8311.03	7842.90	8506.41	9302.11	8824.80	9479.73	10267.37	
Costo consumo combustible actual-madera (\$)		\$ 113,654.07	\$ 107,909.43	\$ 119,371.50	\$ 132,699.51	\$ 125,224.99	\$ 135,819.06	\$ 148,523.72	\$ 140,902.66	\$ 151,359.76	\$ 163,935.67	
Ahorro cosecha		-\$ 266,293.07	-\$ 252,833.30	-\$ 279,689.08	-\$ 310,916.79	-\$ 293,403.91	-\$ 318,225.95	-\$ 347,993.14	-\$ 330,136.89	-\$ 354,638.03	-\$ 384,103.57	
% Ahorro		-70%	-70%	-70%	-70%	-70%	-70%	-70%	-70%	-70%	-70%	
Ahorro (moneda)		-\$ 266,293.07	-\$ 252,833.30	-\$ 279,689.08	-\$ 310,916.79	-\$ 293,403.91	-\$ 318,225.95	-\$ 347,993.14	-\$ 330,136.89	-\$ 354,638.03	-\$ 384,103.57	
Depreciación quemador modelo Y-2000		\$ 6,703.73	\$ 6,703.73	\$ 6,703.73	\$ 6,703.73	\$ 6,703.73	\$ 6,703.73	\$ 6,703.73	\$ 6,703.73	\$ 6,703.73	\$ 6,703.73	
Depreciación quemador 2800 kW		\$ 18,770.43	\$ 18,770.43	\$ 18,770.43	\$ 18,770.43	\$ 18,770.43	\$ 18,770.43	\$ 18,770.43	\$ 18,770.43	\$ 18,770.43	\$ 18,770.43	
Depreciación quemador modelo Tipo C (GLP)		\$ 3,998.40	\$ 3,998.40	\$ 3,998.40	\$ 3,998.40	\$ 3,998.40	\$ 3,998.40	\$ 3,998.40	\$ 3,998.40	\$ 3,998.40	\$ 3,998.40	
Depreciación tanque almacenamiento GLP 500 galones		\$ 6,747.58	\$ 6,747.58	\$ 6,747.58	\$ 6,747.58	\$ 6,747.58	\$ 6,747.58	\$ 6,747.58	\$ 6,747.58	\$ 6,747.58	\$ 6,747.58	
Valor de rescate											\$ 155,229.14	
Flujo neto de efectivo		-\$ 464,332.49	-\$ 272,996.80	-\$ 259,537.02	-\$ 286,392.81	-\$ 317,620.51	-\$ 300,107.63	-\$ 324,929.67	-\$ 354,696.87	-\$ 336,840.62	-\$ 361,341.75	-\$ 235,578.15
Flujo neto acumulado		-\$ 272,996.80	-\$ 532,533.82	-\$ 818,926.63	-\$ 1,136,547.14	-\$ 1,436,654.78	-\$ 1,761,584.45	-\$ 2,116,281.32	-\$ 2,453,121.93	-\$ 2,814,463.68	-\$ 3,050,041.84	
Flujo neto valor presente		-\$ 272,996.80	-\$ 259,537.02	-\$ 286,392.81	-\$ 317,620.51	-\$ 300,107.63	-\$ 324,929.67	-\$ 354,696.87	-\$ 336,840.62	-\$ 361,341.75	-\$ 235,578.15	
Flujo neto acumulado valor presente		-\$ 272,996.80	-\$ 532,533.82	-\$ 818,926.63	-\$ 1,136,547.14	-\$ 1,436,654.78	-\$ 1,761,584.45	-\$ 2,116,281.32	-\$ 2,453,121.93	-\$ 2,814,463.68	-\$ 3,050,041.84	

VNA	-\$3,050,041.84
VAN	-\$3,514,374.33
TIR	#¡NUM!
PR	-0.15
ID	-6.57
%G	-7.57

Ilustración 37. Propuesta análisis económico Grupo 4

Fuente: Elaboración propia (2022)

	Cosecha 0	Cosecha 2022-2023 1	Cosecha 2023-2024 2	Cosecha 2024-2025 3	Cosecha 2025-2026 4	Cosecha 2026-2027 5	Cosecha 2027-2028 6	Cosecha 2028-2029 7	Cosecha 2029-2030 8	Cosecha 2030-2031 9	Cosecha 2031-2032 10
Precio cascarilla de café (\$/m ³)	\$	8.39	\$ 8.39	\$ 8.39	\$ 8.39	\$ 8.39	\$ 8.39	\$ 8.39	\$ 8.39	\$ 8.39	\$ 8.39
Precio electricidad (\$/kWh)	\$	18.04	\$ 18.04	\$ 18.04	\$ 18.04	\$ 18.04	\$ 18.04	\$ 18.04	\$ 18.04	\$ 18.04	\$ 18.04
Consumo combustible cascarilla de café (m ³)		3063.26	2871.10	3154.27	3492.76	3296.02	3574.86	3909.26	3708.67	3983.91	4314.92
Consumo combustible electricidad (kWh)		5,967,497.56	5,967,497.56	5,967,497.56	5,967,497.56	5,967,497.56	5,967,497.56	5,967,497.56	5,967,497.56	5,967,497.56	5,967,497.56
Costos consumo combustible cascarilla de café (\$)	\$	25,688.87	24,077.42	26,452.12	29,290.67	27,640.83	29,979.25	32,783.54	31,101.35	33,409.54	36,185.41
Costos consumo combustible electricidad (\$)	\$	107,682,111.86	107,682,111.86	107,682,111.86	107,682,111.86	107,682,111.86	107,682,111.86	107,682,111.86	107,682,111.86	107,682,111.86	107,682,111.86
Transporte											
Precio combustible actual-madera (\$/m ³)	\$	15.59	15.80	15.90	15.97	15.97	15.97	15.97	15.97	15.97	15.97
Consumo combustible actual-madera (m ³)		7289.04	6831.81	7505.61	8311.03	7842.90	8506.41	9302.11	8824.80	9479.73	10267.37
Costo consumo combustible actual-madera (\$)	\$	113,654.07	107,909.43	119,371.50	132,699.51	125,224.99	135,819.06	148,523.72	140,902.66	151,359.76	163,935.67
Ahorro cosecha	-\$	107,594,146.66	107,598,279.85	107,589,192.48	107,578,703.03	107,584,527.70	107,576,272.05	107,566,371.68	107,572,310.55	107,564,161.64	107,554,361.60
% Ahorro		-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%	-100%
Ahorro (moneda)	-\$	107,594,146.66	107,598,279.85	107,589,192.48	107,578,703.03	107,584,527.70	107,576,272.05	107,566,371.68	107,572,310.55	107,564,161.64	107,554,361.60
Depreciación quemador modelo Y-2000		6,703.73	6,703.73	6,703.73	6,703.73	6,703.73	6,703.73	6,703.73	6,703.73	6,703.73	6,703.73
Depreciación caldera eléctrica modelo GE-8500		52,416.00	52,416.00	52,416.00	52,416.00	52,416.00	52,416.00	52,416.00	52,416.00	52,416.00	52,416.00
Valor de rescate											59,119.73
Flujo neto de efectivo	-\$464,332.49	107,600,850.39	107,604,983.58	107,595,896.21	107,585,406.76	107,591,231.42	107,582,975.78	107,573,075.41	107,579,014.28	107,570,865.37	107,501,945.60
Flujo neto acumulado	-\$	107,600,850.39	215,205,833.96	322,801,730.17	430,387,136.93	537,978,368.35	645,561,344.13	753,134,419.54	860,713,433.82	968,284,299.18	1,075,786,244.78
Flujo neto valor presente	-\$	107,600,850.39	107,604,983.58	107,595,896.21	107,585,406.76	107,591,231.42	107,582,975.78	107,573,075.41	107,579,014.28	107,570,865.37	107,501,945.60
Flujo neto acumulado valor presente	-\$	107,600,850.39	215,205,833.96	322,801,730.17	430,387,136.93	537,978,368.35	645,561,344.13	753,134,419.54	860,713,433.82	968,284,299.18	1,075,786,244.78

VNA	-\$1,075,786,244.78
VAN	-\$1,076,250,577.27
TIR	#¡NUM!
PR	0.00
ID	-2316.84
%G	-2317.84

Ilustración 38. Propuesta análisis económico Grupo 5

Fuente: Elaboración propia (2022)

17.2 Apéndice 2: Cálculo tornillos sin fin

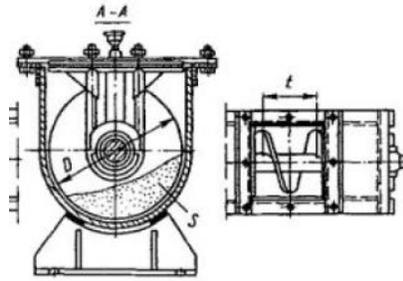


Ilustración 39. Imagen de referencia tornillo sin fin y canal

Fuente: Miravete y Larrodé (1996, p. 50)

17.2.1 Área de relleno del canal

$$S = \lambda \times \left(\frac{\pi \times D^2}{4} \right) [m^2]$$

(Orellana, 2018, p. 13)

S = Área de relleno del transportador en m²

D = Diámetro del cilindro transportador en m

λ = Coeficiente de relleno de la sección

Tabla 48. Coeficiente de relleno según carga

Tipo de carga	Coeficiente de relleno
Pesada y abrasiva	0.125
Pesada y poco abrasiva	0.25
Ligera y poco abrasiva	0.32
Ligera y no abrasiva	0.4

Fuente: Orellana (2018, p. 13)

17.2.2 Paso del tornillo

$$p = 0.5 \times D[m]$$

(Miravete y Larrodé, 1996, p. 50)

p = Paso del tornillo en metros

D = Diámetro del cilindro transportador en m

17.2.3 Velocidad de desplazamiento del material

$$V = \frac{p \times n}{60} \left[\frac{m}{s} \right]$$

(Orellana, 2018, p. 14)

V = Velocidad de desplazamiento del material del transportador en metros por segundo

p = Paso del tornillo en metros

n = Velocidad de giro del eje del tornillo en revoluciones por minuto

La velocidad de giro recomendada, y que se va a utilizar para materiales ligeros, es de 150 revoluciones por minuto (Miravete y Larrodé, 1996, p. 51).

17.2.4 Capacidad de transporte de material

$$Q = 3600 \times S \times V \times \rho \times i [\text{ton/h}]$$

(Orellana, 2018, p. 14)

Q = Capacidad de transporte de mineral en toneladas por hora

S = Área de relleno del transportador en metros cuadrados

V = Velocidad de desplazamiento del transportador en metros por segundo

ρ = Densidad del material transportado en toneladas por metro cúbico

i = Coeficiente de disminución del flujo de material debido a la inclinación del transportador

Tabla 49. Coeficiente de disminución de flujo de material

Inclinación del transportador en grados °	0 °	5 °	10 °	15 °	20 °	25 °	30 °	35 °
Coeficiente de disminución del flujo del material (i)	1	0.9	0.8	0.7	0.65	0.42	0.3	0.2

Fuente: Orellana (2018, p. 14)

17.2.5 Tratamiento de la ecuación para encontrar diámetro del tornillo

De acuerdo con la ecuación para encontrar la capacidad de transporte de material, se despeja para encontrar el diámetro aproximado para el tornillo sin fin, trabajando la capacidad requerida de combustible en la máxima demanda. El tratamiento es el siguiente:

$$Q \left[\frac{\text{ton}}{\text{h}} \right] = 3600 \left[\frac{\text{s}}{\text{h}} \right] \times S [\text{m}^2] \times V \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \times \rho \left[\frac{\text{ton}}{\text{m}^3} \right] \times i$$

$$Q \left[\frac{\text{ton}}{\text{h}} \right] = 3600 \left[\frac{\text{s}}{\text{h}} \right] \times \left(\lambda \times \left(\frac{\pi \times D^2}{4} \right) \right) [\text{m}^2] \times \left(\frac{0.5 \times D \times n}{60} \right) \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \times \rho \left[\frac{\text{ton}}{\text{m}^3} \right] \times i$$

$$Q = 3600 \times \left(\lambda \times \left(\frac{\pi \times D^3}{4} \right) \right) \times \left(\frac{0.5 \times n}{60} \right) \times \rho \times i$$

$$Q = D^3 \times 3600 \times \lambda \times \left(\frac{\pi}{4} \right) \times \left(\frac{0.5 \times n}{60} \right) \times \rho \times i$$

$$\frac{Q \left[\frac{\text{ton}}{\text{h}} \right]}{3600 \left[\frac{\text{s}}{\text{h}} \right] \times \lambda \times \left(\frac{\pi}{4} \right) \times \left(\frac{0.5 \times n \left[\frac{\text{rev}}{\text{min}} \right]}{60 \left[\frac{\text{s}}{\text{min}} \right]} \right) \times \rho \left[\frac{\text{ton}}{\text{m}^3} \right] \times i} = D^3$$

$$\sqrt[3]{\frac{Q}{3600 \times \lambda \times \left(\frac{\pi}{4} \right) \times \left(\frac{0.5 \times n}{60} \right) \times \rho \times i}} [\text{m}^3] = \sqrt[3]{D^3}$$

$$\sqrt[3]{\frac{Q}{3600 \times \lambda \times \left(\frac{\pi}{4} \right) \times \left(\frac{0.5 \times n}{60} \right) \times \rho \times i}} [\text{m}^3] = D [\text{m}]$$

