

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DE LA OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO
DE EXTRACCIÓN DE JUGO DE CAÑA EN UN TRAPICHE PANELERO POR
MEDIO DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL PROCESO DISOLUCIÓN-
EXTRUSIÓN**



JHOVANNA SUÁREZ VALDÉS

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXÁCTAS Y DE LA EDUCACIÓN
INGENIERÍA FÍSICA
GRUPO DE DISEÑO SIMULACIÓN Y CONTROL DSC
POPAYÁN
2011**

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DE LA OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO
DE EXTRACCIÓN DE JUGO DE CAÑA EN UN TRAPICHE PANELERO POR
MEDIO DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL PROCESO DISOLUCIÓN-
EXTRUSIÓN**

JHOVANNA SUÁREZ VALDÉS

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
Ingeniera Física**

Director

Dr. Germán A. Bacca B.

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXÁCTAS Y DE LA EDUCACIÓN
INGENIERÍA FÍSICA
GRUPO DE DISEÑO SIMULACIÓN Y CONTROL DSC
POPAYÁN**

2011

Nota de aceptación

Director _____
Dr. Germán A. Bacca B.

Jurado _____
Dr. Modesto Fajardo

Jurado _____
Ing. Pablo Javier Salazar

Fecha de sustentación: Popayán, 09 de Agosto de 2011

AGRADECIMIENTOS

Se justifica vivir si el mundo es un poco mejor, cuando uno muera, como resultado de su trabajo y esfuerzo. Todos no podemos ser protagonistas de la historia; pero como células que somos de ese gran cuerpo universal humano, somos sin embargo conscientes de que cada uno de nosotros puede hacer algo por mejorar el mundo en que vivimos y en el que vivirán los que nos sigan. Este triunfo lo quiero dedicar especialmente a mis primeros maestros, los dos seres humanos que me enseñaron a vivir con dignidad y buscando siempre la libertad, mi papá Saúl Suarez Roldan y a mi abuelo Guillermo Valdés Alegría que aunque físicamente ya no estén entre nosotros viven en mi mente recordándome a cada instante que la oportunidad que Dios me dio de estar en este universo lleva consigo la responsabilidad de luchar por nuestros ideales a pesar de la adversidad.

A mi madre gratitud y bendiciones por ser siempre esa palabra de ánimo, esa mano fuerte que me sostiene, ese abrazo cálido, por ser mi mayor inspiración, a mis hermanos Tatiana, Mauricio, Liliana y Andrés gracias a los cuatro por su cariño, comprensión y apoyo a lo largo de mi vida sobre todo en esta carrera. A mis sobrinos Anderson, Karen, Brayan, Camila, Juan David y Samuel por darme tantas alegrías y recordarme lo hermoso de la vida en las pequeñas cosas. A mis estudiantes quienes me enseñaron con su ejemplo de vida lo que es realmente ser héroe, a ellos que a pesar de las circunstancias no pierden la ilusión de ver a nuestro país un lugar mejor. A personas que con orgullo puedo llamar amigos Oscar, Daniel y Alberto, quienes han vivido esta etapa de mi vida como propia, gracias a sus consejos, apoyo e incondicionalidad.

Al hombre que dignifica la palabra amistad, Diego Andrés Campo Ceballos, gracias por darme la oportunidad de compartir a tu lado parte de mi existencia, por ser mi guía, mi apoyo, mi luz, mi polo a tierra, gracias por compartir mis tristezas y alegrías, por ser voz de aliento cuando sentía que ya no podía, gracias por no perder la fe en mi, nada de esto hubiera sido posible sin ti, te quiero mucho. A la profesora Sonia Gaona quien ha sido mi guía durante este proceso, sus consejos y amistad han sido una bendición. A mis profesores quienes me han compartido un poco de su conocimiento, a ellos muchas gracias por su confianza y enseñanza. A mis compañeros que con su alegría y apoyo también contribuyeron a la realización de esta meta. Gracias Dios por poner tantas personas maravillosas en mi vida, por darme a través de cada uno de ellos un regalo de vida, un ángel guardián.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	15
CAPITULO I.....	16
1. INTRODUCCIÓN	16
1.1. Planteamiento del problema y motivación	17
1.2. Objetivos del trabajo.....	18
1.2.1. Objetivo general.....	18
1.2.2. Objetivos específicos	18
1.3. Organización del documento.....	19
1.4. Contribución.....	20
CAPITULO II.....	21
2. MARCO TEÓRICO.....	21
2.1. Agroindustria panelera en Colombia.....	21
2.2. El sector panelero en el departamento del Cauca.....	22
2.3. El sector panelero en la Vega (Cauca).	22
2.4. Grupo de Producción La Laja.....	23
2.5. Legislación sobre la Producción de Panela en Colombia.....	24
2.6. Descripción del proceso tradicional de producción de panela en el país.	26
2.7. Requisitos de la calidad de la panela.....	30
2.8. El trapiche Panelero.....	32
2.8.1. Hornillas Utilizadas en los Trapiches Paneleros.....	33
2.8.2. Los Molinos utilizados en los Trapiches Paneleros	34
2.8.3. Método Disolución-Extrusión.....	39
2.9. Modelos para el diagnóstico energético de los trapiches	40
2.9.1. Balance de masas	41
2.9.2. Balance de energía	48
2.9.3. Calculo de consumos energéticos en el trapiche panelero	53