Al despejar la variable “D”, que representa el diámetro del tornillo sin fin, es posible utilizar la ecuación para insertar los valores de consumo de combustible ya calculados, un valor de “λ” de 0.4 para transporte de materiales ligeros y no abrasivos, un valor de “i” de 0.65 para una inclinación aproximada de 20° y un número de revoluciones de 150 revoluciones por minuto, que es recomendada para el transporte de materiales ligeros. Para la caldera Lambda el consumo de combustible se maneja el total estimado, y para la caldera Wickes se divide en dos el consumo total, debido a que para la propuesta de diseño se tienen dos quemadores con consumos iguales. Con lo anterior definido, se inserta la ecuación en Excel y se procede a calcular el diámetro para el tornillo:

Tabla 50. Cálculo variables tornillo sin fin

	Combustibles		Caldera Lambda	λ	D [m]	S [m ²]	p [m]	n [rev/min]	V [m/s]	i
	Tipo	ρ [ton/m ³]	Q [ton/h]							
Cálculo "D" Caldera Lambda	Cascarilla café	0.2747	0.4907	0.4000	0.1248	0.0049	0.0624	150.0000	0.1560	0.6500
	Cascarilla arroz	0.1000	0.5476		0.1813	0.0103	0.0906		0.2266	
	Cascarilla coquito	0.4970	0.4172		0.0970	0.0030	0.0485		0.1213	
Cálculo "D" Caldera Wickes	Cascarilla café	0.2747	0.5838	0.4000	0.1322	0.0055	0.0661	150.0000	0.1653	0.6500
	Cascarilla arroz	0.1000	0.6515		0.1921	0.0116	0.0961		0.2401	
	Cascarilla coquito	0.4970	0.4963		0.1028	0.0033	0.0514		0.1285	

Fuente: Elaboración propia (2022)

17.3 Apéndice 3: Cálculo potencia de accionamiento requerida

17.3.1 Potencia de accionamiento en vacío

$$P_{fr} = \frac{L \times n \times F_b \times F_d}{1000000} [Hp]$$

(Orellana, 2018, p. 16)

L = Longitud del transportador en pies

n = Velocidad de operación de la máquina en revoluciones por minuto

F_b = Factor de buje para colgante:

Tabla 51. Factor de buje para el colgante

Tipo de buje		Factor " F_b "
B	Rodamiento de bolas	1.0
S	Bronce grafito – bronce, Impregnado en aceite – madera, Impregnado en aceite – Nylatron – Nylon – Teflón – UHMH – Uretano	2.0
H	Superficie endurecida – Stellite	4.4

Fuente: Orellana (2018, p. 16)

F_d = Factor de diámetro del tornillo:

Tabla 52. Factor de diámetro del tornillo " F_d "

Diámetro del tornillo (in)	Factor " F_d "
4	12
6	18
9	31
10	37
12	55
30	300

Fuente: Orellana (2018, p. 16)

Las ecuaciones descritas anteriormente fueron colocadas en Excel. Las variables se muestran en la siguiente tabla, junto con la potencia de accionamiento estimada (esto para los tornillos propuestos para cada caldera):

Tabla 53. Potencia accionamiento para los diferentes combustibles

Variables	Combustibles	L [ft]	n [rev/min]	F _b	F _d	P _{fr} [Hp]
Caldera Lambda	C. Café	3	150.00	1	18	0.0081
	C. Arroz				31	0.01395
	C. Coquito				12	0.0054
Caldera Wickes	C. Café	3	150.00	1	18	0.0081
	C. Arroz				31	0.01395
	C. Coquito				18	0.0081

Fuente: Elaboración propia (2022)

17.3.2 Potencia de desplazamiento del material

$$P_m = \frac{Q \times L \times \rho \times F_f \times F_m \times F_p}{1000000} [Hp]$$

(Orellana, 2018, p. 16)

Q = Capacidad de transporte de material en pies cúbicos por hora

L = Longitud del transportador en pies

ρ = Peso específico del material en libras por pie cúbico

F_f = Factor de la helicoidal del tornillo:

Tabla 54. Factor por tipo de helicoidal del tornillo

Tipo de helicoidal	Factor " F_f ", factor por porcentaje de carga del transportador			
	15 %	30 %	45 %	95 %
Estándar	1.00	1.00	1.00	1.00
Helicoidal con corte	1.10	1.15	1.20	1.30
Helicoidal con corte y dobles	No recomendado	1.50	1.70	2.20
Helicoide con listón	1.05	1.14	1.20	-

Fuente: Orellana (2018, p. 17)

F_m = Factor del material

Tabla 55. Factor aplicado por material "F_m"

Material	Cascarilla de café	Cascarilla de arroz	Cascarilla de coquito
Factor del material "F _m "	1	0.4	1.5

Fuente: Orellana (2018, p. 79)

F_p = Factor por paletas

Tabla 56. Factor por # de paletas por paso

Nº de paletas por paso	0	1	2	3	4
Factor por paletas "F _p "	1.00	1.29	1.58	1.87	2.16

Fuente: Orellana (2018, p. 17)

Los factores seleccionados para este cálculo se muestran a continuación, junto con la potencia requerida para el desplazamiento del material:

Tabla 57. Potencia requerida por desplazamiento del material

Variables	Combustibles	L [ft]	Q [ft ³ /h]	ρ [lb/ft ³]	F _f	F _m	F _p	P _m [Hp]
Caldera Lambda	C. Café	3	63.08	17.15	1	1	1	0.00325
	C. Arroz		193.37	6.24		0.4		0.00362
	C. Coquito		29.64	31.03		1.5		0.00276
Caldera Wickes	C. Café	3	75.05	17.15	1	1	1	0.00386
	C. Arroz		230.07	6.24		0.4		0.00431
	C. Coquito		35.27	31.03		1.5		0.00328

Fuente: Elaboración propia (2022)

17.3.3 Potencia para transportador de tornillo inclinado

Se aplica en caso de que el transportador deba llevar el material inclinado:

$$P_{in} = \frac{Q \times \rho \times H}{2000000} [Hp]$$

(Orellana, 2018, p. 17)

Q = Capacidad de transporte de material en pies cúbicos por hora

ρ = Peso específico del material en libras por pie cúbico

H = Altura de la instalación en pies

A continuación, se muestra el cálculo para la estimación de la potencia que se requiere, debido a la inclinación del transportador:

Tabla 58. Potencia requerida por inclinación del tornillo

Variables	Combustibles	Q [ft³/h]	ρ [lb/ft³]	H [ft]	P_{in} [Hp]
Caldera Lambda	C. Café	63.08	17.15	1.5	0.000811
	C. Arroz	193.37	6.24		0.000905
	C. Coquito	29.64	31.03		0.00069
Caldera Wickes	C. Café	75.05	17.15	1.5	0.000965
	C. Arroz	230.07	6.24		0.001077
	C. Coquito	35.27	31.03		0.000821

Fuente: Elaboración propia (2022)

17.3.4 Potencia total requerida para el trabajo

$$P_T = (P_{fr} + P_m + P_{in}) \times 745.7 [W]$$

(Orellana, 2018, p. 15)

P_T = Potencia total en Watts

P_{fr} = Potencia accionamiento en vacío en Hp

P_m = Potencia de desplazamiento del material en Hp

P_{in} = Potencia transportador inclinado en Hp

En la siguiente tabla se resumen las potencias calculadas para cada uno de los combustibles de las propuestas:

Tabla 59. Potencia total requerida para el transporte del material

Variables	Combustibles	P_{fr} [Hp]	P_m [Hp]	P_{in} [Hp]	P_T [W]
Caldera Lambda	C. Café	0.00810	0.00325	0.00081	9.07
	C. Arroz	0.01395	0.00362	0.00091	13.78
	C. Coquito	0.00540	0.00276	0.00069	6.60
Caldera Wickes	C. Café	0.00810	0.00386	0.00097	9.64
	C. Arroz	0.01395	0.00431	0.00108	14.42
	C. Coquito	0.00810	0.00328	0.00082	9.10

Fuente: Elaboración propia (2022)

17.4 Apéndice 4: Acometida eléctrica y dispositivos para equipos nuevos

17.4.1 Potencias de consumo eléctrico

El consumo eléctrico se da principalmente por motores para alimentación de combustibles y ventiladores para los equipos, además del control que cada uno requiere. A continuación, se resumen los consumos según ficha técnica y cálculos realizados:

Tabla 60. Potencia de consumo para equipo a instalar

Ubicación	Equipo	Cantidad	Consumo eléctrico máximo	Voltaje	# Fases
Caldera Lambda	Quemador	1	10 507 W	440 V	3
	Motor tornillo sin fin	1	372.85 W (1/2 hp)	440 V	3
Caldera Wickes	Quemador	2	10 507 W	440 V	3
	Motor tornillo sin fin	2	372.85 W (1/2 hp)	440 V	3

Fuente: Elaboración propia (2022)

17.4.2 Cálculo calibre conductores

Para calcular la corriente de consumo de los motores para los tornillos se consulta la tabla 430.250 del NEC (Código Eléctrico Nacional) 2014; de ella se extrae la corriente de consumo con base en los caballos del motor seleccionado:

Tabla 430.250 Corriente de plena carga de motores trifásicos de corriente alterna

Los siguientes valores de corrientes de plena carga son típicos para motores que funcionan a las velocidades usuales de motores con bandas y motores con características normales de par. Las tensiones enumeradas son las nominales de los motores. Las corrientes enumeradas deben permitirse para sistemas con intervalos de tensión de 110 a 120 volts, 220 a 240 volts, 440 a 480 volts y 550 a 1000 volts.

Caballos de fuerza	Tipo de inducción de jaula de ardilla y de rotor devanado (Amperes)							Tipo sincrónico de factor de potencia unitario* (Amperes)			
	115 Volts	200 Volts	208 Volts	230 Volts	460 Volts	575 Volts	2300 Volts	230 Volts	460 Volts	575 Volts	2300 Volts
½	4.4	2.5	2.4	2.2	1.1	0.9	—	—	—	—	—
¾	6.4	3.7	3.5	3.2	1.6	1.3	—	—	—	—	—
1	8.4	4.8	4.6	4.2	2.1	1.7	—	—	—	—	—
1½	12.0	6.9	6.6	6.0	3.0	2.4	—	—	—	—	—
2	13.6	7.8	7.5	6.8	3.4	2.7	—	—	—	—	—
3	—	11.0	10.6	9.6	4.8	3.9	—	—	—	—	—
5	—	17.5	16.7	15.2	7.6	6.1	—	—	—	—	—
7½	—	25.3	24.2	22	11	9	—	—	—	—	—

Ilustración 40. Corriente plena carga de motores trifásicos de corriente alterna

Fuente: NFPA (2014, p. 70-349)

De acuerdo con lo anterior, la corriente de consumo para cada motor es de 1.1 amperios. Según lo que indica el artículo, a los conductores que alimenten un motor único, y que trabaje a carga continua, se les debe aplicar un factor del 125%. A continuación, se muestra el artículo mencionado:

430.22 Motor único. Los conductores que alimenten un solo motor que se use en una aplicación de servicio continuo, deben tener una ampacidad no menor del 125 por ciento del valor nominal de corriente de plena carga del motor, como se determina en la sección 430.6(A)(1), o no menor que la especificada en la sección 430.22(A) hasta (G).

Ilustración 41. Artículo 430.22

Fuente: NEC (NFPA, 2014, p. 70-321)

Enseguida, se aplica el factor mencionado:

$$1.1 A \times 125\% = I_{LL}$$

$$1.38 A = I_{LL}$$

La corriente de consumo para los equipos de los quemadores se estima de la siguiente manera:

$$P = \sqrt{3} \times V_{LL} \times I_{LL} \times \cos(\theta) [W] = \sqrt{3} \times V_{LL} \times I_{LL} \times f.p [W]$$

(Chapman, 2012, p. 457)

$P =$ Potencia real

$V_{LL} =$ Voltaje de alimentación

$I_{LL} =$ Corriente consumida

$f.p =$ Factor de potencia, se utilizará 0.95

Con base en la ecuación anterior, se calcula la corriente de consumo para los quemadores:

$$P = \sqrt{3} \times V_{LL} \times I_{LL} \times f.p$$

$$\frac{P}{\sqrt{3} \times V_{LL} \times f.p} = I_{LL}$$

$$\frac{10\,507\,W}{\sqrt{3} \times 440\,V \times 0.95} = I_{LL}$$

$$14.51\,A = I_{LL}$$

Se aplica el factor del 125% al considerarse una carga continua, la cual da como resultado lo siguiente:

$$14.51 A \times 125\% = I_{LL}$$

$$18.14 A = I_{LL}$$

Las corrientes calculadas son las mismas para los equipos que se necesitan en cada una de las calderas. El conductor seleccionado es con base en la tabla 310.15 (B)(16) que se muestra a continuación:

Tabla 310.15(B)(16) (antes Tabla 310.16) Ampacidades permisibles en conductores aislados para tensiones nominales de hasta e incluyendo 2000 volts y 60° C a 90° C (140° F a 194° F). No más de tres conductores portadores de corriente en una canalización, cable o tierra (enterrados directamente), basadas en una temperatura ambiente de 30° C (86° F)*.

Calibre AWG o kcmil	Temperatura nominal del conductor [Ver Tabla 310.104(A).]						Calibre AWG o kcmil
	60°C (140°F)	75°C (167°F)	90°C (194°F)	60°C (140°F)	75°C (167°F)	90°C (194°F)	
	Tipos TW, UF	Tipos RHW, THHW, THW, THWN, XHHW, USE, ZW	Tipos TBS, SA, SIS, FEP, FEPB, MI, RHH, RHW-2, THHN, THHW, THW-2, THWN-2, USE-2, XHH, XHHW, XHHW-2, ZW-2	Tipos TW, UF	Tipos RHW, THHW, THW, THWN, XHHW, USE	Tipos TBS, SA, SIS, THHN, THHW, THW-2, THWN-2, RHH, RHW-2, USE-2, XHH, XHHW, XHHW-2, ZW-2	
	COBRE			ALUMINIO O ALUMINIO RECUBIERTO DE COBRE			
18**	—	—	14	—	—	—	—
16**	—	—	18	—	—	—	—
14**	15	20	25	—	—	—	—
12**	20	25	30	15	20	25	12**
10**	30	35	40	25	30	35	10**
8	40	50	55	35	40	45	8
6	55	65	75	40	50	55	6
4	70	85	95	55	65	75	4
3	85	100	115	65	75	85	3
2	95	115	130	75	90	100	2
1	110	130	145	85	100	115	1
1/0	125	150	170	100	120	135	1/0
2/0	145	175	195	115	135	150	2/0
3/0	165	200	225	130	155	175	3/0
4/0	195	230	260	150	180	205	4/0

Ilustración 42. Tabla 310.15 (B)(16)

Fuente: NEC 2014 (NFPA, 2014, p. 70-161)

A continuación, se resume la corriente para cada equipo y el conductor que debe alimentar cada equipo:

Tabla 61. Corriente de consumo de los equipos y conductor seleccionado

Equipo	Corriente (A)	Conductor seleccionado
Quemador	14.51 A	14 AWG (60°C) cobre
Motor tornillo sin fin	1.38 A	14 AWG (60°C) cobre

Fuente: NFPA (2014, pp. 70-161)

17.4.3 Protecciones seleccionadas

Las protecciones por calcular son disyuntores de tiempo inverso. Se utiliza la siguiente tabla para el cálculo de estos dispositivos:

Tabla 430.52 Valor nominal o ajuste máximos de los dispositivos de protección contra cortocircuito y falla a tierra para circuitos ramales de motores

Tipo de motor	En porcentaje de la corriente de plena carga			
	Fusible sin retardo de tiempo ¹	Fusible de elemento dual (de acción retardada) ¹	Interruptor automático de disparo instantáneo	Interruptor automático de tiempo inverso ²
Motores monofásicos	300	175	800	250
Motores polifásicos de c.a. distintos a los de rotor devanado	300	175	800	250
De jaula de ardilla — diferentes de los de diseño B energéticamente eficientes	300	175	800	250
De diseño B energéticamente eficientes	300	175	1100	250
Sincrónicos ³	300	175	800	250
Con rotor devanado	150	150	800	150
De corriente continua (tensión constante)	150	150	250	150

Nota: Para algunas excepciones a los valores especificados, véanse la sección 430.54.

¹Los valores de la columna fusible sin retardo de tiempo se aplican a fusibles de Clase CC de acción retardada.

²Los valores de la última columna también cubren los valores nominales de los ruptores de circuito de tiempo inverso no ajustables, que se pueden modificar como se describe en la sección 430.52(C)(1), excepción No. 1 y No. 2.

³Los motores sincrónicos de bajo par y baja velocidad (usualmente 450 rpm o menos), como los utilizados para accionar compresores alternativos, bombas, etc. que arrancan sin carga, no requieren que el valor nominal de los fusibles o el ajuste de los ruptores de circuito sea mayor al 200% de la corriente de plena carga.

Ilustración 43. Tabla 430.25 NEC 2014, valor ajuste protecciones para motores

Fuente: NFPA (2014, p. 70-333)

Las corrientes de consumo se utilizan para estimar la protección, utilizando el factor del 250% para escoger el disyuntor de tiempo inverso:

- Quemador: $14.51 A \times 250\% = 36.28 A$, protección: 40 A, 3 polos
- Motor tornillo: $1.1 A \times 250\% = 2.75 A$, protección: 15 A, 3 polos (no hay protecciones menores normalizadas, apartado 240.6 NEC 2014)

17.4.4 Canalización

De la tabla 5 del capítulo 9 del NEC 2014 se pueden conocer el área de los conductores seleccionados; para esto se va a tomar en cuenta el área del conductor THHN, que es el más común utilizar:

Tabla 5 Dimensiones de conductores aislados y de cables de artefactos

Tipo	Calibre (AWG o kcmil)	Área aproximada		Diámetro aproximado	
		mm ²	pulg. ²	mm	pulg.
Tipo: FFH-2, RFH-1, RFH-2, RFHH-2 , RHH*, RHW*, RHW-2*, RHH, RHW, RHW-2, SF-1, SF-2, SFF-1, SFF-2, TF, TFF, THHW, THW, THW-2, TW, XF, XFF					
THHN, THWN, THWN-2	14	6.258	0.0097	2.819	0.111
	12	8.581	0.0133	3.302	0.130
	10	13.61	0.0211	4.166	0.164
	8	23.61	0.0366	5.486	0.216
	6	32.71	0.0507	6.452	0.254
	4	53.16	0.0824	8.230	0.324
	3	62.77	0.0973	8.941	0.352
	2	74.71	0.1158	9.754	0.384
	1	100.8	0.1562	11.33	0.446
	1/0	119.7	0.1855	12.34	0.486
	2/0	143.4	0.2223	13.51	0.532
	3/0	172.8	0.2679	14.83	0.584
	4/0	208.8	0.3237	16.31	0.642
	250	256.1	0.3970	18.06	0.711
	300	297.3	0.4608	19.46	0.766

Ilustración 44. Tabla cinco dimensiones de conductores aislados, capítulo 9, NEC 2014

Fuente: NFPA (2014, p. 70-747)

El área de los conductores se resume en la siguiente tabla; es igual en ambos casos, por lo que solo esta se va a tomar como referencia:

Tabla 62. Área conductores seleccionados

Conductores	Cantidad	Área de conductor	Totales
Conductores de fase	3 #14 AWG	6.258 mm ²	18.774 mm ²
Conductores de neutro	1 #14 AWG	6.258 mm ²	6.258 mm ²
Conductores de tierra	1 #14 AWG	6.258 mm ²	6.258 mm ²
Total			31.290 mm²

Fuente: NFPA (2014, p. 70-747)

Con base en la siguiente tabla se considera el espacio de llenado de la tubería:

Tabla 1 Porcentaje de sección transversal de conductos y tuberías para conductores y cables

Cantidad de conductores y/o cables	Área transversal (%)
1	53
2	31
Más de 2	40

Ilustración 45. Tabla 1 Porcentaje de llenado de tuberías

Fuente: Capítulo 9, NEC 2014 (NFPA, 2014, p. 70-741)

La tubería por utilizar será tubería eléctrica metálica EMT, que será seleccionada con base en la siguiente tabla y un porcentaje de llenado del 40%:

Tabla 4 Dimensiones y área porcentual de conductos y tuberías (áreas de conductos o tuberías para las combinaciones de cables permitidas en la Tabla 1, Capítulo 9)

Artículo 358 — Tubería metálica eléctrica (EMT)													
Designador métrico	Tamaño comercial	Más de 2 cables 40%		60%		1 cable 53%		2 cables 31%		Diámetro interno nominal		Área total 100%	
		mm ²	pulg. ²	mm ²	pulg. ²	mm ²	pulg. ²	mm ²	pulg. ²	mm	pulg.	mm ²	pulg. ²
16	½	78	0.122	118	0.182	104	0.161	61	0.094	15.8	0.622	196	0.304
21	¾	137	0.213	206	0.320	182	0.283	106	0.165	20.9	0.824	343	0.533
27	1	222	0.346	333	0.519	295	0.458	172	0.268	26.6	1.049	556	0.864
35	1¼	387	0.598	581	0.897	513	0.793	300	0.464	35.1	1.380	968	1.496
41	1½	526	0.814	788	1.221	696	1.079	407	0.631	40.9	1.610	1314	2.036
53	2	866	1.342	1299	2.013	1147	1.778	671	1.040	52.5	2.067	2165	3.356
63	2½	1513	2.343	2270	3.515	2005	3.105	1173	1.816	69.4	2.731	3783	5.858
78	3	2280	3.538	3421	5.307	3022	4.688	1767	2.742	85.2	3.356	5701	8.846
91	3½	2980	4.618	4471	6.927	3949	6.119	2310	3.579	97.4	3.834	7451	11.545
103	4	3808	5.901	5712	8.852	5046	7.819	2951	4.573	110.1	4.334	9521	14.753

Ilustración 46. Tabla 4 dimensiones tubería EMT

Fuente: NEC 2014 (NFPA, 2014, p. 70-742)

La tubería seleccionada para cada uno de los circuitos es de ½'', con una capacidad de llenado al 40% de 78 mm², lo que está por encima de lo calculado para los conductores seleccionados.

18 Anexos

18.1 Anexo 1: Poder calórico de combustibles RECOPE

Producto	Poder calórico
Búnker	42,46 MJ/kg (41,90 MJ/L)
Diésel 50	45,57 MJ/kg (37,64 MJ/L)
Gas Licuado de Petróleo (LPG)	48.00 MJ/kg (25,68 MJ/L)
Gasóleo	43.08 MJ/kg (38,99 MJ/L)
Gasolinas	45.50 MJ/kg (33,49 MJ/L)
Keroseno y Jet A-1	45,83 MJ/kg (36,62 MJ/L)

Valores determinados el 28.06.2017

*Estos valores de calor de combustión no son absolutos, y pueden variar en un mismo producto dependiendo de la composición química de cada uno ellos.

Ilustración 47. Poder calórico de combustibles RECOPE

Fuente: RECOPE (2017)

18.2 Anexo 2: Ficha técnica de GLP RECOPE

Tabla 4. Propiedades físicas y químicas del Gas Licuado de Petróleo

Propiedad	Mínimo	Promedio	Máximo	Límite de Especificación	Método
Densidad a 15 °C, kg/m ³	528,0	535,2	544,0	Reportar	ASTM D-1657
Mercaptanos (como etil-Mercaptano), mg/L	12	17	28	12 a 24	ASTM D-5305
Composición, %:					
Fracción volumen de Metano	0,00	0,02	0,07	Reportar	ASTM D2163
Fracción volumen de Etano	1,6	3,3	5,5	Reportar	ASTM D2163
Fracción volumen de Etileno	0,0	0,0	0,0	Reportar	ASTM D2163
Fracción volumen de Propano	35,6	67,5	74,3	Reportar	ASTM D2163
Fracción volumen de Propileno	0,0	0,0	0,04	Reportar	ASTM D2163
Fracción volumen de Acetileno	0,0	0,0	0,0	Reportar	ASTM D2163
Fracción volumen de Propano + livianos	58,0	71,1	78,3	Reportar	ASTM D2163
Fracción volumen de Butanos	21,7	28,9	36,9	Máximo 40	ASTM D2163
Fracción volumen de Butenos	0,0	0,01	0,23	Reportar	ASTM D2163
Fracción volumen de Pentano + pesados	0,0	0,0	0,0	Máximo 2,0	ASTM D2163
Presión de vapor manométrica 37,8 °C, kPa	898	1039	1175	Máximo 1434	ASTM D-1267
Volatilidad (Temperatura de la fracción del 95 % evaporado), °C	-2,2	0,3	2,2	Máximo 2,2	ASTM D-1837
Relación Vapor/Líquido	246	255	260	Reportar	
Residuo de la evaporación, cm ³	0,00	0,00	0,00	Máximo 0,05	ASTM D-2158
Coefficiente Expansión Térmica del Gas (10 ⁶ / °C)	900	1000	1100	Reportar	

Fuente: Departamento de Control de Calidad de RECOPE

Ilustración 48. Ficha técnica del GLP RECOPE

Fuente: Departamento de Control de Calidad de RECOPE (2017)

18.3 Anexo 3: Ficha técnica del búnker C RECOPE

Tabla 7. Propiedades físicas y químicas del Bunker C (Fuel Oil).