2.9.4. Índices para el diagnóstico energético del proceso de producción de panela.	62
CAPITULO III	65
3. MATERIALES Y METODOS	65
3.1. Medición de pH	65
3.2. Medición de Temperatura.....	67
3.3. Medición de concentración de sólidos solubles (°Brix).....	69
3.4. Análisis fisicoquímico de la panela.....	70
3.5. Implementación del Método Disolución-Extrusión	71
3.5.1. Montaje Experimental del Método de Disolución-Extrusión en el Trapiche Panelero La Laja (Vega Cauca).....	71
3.6. Remoción de impurezas	75
3.7. Cálculos de gastos energéticos	75
CAPITULO IV	76
4. ANALISIS Y RESULTADOS	76
4.1. Aspectos socioeconómicos del lugar de trabajo.....	76
4.1.1 Resultados de las Encuestas realizadas en la población de trabajo.....	76
4.2. Proceso de Elaboración Tradicional de Panela Seguido en el Grupo de Producción de La Laja.....	78
4.2.1. Instalaciones del Trapiche Panelero.....	78
4.2.2. Proceso de Elaboración de la Panela.....	82
4.2.3. Parámetros de Interés en el Proceso Tradicional de Fabricación de Panela ..	92
4.3. Diagnóstico Energético del Proceso Productivo Tradicional de Panela	104
4.3.1. Balance de masas	105
4.3.2. Balance de energía	110
4.3.3. Cálculo de consumos energéticos en el proceso de fabricación de la panela	114
4.3.4. Índices de diagnóstico del proceso tradicional de fabricación de panela.....	120
4.4. Proceso de Fabricación de la Panela Usando el Método Disolución-Extrusión para la Extracción de los Jugos de la Caña Panelera.....	124
4.4.1. El Tallo de la Caña de Azúcar y los Fenómenos Involucrados a Nivel Celular	125
4.4.2. Ósmosis.....	127

4.4.3.	Disolución	129
4.4.4.	Lixiviación	131
4.4.5.	Extrusión	132
4.4.6.	Parámetros de Interés en el Proceso de Fabricación de Panela utilizando el Método Disolución – Extrusión en la Etapa de Extracción de Jugo de Caña.....	133
4.5.	Diagnóstico Energético del proceso productivo de panela implementando el método Disolución-Extrusión.....	151
4.5.1.	Balance de masas	151
4.5.2.	Balance de energía	156
4.5.3.	Calculo de consumos energéticos	159
4.5.4.	Índices de diagnóstico del proceso de fabricación de panela.....	162
4.6.	Estudio de factibilidad del método disolución-extrusión para la etapa de extracción de los azúcares de la caña comparado con el método tradicional de mizas.	166
4.7.	Caracterización de la panela producida en el trapiche	172
4.7.1.	Panela obtenida mediante el procesamiento de los jugos obtenidos por el método tradicional.	172
4.7.2.	Panela obtenida mediante el procesamiento de los jugos obtenidos por el método Disolución-Extrusión.....	173
4.7.3.	Análisis Físicoquímico de la Panela	174
CAPITULO V		175
5. CONCLUSIONES		175
BIBLIOGRAFIA.....		178
ANEXO A		181
ANEXO B		183
ANEXO C		184
ANEXO D		186
ANEXO E.....		187
ANEXO F.....		188
ANEXO G		196
ANEXO H		198