Propiedad	Mínimo	Promedio	Máximo	Límite de Especificación	Método
Viscosidad a 50 °C, mm ² /s	82,0	267,0	410,0	Máximo 640	ASTM D-445
Temperatura del punto de fluidez, °C	-15,0	-5,3	3,0	Máximo 15	ASTM D-6749
Temperatura de inflamación, °C	73,0	93,7	115,0	Mínimo 60	ASTM D-93
Fracción masa de ceniza, %	0,01	0,04	0,06	Máximo 0,10	ASTM D-482
Fracción masa residuo carbón Conradson, %	8,6	12,2	16,5	Máximo 18	ASTM D-4530
Fracción de volumen agua y sedimento, % v/v	0,1	0,1	0,3	Máximo 2,0	ASTM D-1796
Poder calórico neto, MJ/kg	41,0	41,5	43,1	Reportar	ASTM D-4868
Calor de Combustión bruto, MJ/kg	41,9	42,6	43,2	Reportar	ASTM D-4868
Densidad a 15 °C a muestra, kg/m ³	897,6	982	995,3	Reportar	ASTM D-1298
Fracción masa de Azufre, %	1,1	2,2	2,8	Máximo 3	ASTM D-4294
Contenido de Vanadio, mg/kg	54	117	226	Máximo 350	ASTM D-5863
Fracción volumen de agua por destilación, %v/v	0,1	0,2	0,3	Máximo 0,5	ASTM D-95

Fuente: Departamento de Control de Calidad RECOPE

Ilustración 49. Ficha técnica del Búnker C RECOPE

Fuente: Departamento de Control de Calidad de RECOPE (2017)

18.4 Anexo 4: Precios combustibles RECOPE

PRODUCTO	PRECIO / LITRO SIN IMPUESTO	IMPUESTO ÚNICO	PRECIO / LITRO TOTAL
NAFTA PESADA	426.0900	37.0000	463.0900
EMULSION ASFALTICA LENTA (CSS-1)	236.0500	39.2500	275.3000
JET A-1	452.0400	153.5000	605.5400
AV GAS (100 LL)	780.2800	255.7500	1036.0300
ASFALTO (AC-30)	362.7400	52.0000	414.7400
GLP	285.6400	52.0000	337.6400
KEROSENE	438.3100	73.0000	511.3100
GASOLINA PLUS 91 (REGULAR)	423.2100	255.7500	678.9600
GASOLINA SUPER (SUPERIOR)	426.9800	267.7500	694.7300
GASOLEO	375.9400	50.0000	425.9400
EMULSION ASFALTICA RAPIDA (CRS-1)	232.8400	39.2500	272.0900
BUNKER C	322.8500	24.7500	347.6000
IFO-380	374.6000	0.0000	374.6000
DIESEL 50	426.1700	151.2500	577.4200

Ilustración 50. Precios vigentes para combustibles RECOPE

Fuente: RECOPE (2017)

18.5 Anexo 5: Valores subproductos de café derivados del beneficiado

SUBPRODUCTOS DE BENEFICIADO DE CAFÉ Y SU DENSIDAD APARENTE

DESCRIPCION	kg/ff	%peso/ff	%vol/ff	kg/m3	qq/m3	ff/m3	m3/1000 ff
CAFÉ EN FRUTA	253.0	100.0%	100.0%	632.5	13.75	2.5	400.0
PULPA FRESCA	105.2	41.6%	56.0%	469.9	10.2	4.5	224.0
CAFÉ EN BABA	148.0	58.5%	43.9%	842.9	18.3	5.7	175.6
MUCILAGO	39.5	15.6%	4.7%	2099.4	45.6	53.2	18.8
AGUA DE SECADO	50.3	19.9%	0.0%		0.0		
CAFÉ LAVADO 53%bh	108.5	42.9%	39.1%	694.0	15.1	6.4	156.4
PERGAMINO 12%bh	57.9	22.9%	36.6%	395.7	8.6	6.8	146.4
CAFÉ ORO 12%bh	47.1	18.6%	16.5%	713.0	15.5	15.2	66.0
CASCARILLA	10.9	4.3%	9.9%	274.7	6.0	25.3	39.6
FANEGA	0.40 m3	400 litros					
QUINTAL	46 kg	100 libras					

Ilustración 51. Valores para derivados del café mediante el proceso de beneficiado

Fuente: Coto Chinchilla (2013, p. 60)

18.6 Anexo 6: Temperatura agua saturada

AGUA

TABLA A.4

TABLA DE TEMPERATURA. AGUA SATURADA

SISTEMA INTERNACIONAL

SISTEMA INTERNACIONAL		Volumen del Líquido	Volumen del Vapor	Energía interna del Líquido	Energía interna de Evaporización	Energía interna del Vapor	Entalpía del Líquido	Entalpía de Evaporización	Entalpía del Vapor	Entropía del Líquido	Entropía de Evaporización	Entropía del Vapor
T (°C)	PSAT(kpa)	Vf(m3/kg)	Vg(m3/kg)	Uf (KJ/Kg)	Ufg (KJ/KG)	Ug (KJ/Kg)	hf (KJ/Kg)	hfg (KJ/Kg)	hg (KJ/Kg)	Sf (KJ/Kg K)	Sfg (KJ/Kg K)	Sg (KJ/Kg K)
0,01	0,6113	0,001000	206,14	0	2375,3	2375,3	0,01	2501,39	2501,4	0	9,1562	9,1562
5	0,8721	0,001000	147,12	20,97	2361,3	2382,3	20,98	2489,62	2510,6	0,0761	8,9496	9,0257
10	1,2276	0,001000	106,38	42,00	2347,2	2389,2	42,01	2477,79	2519,8	0,1510	8,7498	8,9008
15	1,7051	0,001001	77,93	62,999	2333,1	2396,1	62,99	2465,91	2528,9	0,2245	8,5569	8,7814
20	2,339	0,001002	57,79	83,95	2319,0	2402,9	83,96	2454,14	2538,1	0,2966	8,3706	8,6672
25	3,169	0,001003	43,36	104,88	2304,9	2409,8	104,89	2442,31	2547,2	0,3674	8,1906	8,5580
30	4,246	0,001004	32,89	125,78	2290,8	2416,6	125,79	2430,51	2556,3	0,4369	8,0164	8,4533
35	5,628	0,001006	25,22	146,67	2276,7	2423,4	146,68	2418,62	2565,3	0,5053	7,8478	8,3531
40	7,384	0,001008	19,52	167,56	2262,5	2430,1	167,57	2406,73	2574,3	0,5725	7,6845	8,2570
45	9,593	0,001010	15,26	188,44	2248,4	2436,8	188,45	2394,75	2583,2	0,6387	7,5261	8,1648
50	12,349	0,001012	12,03	209,32	2234,2	2443,5	209,33	2382,77	2592,1	0,7038	7,3725	8,0763
55	15,758	0,001015	9,568	230,21	2219,9	2450,1	230,23	2370,7	2600,9	0,7679	7,2234	7,9913
60	19,94	0,001017	7,671	251,11	2205,5	2456,6	251,13	2358,47	2609,6	0,8312	7,0784	7,9096
65	25,03	0,001020	6,197	272,02	2191,1	2463,1	272,06	2346,2	2618,3	0,8935	6,9375	7,8310
70	31,19	0,001023	5,042	292,95	2176,7	2469,6	292,98	2333,82	2626,8	0,9549	6,8004	7,7553
75	38,58	0,001026	4,131	313,90	2162,0	2475,9	313,93	2321,37	2635,3	1,0155	6,6669	7,6824
80	47,39	0,001029	3,407	334,86	2147,3	2482,2	334,91	2308,8	2643,7	1,0753	6,5369	7,6122

Ilustración 52. Temperatura agua saturada

Fuente: (John Wiley & Sons,1986, p.1)

18.7 Anexo 7: Presiones agua saturada

TABLA A.5

TABLA DE PRESIONES. AGUA SATURADA

SISTEMA INTERNACIONAL

SISTEMA INTERNACIONAL		Volumen del Líquido	Volumen del Vapor	Energía interna del Líquido	Energía interna de Evaporización	Energía interna del Vapor	Entalpía del Líquido	Entalpía de Evaporización	Entalpía del Vapor	Entropía del Líquido	Entropía de Evaporización	Entropía del Vapor
P(kpa)	T.-SAT(°C)	Vf(m3/kg)	Vg(m3/kg)	Uf (KJ/Kg)	Ufg (KJ/KG)	Ug (KJ/Kg)	hf (KJ/Kg)	hfg (KJ/Kg)	hg (KJ/Kg)	Sf (KJ/Kg K)	Sfg (KJ/Kg K)	Sg (KJ/Kg K)
0,6113	0,01	0,001000	206,14	0	2375,3	2375,3	0,01	2501,39	2501,4	0,000	9,1562	9,1562
1	6,98	0,001000	129,21	29,30	2355,7	2385,0	29,30	2484,9	2514,2	0,1059	8,8697	8,9756
1,5	13,03	0,001001	87,98	54,71	2338,6	2393,3	54,71	2470,59	2525,3	0,1957	8,6322	8,8279
2	17,50	0,001001	67,00	73,48	2326,0	2399,5	73,48	2460,02	2533,5	0,2607	8,4630	8,7237
2,5	21,08	0,001002	54,25	88,48	2315,9	2404,4	88,49	2451,51	2540,0	0,3120	8,3312	8,6432
3	24,08	0,001003	45,67	101,04	2307,5	2408,5	101,05	2443,95	2545,0	0,3545	8,2231	8,5776
4	28,96	0,001004	34,80	121,45	2293,7	2415,2	121,46	2432,94	2554,4	0,4226	8,0520	8,4746
5	32,88	0,001005	28,19	137,81	2282,7	2420,5	137,82	2423,68	2561,5	0,4764	7,9187	8,3951
7,5	40,29	0,001008	19,24	168,78	2261,7	2430,5	168,79	2406,01	2574,8	0,5764	7,6751	8,2515
10	45,81	0,001010	14,67	191,82	2246,10	2437,9	191,83	2392,87	2584,7	0,6493	7,5009	8,1502
15	53,97	0,001014	10,02	225,92	2222,8	2448,7	225,94	2373,16	2599,1	0,7549	7,2536	8,0085
20	60,06	0,001017	7,649	251,38	2205,4	2456,8	251,40	2358,3	2609,7	0,8320	7,0765	7,9085
25	64,97	0,001020	6,204	271,90	2191,2	2463,1	271,93	2346,27	2618,2	0,8931	6,9383	7,8314
30	69,10	0,001022	5,229	289,20	2179,2	2468,4	289,23	2336,07	2625,3	0,9439	6,8247	7,7686
40	75,87	0,001027	3,993	317,53	2159,5	2477,0	317,58	2319,22	2636,8	1,0259	6,6441	7,6700
50	81,33	0,001030	3,240	340,44	2143,4	2483,8	340,49	2305,41	2645,9	1,0910	6,5029	7,5939
75	91,78	0,001037	2,217	384,31	2112,4	2496,7	384,39	2278,61	2663,0	1,2130	6,2434	7,4564
P(Mpa)												
0,100	99,63	0,001043	1,6940	417,36	2088,7	2506,1	417,46	2258,0	2675,5	1,3026	6,0568	7,3594
0,125	105,99	0,001048	1,3749	444,16	2069,3	2513,5	444,32	2241,1	2685,4	1,3740	5,9104	7,2844
0,150	111,37	0,001053	1,1593	466,94	2052,7	2519,6	467,11	2226,5	2693,6	1,4336	5,7897	7,2233
0,175	116,06	0,001057	1,0036	486,80	2038,1	2524,9	486,99	2213,6	2700,6	1,4849	5,6868	7,1717
0,200	120,23	0,001061	0,8857	504,49	2025,0	2529,5	504,70	2202,0	2706,7	1,5301	5,5970	7,1271
0,225	124,00	0,001064	0,7933	520,47	2013,1	2533,6	520,72	2191,4	2712,1	1,5706	5,5172	7,0878
0,250	127,44	0,001067	0,7187	535,10	2002,1	2537,2	535,37	2181,5	2716,9	1,6072	5,4198	7,0270
0,275	130,60	0,001070	0,6573	548,59	1991,9	2540,5	548,89	2172,4	2721,3	1,6408	5,3801	7,0209
0,300	133,55	0,001073	0,6058	561,15	1982,4	2543,6	561,47	2163,8	2725,3	1,6718	5,3201	6,9919
0,325	136,30	0,001076	0,5620	572,90	1973,5	2546,4	573,25	2155,8	2729,0	1,7006	5,2646	6,9652

Ilustración 53. Presiones agua saturada

Fuente: (John Wiley & Sons,1986, p.1)

18.8 Anexo 8: Características de intercambiadores de calor instalados en CoopeTarrazú

Tabla 63. Características de los intercambiadores de calor

Característica	Detalle
Tipo de calentamiento	Indirecto (vapor-aire)
Consumo	400 lb/h
Presión de trabajo	2,5 bar (35,55 psi)
Temperatura del aire a la entrada	15 °C
Temperatura de aire a la salida	60 °C

Fuente: Araya Rojas et al. (2016, p. 11)

18.9 Anexo 9: Resultado de análisis para reporte operacional de Caldera Wickes Boiler

3. RESULTADOS DE ANÁLISIS DE LABORATORIO POR HORNO O CALDERA:

PARÁMETRO	PTS* (mg/Nm ³)	SO ₂ * (mg/Nm ³)	NOX * (mg/Nm ³)	Flujo (m ³ /hr)	Temp (°C)	Período de medición (hr)	Distancia (m)
VALOR	83.84 ± 0.04	1.4±0.1	92.189±0.001	3639.54 ± 0.54	47.3 ±0.5	0.67	7.40

Fuente: (MACASA, 2021, p.2)

18.10 Anexo 10: Resultado de análisis para reporte operacional de Caldera Lambda, Constructora Field

3. RESULTADOS DE ANÁLISIS DE LABORATORIO POR HORNO O CALDERA:

PARÁMETRO	PTS* (mg/Nm ³)	SO ₂ * (mg/Nm ³)	NOX * (mg/Nm ³)	Flujo (m ³ /hr)	Temp (°C)	Período de medición(hr)	Distancia (m)
VALOR	115.42 ± 0.04	1.4±0.1	122.446±0.001	4 555.83± 0.54	60.5 ±0.5	0.6	7.40

Fuente: (MACASA, 2021, p.2)

18.11 Anexo 11: Poder calórico de biomásas

Tabla 1. Características de los Residuos Agrícolas Orgánicos (RAO) considerados en el estudio

Sectores Agrícolas	Residuos Agrícolas/Pecuarios Orgánicos (RAO)	Contenido Humedad (%)	Balance Masa (t de RAO / t producción sector)	Poder Calórico Superior (MJ/kg)
Café	Pulpa de café	81,0%	0,416	15,88
	Cascarilla de café	11,0%	0,043	17,93
	Mucílago de café	81,0%	0,156	15,88
Arroz	Granza de arroz	15,0%	0,210	15,43
Caña de Azúcar	Bagazo de caña de azúcar	50,0%	0,250	17,50
	Cachaza de caña de azúcar	73,6%	0,300	16,00
	Melaza de caña de azúcar	50,0%	0,350	9,74
	Residuos de Campo de Caña	70,0%	0,232	17,43
Palma Africana	Fibra de Mesocarpio de palma africana	37,0%	0,130	19,43
	Cascarilla de Coquito de palma africana	17,0%	0,050	22,94
	Fibra de Pinzote de palma africana	55,0%	0,220	18,62
Piña	Rastrojo de piña	90,0%	3,290	11,60
	Corona de piña	78,5%	0,003	11,60
Banano	Pinzote de Banano	85,0%	0,094	11,60
	Banano Rechazo	85,0%	0,114	11,60

Sectores Agrícolas	Residuos Agrícolas/Pecuarios Orgánicos (RAO)	Contenido Humedad (%)	Balance Masa (t de RAO / t producción sector)	Poder Calórico Superior (MJ/kg)
Cítricos	Semillas, Cascaras y Pulpas de Naranja	85,0%	0,500	16,55
Aserraderos	Aserrín	32,0%	0,103	18,50
	Leña de aserraderos	50,0%	0,189	18,50
	Otros residuos de aserradero	55,0%	0,111	18,50
	<i>Burucha de aserradero</i>	32,5%	0,008	18,50
Sectores Pecuarios	RAO Pecuario	Contenido Humedad (BH) (%)	Balance Masa (t materia seca / animal / año ³)	Poder Calórico Superior (MJ/kg)
Porcino	Excreta Porcina	85,0%	0,094	13,79
Avícola	Excreta Avícola (Gallinaza)	36,0%	0,004	15,95
Leche	Excreta Bovina Lechera	80,0%	1,773	15,62
Carne	Excreta Bovina Ganadera	80,0%	1,168	15,62

Ilustración 54. Información poder calórico de diferentes fuentes de biomasa

Fuente: Coto Chinchilla (2013, pp. 8-9)

18.12 Anexo 12: Poder calórico inferior del café

Cuadro 8.7. Datos de poder calórico de la cascarilla de café reportados por la literatura.

Fuente	Poder calórico superior PCS/(kJ/g)	Poder calórico inferior PCI/(kJ/g)
1	18,34	-
2	18,06	-
3	18,7	-
4	-	17,2
6	-	17,5
7	18,39	-

Fuente: 1 (Wilson, Geoffrey, Mhilu, Yang, & Blasiak, 2010), 2 (Rodriguez & Gordillo, 2011), 3 (Gómez, Klose, & Rincón, 2008), 4 (Kore, Assefa, Spliethoff, & Mayerhofer, 2013), 5 (Werther, Saenger, Hartge, Ogada, & Siagi, 2000), 6 (Kumar, Purohit, Rana, & Kandpal, 2002), 7 (Suarez & Luengo, 2003).

Ilustración 55. Poder calórico inferior del café

Fuente: Benavides (2014, p. 75)

18.13 Anexo 13: Tablas temperatura de agua saturada

TABLA A-4

Agua saturada. Tabla de temperaturas

Temp., T °C	Pres. sat., P_{sat} kPa	Volumen específico, m^3/kg		Energía interna, kJ/kg			Entalpía, kJ/kg			Entropía, $kJ/kg \cdot K$		
		Líqu. sat., v_f	Vapor sat., v_g	Líqu. sat., u_f	Evap., u_{fg}	Vapor sat., u_g	Líqu. sat., h_f	Evap., h_{fg}	Vapor sat., h_g	Líqu. sat., s_f	Evap., s_{fg}	Vapor sat., s_g
0.01	0.6117	0.001000	206.00	0.000	2374.9	2374.9	0.001	2500.9	2500.9	0.0000	9.1556	9.1556
5	0.8725	0.001000	147.03	21.019	2360.8	2381.8	21.020	2489.1	2510.1	0.0763	8.9487	9.0249
10	1.2281	0.001000	106.32	42.020	2346.6	2388.7	42.022	2477.2	2519.2	0.1511	8.7488	8.8999
15	1.7057	0.001001	77.885	62.980	2332.5	2395.5	62.982	2465.4	2528.3	0.2245	8.5559	8.7803
20	2.3392	0.001002	57.762	83.913	2318.4	2402.3	83.915	2453.5	2537.4	0.2965	8.3696	8.6661
25	3.1698	0.001003	43.340	104.83	2304.3	2409.1	104.83	2441.7	2546.5	0.3672	8.1895	8.5567
30	4.2469	0.001004	32.879	125.73	2290.2	2415.9	125.74	2429.8	2555.6	0.4368	8.0152	8.4520
35	5.6291	0.001006	25.205	146.63	2276.0	2422.7	146.64	2417.9	2564.6	0.5051	7.8466	8.3517
40	7.3851	0.001008	19.515	167.53	2261.9	2429.4	167.53	2406.0	2573.5	0.5724	7.6832	8.2556
45	9.5953	0.001010	15.251	188.43	2247.7	2436.1	188.44	2394.0	2582.4	0.6386	7.5247	8.1633
50	12.352	0.001012	12.026	209.33	2233.4	2442.7	209.34	2382.0	2591.3	0.7038	7.3710	8.0748
55	15.763	0.001015	9.5639	230.24	2219.1	2449.3	230.26	2369.8	2600.1	0.7680	7.2218	7.9898
60	19.947	0.001017	7.6670	251.16	2204.7	2455.9	251.18	2357.7	2608.8	0.8313	7.0769	7.9082
65	25.043	0.001020	6.1935	272.09	2190.3	2462.4	272.12	2345.4	2617.5	0.8937	6.9360	7.8296
70	31.202	0.001023	5.0396	293.04	2175.8	2468.9	293.07	2333.0	2626.1	0.9551	6.7989	7.7540
75	38.597	0.001026	4.1291	313.99	2161.3	2475.3	314.03	2320.6	2634.6	1.0158	6.6655	7.6812
80	47.416	0.001029	3.4053	334.97	2146.6	2481.6	335.02	2308.0	2643.0	1.0756	6.5355	7.6111
85	57.868	0.001032	2.8261	355.96	2131.9	2487.8	356.02	2295.3	2651.4	1.1346	6.4089	7.5435
90	70.183	0.001036	2.3593	376.97	2117.0	2494.0	377.04	2282.5	2659.6	1.1929	6.2853	7.4782
95	84.609	0.001040	1.9808	398.00	2102.0	2500.1	398.09	2269.6	2667.6	1.2504	6.1647	7.4151
100	101.42	0.001043	1.6720	419.06	2087.0	2506.0	419.17	2256.4	2675.6	1.3072	6.0470	7.3542
105	120.90	0.001047	1.4186	440.15	2071.8	2511.9	440.28	2243.1	2683.4	1.3634	5.9319	7.2952
110	143.38	0.001052	1.2094	461.27	2056.4	2517.7	461.42	2229.7	2691.1	1.4188	5.8193	7.2382
115	169.18	0.001056	1.0360	482.42	2040.9	2523.3	482.59	2216.0	2698.6	1.4737	5.7092	7.1829
120	198.67	0.001060	0.89133	503.60	2025.3	2528.9	503.81	2202.1	2706.0	1.5279	5.6013	7.1292
125	232.23	0.001065	0.77012	524.83	2009.5	2534.3	525.07	2188.1	2713.1	1.5816	5.4956	7.0771

Ilustración 56. Tabla de temperatura para el agua saturada

Fuente: Cengel y Boles (2009, p. 914)

18.14 Anexo 14: Cálculo de pérdidas por radiación

6. Calor por radiación (Q_r)

El calor perdido por radiación se calcula midiendo la temperatura y la superficie de la caldera, distinguiendo paredes verticales y horizontales hacia arriba y hacia abajo.

En la Tabla 30 del Anexo se indican las pérdidas expresadas en W/m^2 (si multiplicamos por 0,86 las obtendremos en $kcal/h m^2$).

Al multiplicar por cada superficie se obtienen las pérdidas $kcal/h$.

Si b es el consumo horario de combustible, las pérdidas por radiación se obtendrán de la forma siguiente:

$$Q_r = \frac{Kcal/h}{b} \quad [kcal/unidad\ de\ combustible] \quad [6]$$

También puede emplearse la Tabla 31 para calcular las pérdidas por radiación en función de la producción máxima del vapor y el índice de carga.

Ilustración 57. Fórmula para cálculo de pérdidas de calor por radiación

Fuente: Junta de Castilla y León (2009, p. 202)

18.15 Anexo 15: Pérdidas de calor por paredes exteriores

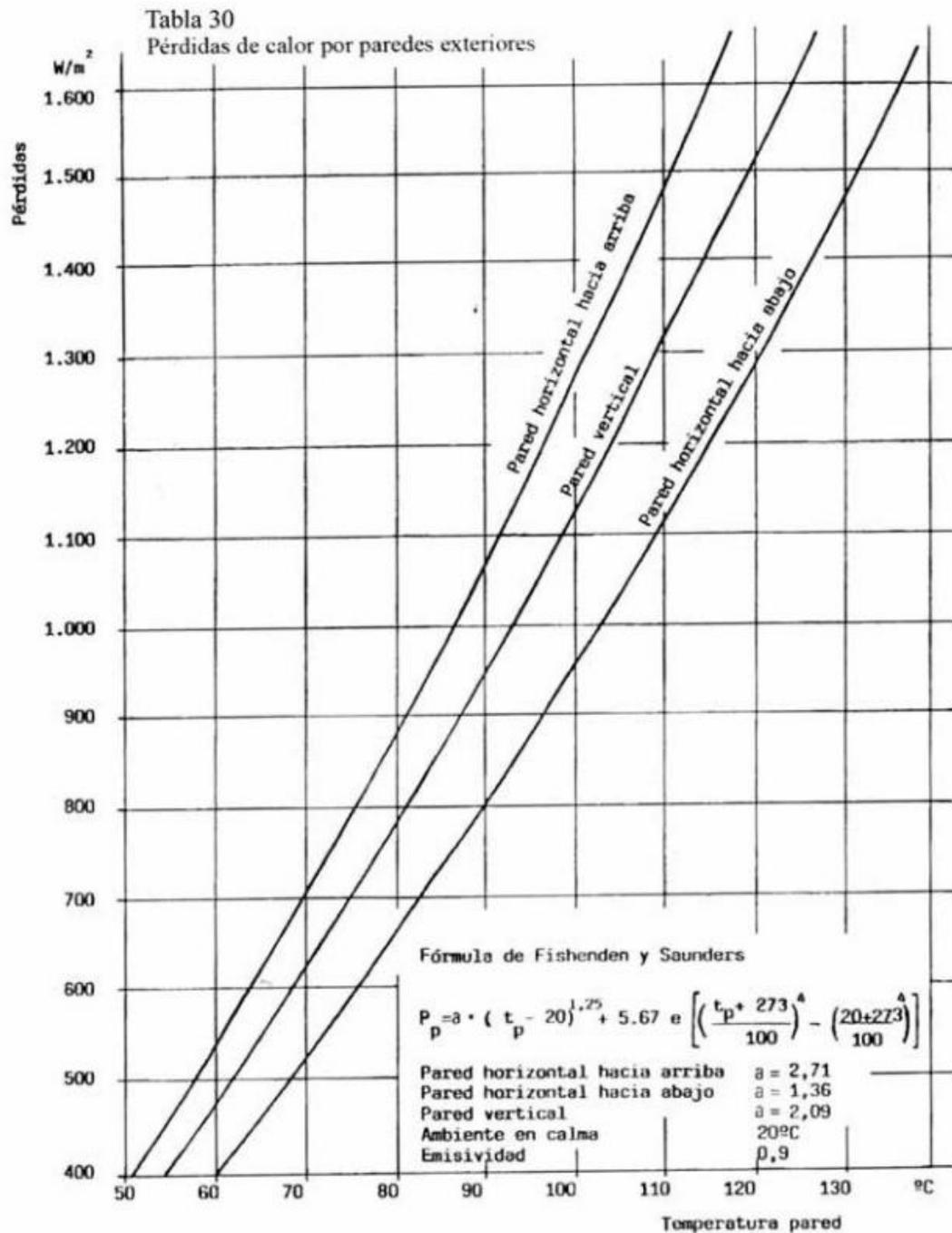


Ilustración 58. Pérdidas de calor por paredes exteriores

Fuente: Junta de Castilla y León (2009, p. 202)

18.16 Anexo 16: Ficha técnica Pelletics



Ficha Técnica del Producto

Pellets de madera																															
Descripción	<table> <tr> <td>Diámetro</td> <td>6mm</td> </tr> <tr> <td>Longitud</td> <td>< 40mm</td> </tr> <tr> <td>Densidad a granel</td> <td>650 kg/m³</td> </tr> <tr> <td>Densidad del pellet</td> <td>1.1-1.2 ton/m³</td> </tr> <tr> <td>Contenido de humedad</td> <td>< 10%</td> </tr> <tr> <td>Contenido de ceniza</td> <td>< 3 %</td> </tr> <tr> <td>Valor Calorífico (recibido)</td> <td>4,440 kcal/kg 18.61 MJ/kg</td> </tr> <tr> <td>Densidad de Energía</td> <td>12,096.5 MJ/m³</td> </tr> <tr> <td>Contenido Volátil</td> <td>91.6%</td> </tr> <tr> <td>temperatura deformación de ceniza</td> <td>1452 °C</td> </tr> <tr> <td>Sulfúricos</td> <td>0.040%</td> </tr> <tr> <td>Nitrogeno</td> <td>< 0.3 %</td> </tr> <tr> <td>Cloro</td> <td>0.013%</td> </tr> <tr> <td>Aditivos</td> <td>< 0.1 %</td> </tr> <tr> <td>Polvo</td> <td>< 1 %</td> </tr> </table>	Diámetro	6mm	Longitud	< 40mm	Densidad a granel	650 kg/m ³	Densidad del pellet	1.1-1.2 ton/m ³	Contenido de humedad	< 10%	Contenido de ceniza	< 3 %	Valor Calorífico (recibido)	4,440 kcal/kg 18.61 MJ/kg	Densidad de Energía	12,096.5 MJ/m ³	Contenido Volátil	91.6%	temperatura deformación de ceniza	1452 °C	Sulfúricos	0.040%	Nitrogeno	< 0.3 %	Cloro	0.013%	Aditivos	< 0.1 %	Polvo	< 1 %
Diámetro	6mm																														
Longitud	< 40mm																														
Densidad a granel	650 kg/m ³																														
Densidad del pellet	1.1-1.2 ton/m ³																														
Contenido de humedad	< 10%																														
Contenido de ceniza	< 3 %																														
Valor Calorífico (recibido)	4,440 kcal/kg 18.61 MJ/kg																														
Densidad de Energía	12,096.5 MJ/m ³																														
Contenido Volátil	91.6%																														
temperatura deformación de ceniza	1452 °C																														
Sulfúricos	0.040%																														
Nitrogeno	< 0.3 %																														
Cloro	0.013%																														
Aditivos	< 0.1 %																														
Polvo	< 1 %																														

Explicación del análisis	
Contenido de Humedad [5-10%]	Entre más alto el contenido de agua, menor contenido de energía Con un contenido de humedad muy alta (>15%) existe el riesgo de descomposición biológica. Nuestros pellets dan un valor calorífico óptimo y la posibilidad de que el producto sufra descomposición biológica está descartada.
Contenido Cenizas [1.5 - 15%]	un contenido de cenizas más alto indica el contenido de materiales ajenos. (aditivos, partículas, otros desechos) un contenido mayor trae el riesgo de escoria* (*revisar temperatura de deformación)
Temperatura de deformación de ceniza [1200 - 1500 °C]	A temperaturas bajas existe el riesgo potencial de escoria o/y de recubrimiento (depende de las condiciones de operación) A temperaturas de deformación más alta habra menos escoria y menos deformación física y química de las cenizas.
Valor Calorífico [16.5 - 18.6 MJ/kg]	El Valor calorífico es la energía total liberada de un combustible quemado en el aire, este incluye el calor de la condensación del agua dentro los combustibles. Representa así la energía máxima potencialmente recuperable de un combustible de biomasa en específico. Un valor calorífico mayor resulta en mejor combustión y mayor economía.

Ilustración 59. Ficha técnica Pelletics

Fuente: Pelletics (2021, p.1)

18.17 Anexo 17: Eficiencia calderas estudio previo

5.1 Estado del sistema de vapor

El beneficio Coopetarrazú cuenta con dos calderas, una acuotubular marca Wickes Boiler 1958 de 400 hp y una caldera pirotubular marca Lamba de 300 hp, las cuales procesan alrededor de 18 035 lb/h de vapor con una eficiencia aproximada de 82% a la Wickes y de 65% de la Lamba, que distribuyen el vapor hacia 32 secadoras de café por medio de los sistemas de tuberías principales hacia un Manifold el cual distribuye vapor a tres ramales y de ahí se dirigen hacia la batería de intercambiadores 1, 2 y 3 que cuentan con 11, 11 y 10 intercambiadores respectivamente, para un total de 32 intercambiadores de calor, a los cuales se extrae aire por convección forzada con ventilador centrífugo que calienta el aire a 60° y lo dirige por los serpentines mediante un sistema de distribución de aire interno.

Ilustración 60. Eficiencia del sistema de vapor en CoopeTarrazú

Fuente: Araya Rojas et al. (2016, p. 7)

18.18 Anexo 18: Fórmula cálculo tasa de condensación

Se pueden introducir otros factores en la ecuación, como por ejemplo, si la tubería estuviera aislada, se produciría una reducción de un 15 % en las pérdidas de calor respecto a una tubería no aislada. En este caso, basta con multiplicar \dot{M} por un factor 0,15.

Donde:

$$\dot{M} = \frac{Q \times L \times 3,6}{h_{fg}} \times f$$

\dot{M} = Tasa de condensación (kg/h)

Q = Emisión calorífica (W/m) (según Tabla 7)

L = Longitud efectiva de tubería, teniendo en cuenta bridas y accesorios(m)

h_{fg} = Entalpía específica de evaporación (kJ/kg)

f = factor de aislamiento. Para tuberías sin aislar f = 1.

Para tuberías bien aisladas f = 0,15.

Ilustración 61. Fórmula cálculo de tasa de condensación

Fuente: Spirax Sarco (1999, p. 47)

18.19 Anexo 19: Propiedades del gas ideal aire

TABLA A-17

Propiedades de gas ideal del aire

T K	h kJ/kg	P_r	u kJ/kg	v_r	s° kJ/kg · K	T K	h kJ/kg	P_r	u kJ/kg	v_r	s° kJ/kg · K
200	199.97	0.3363	142.56	1707.0	1.29559	580	586.04	14.38	419.55	115.7	2.37348
210	209.97	0.3987	149.69	1512.0	1.34444	590	596.52	15.31	427.15	110.6	2.39140
220	219.97	0.4690	156.82	1346.0	1.39105	600	607.02	16.28	434.78	105.8	2.40902
230	230.02	0.5477	164.00	1205.0	1.43557	610	617.53	17.30	442.42	101.2	2.42644
240	240.02	0.6355	171.13	1084.0	1.47824	620	628.07	18.36	450.09	96.92	2.44356
250	250.05	0.7329	178.28	979.0	1.51917	630	638.63	19.84	457.78	92.84	2.46048
260	260.09	0.8405	185.45	887.8	1.55848	640	649.22	20.64	465.50	88.99	2.47716
270	270.11	0.9590	192.60	808.0	1.59634	650	659.84	21.86	473.25	85.34	2.49364
280	280.13	1.0889	199.75	738.0	1.63279	660	670.47	23.13	481.01	81.89	2.50985
285	285.14	1.1584	203.33	706.1	1.65055	670	681.14	24.46	488.81	78.61	2.52589
290	290.16	1.2311	206.91	676.1	1.66802	680	691.82	25.85	496.62	75.50	2.54175
295	295.17	1.3068	210.49	647.9	1.68515	690	702.52	27.29	504.45	72.56	2.55731
298	298.18	1.3543	212.64	631.9	1.69528	700	713.27	28.80	512.33	69.76	2.57277
300	300.19	1.3860	214.07	621.2	1.70203	710	724.04	30.38	520.23	67.07	2.58810
305	305.22	1.4686	217.67	596.0	1.71865	720	734.82	32.02	528.14	64.53	2.60319
310	310.24	1.5546	221.25	572.3	1.73498	730	745.62	33.72	536.07	62.13	2.61803
315	315.27	1.6442	224.85	549.8	1.75106	740	756.44	35.50	544.02	59.82	2.63280
320	320.29	1.7375	228.42	528.6	1.76690	750	767.29	37.35	551.99	57.63	2.64737
325	325.31	1.8345	232.02	508.4	1.78249	760	778.18	39.27	560.01	55.54	2.66176
330	330.34	1.9352	235.61	489.4	1.79783	780	800.03	43.35	576.12	51.64	2.69013
340	340.42	2.149	242.82	454.1	1.82790	800	821.95	47.75	592.30	48.08	2.71787
350	350.49	2.379	250.02	422.2	1.85708	820	843.98	52.59	608.59	44.84	2.74504
360	360.58	2.626	257.24	393.4	1.88543	840	866.08	57.60	624.95	41.85	2.77170
370	370.67	2.892	264.46	367.2	1.91313	860	888.27	63.09	641.40	39.12	2.79783
380	380.77	3.176	271.69	343.4	1.94001	880	910.56	68.98	657.95	36.61	2.82344
390	390.88	3.481	278.93	321.5	1.96633	900	932.93	75.29	674.58	34.31	2.84856
400	400.98	3.806	286.16	301.6	1.99194	920	955.38	82.05	691.28	32.18	2.87324
410	411.12	4.153	293.43	283.3	2.01699	940	977.92	89.28	708.08	30.22	2.89748
420	421.26	4.522	300.69	266.6	2.04142	960	1000.55	97.00	725.02	28.40	2.92128
430	431.43	4.915	307.99	251.1	2.06533	980	1023.25	105.2	741.98	26.73	2.94468
440	441.61	5.332	315.30	236.8	2.08870	1000	1046.04	114.0	758.94	25.17	2.96770
450	451.80	5.775	322.62	223.6	2.11161	1020	1068.89	123.4	776.10	23.72	2.99034
460	462.02	6.245	329.97	211.4	2.13407	1040	1091.85	133.3	793.36	23.29	3.01260
470	472.24	6.742	337.32	200.1	2.15604	1060	1114.86	143.9	810.62	21.14	3.03449
480	482.49	7.268	344.70	189.5	2.17760	1080	1137.89	155.2	827.88	19.98	3.05608
490	492.74	7.824	352.08	179.7	2.19876	1100	1161.07	167.1	845.33	18.896	3.07732
500	503.02	8.411	359.49	170.6	2.21952	1120	1184.28	179.7	862.79	17.886	3.09825
510	513.32	9.031	366.92	162.1	2.23993	1140	1207.57	193.1	880.35	16.946	3.11883
520	523.63	9.684	374.36	154.1	2.25997	1160	1230.92	207.2	897.91	16.064	3.13916
530	533.98	10.37	381.84	146.7	2.27967	1180	1254.34	222.2	915.57	15.241	3.15916
540	544.35	11.10	389.34	139.7	2.29906	1200	1277.79	238.0	933.33	14.470	3.17888
550	555.74	11.86	396.86	133.1	2.31809	1220	1301.31	254.7	951.09	13.747	3.19834
560	565.17	12.66	404.42	127.0	2.33685	1240	1324.93	272.3	968.95	13.069	3.21751
570	575.59	13.50	411.97	121.2	2.35531						

Ilustración 62. Propiedades del gas ideal aire

Fuente: Cengel y Boles (2009, p. 934)

18.20 Anexo 20: Factores de emisión dióxido de carbono en combustibles comunes

Combustible	Factor de emisión (kg CO ₂ /L combustible)	Incertidumbre		Incertidumbre estándar recomendada
		Límite inferior	Límite superior	
Gasolina	2,231	4,59%	5,89%	2,76%
Diesel	2,613	3,12%	3,19%	1,66%
Búnker	3,101	3,57%	3,65%	1,90%
Queroseno	2,541	3,83%	4,10%	2,09%
LPG	1,611	8,41%	9,16%	4,62%
Gasolina de avión	2,227	7,94%	23,50%	8,46%
Jet fuel	2,505	4,68%	5,32%	2,63%
Lubricante	2,549	11,74%	12,74%	6,44%

Ilustración 63. Factores de emisión de dióxido de carbono para combustibles comunes

Fuente: Instituto Meteorológico Nacional (2021, p. 2)

18.21 Anexo 21: Factores de emisión dióxido de carbono en usos de electricidad

Año	Factor de emisión kg CO ₂ e/kWh	Incertidumbres	
		Límite inferior	Límite superior
2020	0,0282	6,4%	6,4%
2019	0,0365	1,37%	1,37%
2018	0,0395	ND	ND
2017	0,049	ND	ND
2016	0,0557	ND	ND
2015	0,0381	ND	ND
2014	0,1170	ND	ND

Ilustración 64. Factores de emisión de dióxido de carbono en usos de electricidad

Fuente: Instituto Meteorológico Nacional (2021, p. 4)

18.22 Anexo 22: Líneas poliducto territorio nacional

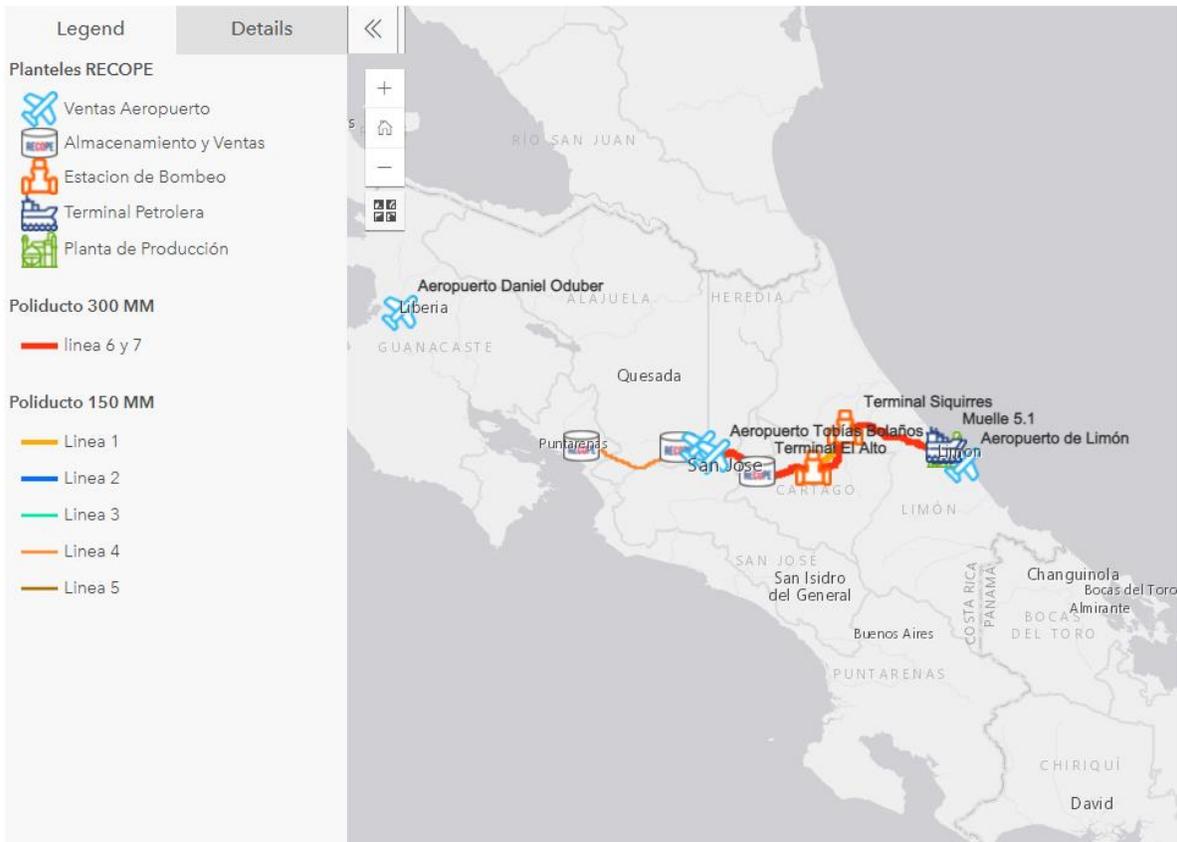


Ilustración 65. Poliducto Recope en el territorio nacional

Fuente: RECOPE (2022)

18.23 Anexo 23: Distancia "Terminal El Alto" hasta CoopeTarrazú

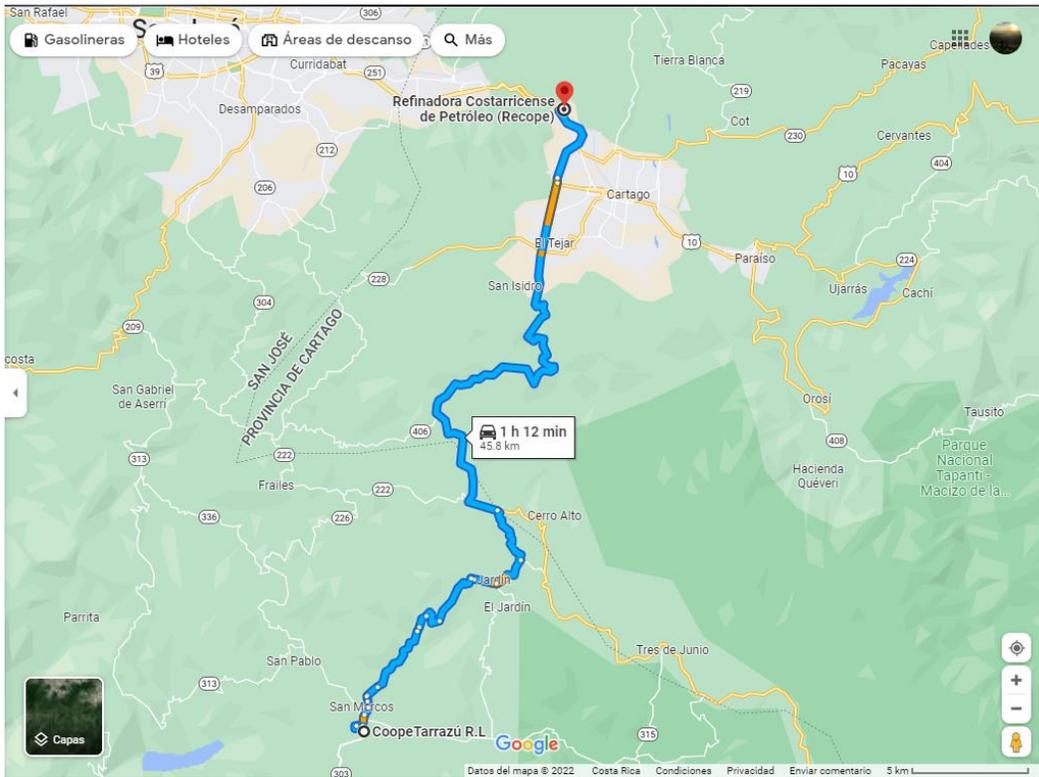


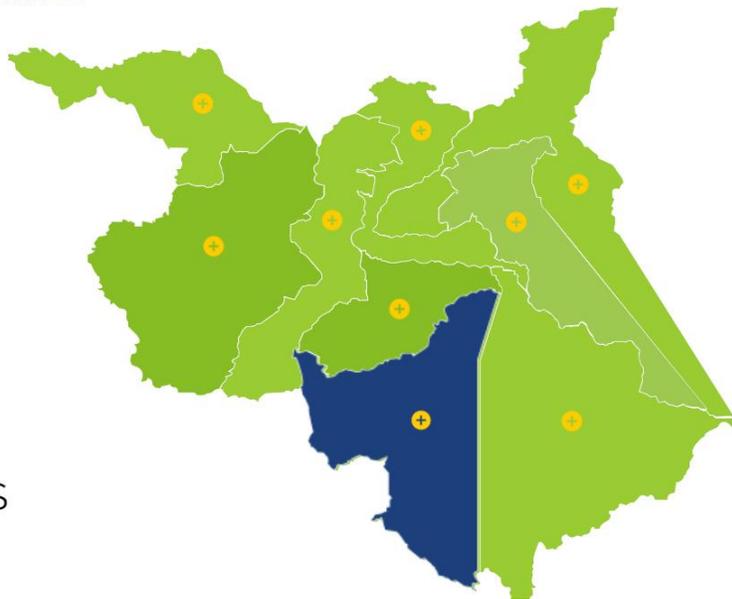
Ilustración 66. Distancia "Terminal El Alto" hasta CoopeTarrazú

Fuente: Google (2022)

18.24 Anexo 24: Rango de cobertura Coopesantos en el cantón de Tarrazú

CANTONES ELECTRIFICADOS

Acosta
Aserri
Cartago
Desamparados
Dota
El Guarco
León Cortés
Mora
Tarrazú



N° DE SERVICIOS

7013

Ilustración 67. Electrificación en Tarrazú

Fuente: Coopesantos (2022)

18.25 Anexo 25: Pictogramas de peligro

>		Gas a presión Símbolo: bombona de gas
>		Explosivo Símbolo: bomba explotando
>		Comburente Símbolo: llama sobre un círculo
>		Inflamable Símbolo: llama
>		Corrosivo Símbolo: corrosión
>		Peligro para la salud Símbolo: signo de exclamación
>		Toxicidad aguda Símbolo: calavera y tibias cruzadas
>		Peligro grave para la salud Símbolo: peligro para la salud
>		Peligro para el medio ambiente Símbolo: medio ambiente

Ilustración 68. Pictogramas de peligro

Fuente: ECHA (2022)

18.26 Anexo 26: Factores de conversión

Factores de conversión

DIMENSIÓN	MÉTRICO	MÉTRICO/INGLÉS
Aceleración	1 m/s ² = 100 cm/s ²	1 m/s ² = 3.2808 ft/s ² 1 ft/s ² = 0.3048* m/s ²
Área	1 m ² = 10 ⁴ cm ² = 10 ⁶ mm ² = 10 ⁻⁶ km ²	1 m ² = 1 550 in ² = 10.764 ft ² 1 ft ² = 144 in ² = 0.09290304* m ²
Densidad	1 g/cm ³ = 1 kg/L = 1 000 kg/m ³	1 g/cm ³ = 62.428 lbm/ft ³ = 0.036127 lbm/in ³ 1 lbm/in ³ = 1 728 lbm/ft ³ 1 kg/m ³ = 0.062428 lbm/ft ³
Energía, calor, trabajo, energía interna, entalpía	1 kJ = 1 000 J = 1 000 N · m = 1 kPa · m ³ 1 kJ/kg = 1 000 m ² /s ² 1 kWh = 3 600 kJ 1 cal ¹ = 4.184 J 1 IT cal ¹ = 4.1868 J 1 Cal ¹ = 4.1868 kJ	1 kJ = 0.94782 Btu 1 Btu = 1.055056 kJ = 5.40395 psia · ft ³ = 778.169 lbf · ft 1 Btu/lbm = 25 037 ft ² /s ² = 2.326* kJ/kg 1 kJ/kg = 0.430 Btu/lbm 1 kWh = 3 412.14 Btu 1 termia = 10 ⁵ Btu = 1.055 × 10 ⁵ kJ (gas natural)
Fuerza	1 N = 1 kg · m/s ² = 10 ⁵ dina 1 kgf = 9.80665 N	1 N = 0.22481 lbf 1 lbf = 32.174 lbm · ft/s ² = 4.44822 N
Flujo de calor	1 W/cm ² = 10 ⁴ W/m ²	1 W/m ² = 0.3171 Btu/h · ft ²
Coefficiente de transferencia de calor	1 W/m ² · °C = 1 W/m ² · K	1 W/m ² · °C = 0.17612 Btu/h · ft ² · °F
Longitud	1 m = 100 cm = 1 000 mm = 10 ⁶ μm 1 km = 1 000 m	1 m = 39.370 in = 3.2808 ft = 1.0926 yd 1 ft = 12 in = 0.3048* m 1 milla = 5 280 ft = 1.6093 km 1 in = 2.54* cm
Masa	1 kg = 1 000 g 1 tonelada métrica = 1 000 kg	1 kg = 2.2046226 lbm 1 lbm = 0.45359237* kg 1 onza = 28.3495 g 1 slug = 32.174 lbm = 14.5939 kg 1 ton corta = 2 000 lbm = 907.1847 kg
Potencia, velocidad de transferencia de calor	1 W = 1 J/s 1 kW = 1 000 W = 1.341 hp 1 hp ¹ = 745.7 W	1 kW = 3 412.14 Btu/h = 737.56 lbf · ft/s 1 hp = 550 lbf · ft/s = 0.7068 Btu/s = 42.41 Btu/min = 2544.5 Btu/h = 0.74570 kW 1 hp de caldera = 33 475 Btu/h 1 Btu/h = 1.055056 kJ/h 1 ton de refrigeración = 200 Btu/min
Presión	1 Pa = 1 N/m ² 1 kPa = 10 ³ Pa = 10 ⁻³ MPa 1 atm = 101.325 kPa = 1.01325 bars = 760 mm Hg a 0°C = 1.03323 kgf/cm ² 1 mm Hg = 0.1333 kPa	1 Pa = 1.4504 × 10 ⁻⁴ psia = 0.020886 lbf/ft ² 1 psi = 144 lbf/ft ² = 6.894757 kPa 1 atm = 14.696 psia = 29.92 in Hg a 30°F 1 in Hg = 3.387 kPa
Calor específico	1 kJ/kg · °C = 1 kJ/kg · K = 1 J/g · °C	1 Btu/lbm · °F = 4.1868 kJ/kg · °C 1 Btu/lbmol · R = 4.1868 kJ/kmol · K 1 kJ/kg · °C = 0.23885 Btu/lbm · °F = 0.23885 Btu/lbm · R

* Factores de conversión exactos entre las unidades métricas e inglesas.

¹La caloría se define originalmente como la cantidad de calor requerida para aumentar 1°C la temperatura de 1 g de agua, pero ésta varía con la temperatura. La caloría de la tabla de vapor internacional (IT), generalmente preferida por los ingenieros, es exactamente 4.1868 J por definición y corresponde al calor específico del agua a 15°C. La caloría termoquímica, por lo general preferida por los físicos, es exactamente 4.184 J por definición y corresponde al calor específico del agua a temperatura ambiente. La diferencia entre las dos es aproximadamente 0.06 por ciento, lo cual es despreciable. La Caloría con inicial mayúscula utilizada por los nutriólogos en realidad es una kilocaloría (1 000 calorías IT).

Ilustración 69. Factores de conversión

Fuente: Cengel y Boles (2009)

18.27 Anexo 27: Información técnica quemador modelo Y-2000

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS		
MODELO Y-2000		
Potencia calórica.	Max	2 500* kW
	Min.	350* kW
Consumo eléctrico	Encendiendo	10 507 W
	Régimen normal	8 736 W
Consumo de combustible	Max.	500 kg/h
	Min.	70 kg/h
Mecanismo de control	PLC con pantalla táctil	
Regulación	Sonda integrada, Señales externas de Marcha/Paro, potencia independiente y control analógico 4-20mA	
Tipo de regulación	Modulante con 3 potencias + señal externa	
Rango de regulación por temperatura	0 - 1 100 °C	
Temperatura máxima de seguridad	Configurable	
Alimentación eléctrica	400 VAC / 50-60Hz	
Peso bruto	705 kg	
Eficiencia	99%	

* Potencia estimada utilizando pellet de calidad EN Plus A1 y un rendimiento energético de 5 kW/kg

** Vease especificación completa del cuadro de control en su ficha técnica

v03

Ilustración 70. Características quemador modelo Y-2000

Fuente: Natural Fire (2022)

18.28 Anexo 28: Tarifa eléctrica Coopesantos R.L. que paga el beneficio

COOPESANTOS R.L. 2022

Alcance N° 63 del 30-03-2022 II TRIMESTRE

	Estructura sin CVG	01 de abril al 30 de junio	Diferencia II trimestre
T-MT MEDIA TENSIÓN			
<i>Cargo por Potencia</i>			
Período punta Por cada kW	11 354,34	11 515,57	161,23
Período valle por cada Kw	8 247,95	8 365,07	117,12
Período nocturno por cada kW	5 192,53	5 266,26	73,73
<i>Cargo por energía</i>			
Período punta por cada kWh	74,31	75,37	1,06
Período valle por cada kWh	29,73	30,15	0,42
Período nocturno por cada kWh	19,11	19,38	0,27

Ilustración 71. Tarifa eléctrica de Coopesantos R.L.

Fuente: Coopesantos (2022)

18.29 Anexo 29: Cálculo costo por kW/h según consumo de la empresa

Energía						
Período	Tarifa CoopeSantos	Anterior	Actual	Diferencia	Costo	
Punta (kW)	₡ 74.73	2,237,909.1750	2,305,017.3150	67,108.14	₡	5,014,991.30
Valle (kW)	₡ 29.90	4,434,799.7700	4,541,040.7650	106,241.00	₡	3,176,605.75
Nocturno (kW)	₡ 19.22	5,717,139.4350	5,871,821.4000	154,681.97	₡	2,972,987.37
Fin de Semana (kW)	₡ -	751,860.1350	751,860.1350	-	₡	-
Máxima demanda						
		Fechas Máxima	Consumo	Mínimo		
Punta (kWh)	₡ 11,418.28	02/02/2022	935.64	27.00	₡	10,683,399.50
Valle (kWh)	₡ 8,294.40	04/02/2022	934.20	27.00	₡	7,748,628.48
Nocturno (kWh)	₡ 5,221.77	02/02/2022	978.48	27.00	₡	5,109,397.51
Fin de Semana (kWh)	₡ -	-	0.00	0.00	₡	-

12,184.73 ₡/kWh

Ilustración 72. Cálculo costo kWh por consumo de energía en la empresa

Fuente: Información suministrada por la empresa CoopeTarrazú R.L. (2022)

18.30 Anexo 30: Indicadores económicos para supuestos de inflación, periodo 2021-25

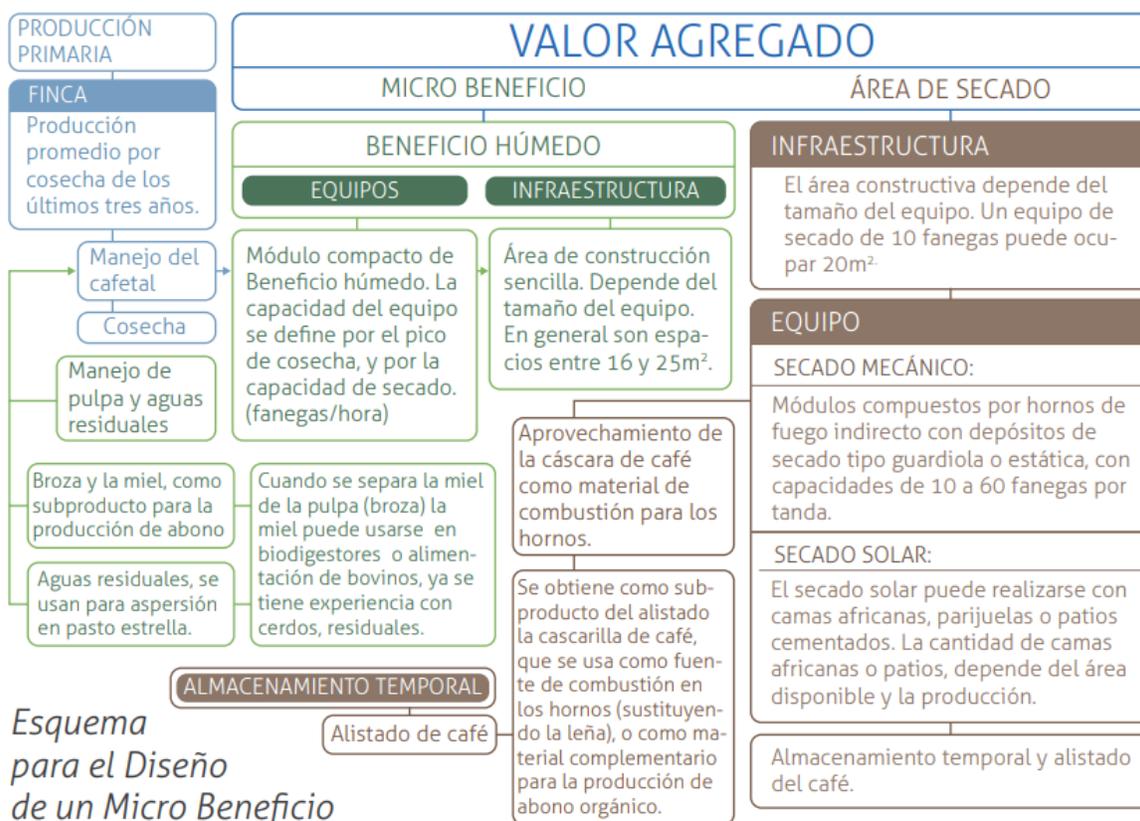
	2021	2022	2023	2024	2025
Inflación	1,4%	1,0%	1,3%	2,0%	2,4%
Crecimiento real del PIB	2,6%	3,3%	3,1%	3,2%	3,2%
Crecimiento nominal del PIB	4,0%	4,3%	4,4%	5,2%	5,7%
Tasa efectiva de interés	8,1%	8,0%	7,3%	7,0%	6,9%
Relación deuda a PIB	72,5%	75,0%	76,0%	75,6%	74,2%

Fuente. Fondo Monetario Internacional. Artículo IV, marzo 2021

Ilustración 73. Indicadores económicos, supuestos de inflación período 2021-25

Fuente: Ministerio de Hacienda (2021, p. 54)

18.31 Anexo 31: Uso cascarilla en procesos de secado



Esquema para el Diseño de un Micro Beneficio

Ilustración 74: Aplicación cascarilla en micro beneficio

Fuente: MAG (2014, p. 49)

Anexo III

CARTA DE AUTORIZACIÓN PARA USO Y MANEJO DE LOS TRABAJOS
FINALES

DE GRADUACIÓN UNIVERSIDAD TÉCNICA NACIONAL

Página | 37

(Trabajo Individual)

Ciudad,

Fecha. 05/09/2022

Señores/as

Vicerrectoría de Investigación. Sistema Integrado de Bibliotecas y Recursos Digitales

Estimados señores/as:

Yo Juan Elias Barrios Vargas portador (a) de la cédula de identidad número 207730707. En mi calidad de autor (a) del trabajo de graduación titulada:

"Análisis de las diferentes fuentes energéticas para el proceso de secado de café en la empresa Competrazú, para el segundo semestre del año 2021 y primero del 2022"

El cual se presenta bajo la modalidad de, marque una opción:

Proyecto de Graduación

Tesis de Graduación

Presentado en la fecha 01/09/22 DIA/MES/AÑO, autorizo a la Universidad Técnica Nacional, sede Central, para que mi trabajo pueda ser manejado de la siguiente manera:

Autorizo
Ver capítulo V, disposiciones finales, artículo 41 (O aquel que refiera a derechos patrimoniales)

Marque con una X o un ✓	
Conservación de ejemplares para préstamo y consulta física en biblioteca.	✓
Inclusión en el catálogo digital del SIBIREDI (Cita catalográfica)	✓
Comunicación y divulgación a través del Repositorio Institucional	✓
Resumen (Describe en forma breve el contenido del documento)	✓
Consulta electrónica con texto protegido	✓
Descarga electrónica del documento en texto completo protegido	✓
Inclusión en bases de datos y sitios web que se encuentren en convenio con la Universidad Técnica Nacional contando con las mismas condiciones y limitaciones aquí establecidas.	✓
Divulgación del resumen en el Repositorio UTN, con una cantidad de 200 a 500 palabras	✓

Página | 38

Por otra parte, declaro que el trabajo que aquí presento es de plena autoría, es un esfuerzo realizado de forma personal, académica e intelectual con plenos elementos de originalidad y creatividad. Garantizo que no contiene citas, ni transcripciones de forma indebida que puedan devenir en plagio, pues se ha utilizado la normativa vigente de la American Psychological Association (APA). Las citas y transcripciones utilizadas se realizan en el marco de respeto a las obras de terceros. La responsabilidad directa en el diseño y presentación son de competencia exclusiva, por tanto, eximo de toda responsabilidad a la Universidad Técnica Nacional.

Consciente de que las autorizaciones no reprimen mis derechos patrimoniales como autor del trabajo. Confío en la que Universidad Técnica Nacional respete y haga respetar mis derechos de propiedad intelectual.

Firma del estudiante: 

Cédula: 207730707

Día: 05/09/2022

(Reformado mediante Acuerdo 9-3-2021, tomado por el Consejo Universitario en la Sesión Ordinaria No. 3-2021, celebrada el jueves 11 de febrero de 2021, a las nueve horas, según el Artículo 12. Publicado en el diario oficial La Gaceta No. 39 del 25 de febrero del 2021, sección de Reglamentos).