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1. Requisitos físico-químicos de la panela en cuadro	32
Tabla 2.2. Requisitos físico-químicos de la panela granulada o en polvo	32
Tabla 2.3. Porcentaje de fibra de caña (<i>f</i>).....	37
Tabla 2.4. Composición aproximada de la caña de azúcar	44
Tabla 2.5. Composición aproximada del bagazo	45
Tabla 2.6. Valor combustible del bagazo según su humedad	50
Tabla 2.7. Perdida en los Gases de Chimenea según su temperatura de salida	52
Tabla 3.1. Especificaciones de funcionamiento del pH-metro	66
Tabla 3.2. Especificaciones de funcionamiento del termómetro de alimentos	68
Tabla 3.3. Especificaciones de funcionamiento del Refractómetro manual	70
Tabla 4.1. Población de la zona productiva de estudio	77
Tabla 4.2. Economía de la región.....	77
Tabla 4.3. Economía de la panela en la zona	77
Tabla 4.4. Condiciones de los trapiches paneleros	77
Tabla 4.6. Promedio de los datos obtenidos de la medición de los °Brix de 20 muestras de caña del cultivo seleccionado para la molienda.	95
Tabla 4.7. Estado de madurez de la caña de acuerdo con el índice de madurez.....	96
Tabla 4.8. Datos obtenidos en la etapa de Extracción de los jugos de caña.	97
Tabla 4.9. Especificaciones Técnicas del Molino R-2.....	98
Tabla 4.10. Datos obtenidos de las variables de interés de la etapa de pre-limpieza.....	99
Tabla 4.11. Datos obtenidos de la primera descachazada de los jugos de caña.....	100
Tabla 4.12. Datos obtenidos de los parámetros a la hora de adicionar el cadillo a los jugos	101
Tabla 4.13. Parámetros considerados en la etapa de concentración	101
Tabla 4.14. Datos de las variables de interés en la etapa de concentración de los jugos...	101
Tabla 4.15. Datos de tiempo y temperatura para la etapa de punteo	103
Tabla 4.16. Parámetros de interés en la etapa de punteo de los jugos de caña	103

Tabla 4.17. Cálculos del balance de masas en la etapa de combustión del proceso de producción de panela	108
Tabla 4.18. Cálculos del balance de masas en la etapa de producción del proceso de producción de panela	110
Tabla 4.19. Cálculos del balance de energía en el proceso de producción de panela.....	113
Tabla 4.21. Cálculos de las necesidades energéticas en el proceso de producción por cada 100 Kg de jugo procesado, extraído por molienda tradicional.	119
Tabla 4.22. Índices de diagnóstico del proceso de fabricación de panela con los jugos extraídos por el método de molienda tradicional de mazas.	124
Tabla 4.23. Promedio de la variación de los grados brix dependiendo del tamaño de la caña	136
Tabla 4.24. Promedio de la variación de los grados brix con caña desfibrada	137
Tabla 4.25. Datos promedio del tamaño de caña desfibrada de 5 cm con diferentes volúmenes de agua	137
Tabla 4.26. Promedio de los valores para los °Brix en disolvente agua – jugo.....	138
Tabla 4.27. Promedio de los datos obtenidos (16 veces) de la medición de los °Brix de 20 muestras de caña del cultivo para un día de molienda.....	140
Tabla 4.28. Estado de madurez de la caña de acuerdo con el índice de madurez.....	141
Tabla 4.29. Datos Obtenidos de la Primera Fase de la Extracción de los Azucares.....	141
Tabla 4.30. Promedio de los Datos Obtenidos de la Segunda Fase de la Extracción de los Azucares.....	142
Tabla 4.31. Promedio de los Datos Obtenidos de los parámetros de interés de los jugos en la fase dos.....	142
Tabla 4.32. Promedio de los Datos Obtenidos de la Tercera Fase de la Extracción de los Azucares.....	143
Tabla 4.33. Datos en la eficiencia de extracción del Método Disolución-Extrusión.....	144
Tabla 4.34. Promedio de los Datos obtenidos de las variables de interés de la etapa de pre-limpieza.....	145
Tabla 4.35. Datos obtenidos de la primera descachazada de los jugos de caña.....	145
Tabla 4.36. Datos obtenidos de los parámetros a la hora de adicionar el cadillo a los jugos	145

Tabla 4.37. Promedio de los Datos de las variables en la etapa de concentración de los jugos de la paila 1.....	147
Tabla 4.38. Promedio de los Datos de las variables en la etapa de concentración de los jugos de la paila 2.....	147
Tabla 4.39. Promedio de los Datos de las variables en la etapa de concentración de los jugos de la paila 3.....	148
Tabla 4.40. Parámetros considerados en la etapa de concentración	146
Tabla 4.41. Datos de tiempo y temperatura para la etapa de punteo	148
Tabla 4.42. Parámetros de interés en la etapa de punteo de los jugos de caña	149
Tabla 4.43. Cálculos del balance de masas en la etapa de combustión del proceso de producción de panela	154
Tabla 4.44. Cálculos del balance de masas en la etapa de producción del proceso de producción de panela	155
Tabla 4.45. Cálculos del balance de energía en el proceso de producción de panela.....	158
Tabla 4.46. Cálculos de las necesidades energéticas en el proceso de producción de panela por cada 100 Kg de jugo mezclado procesado.....	161
Tabla 4.47. Índices de diagnóstico del proceso de fabricación de panela con los jugos extraídos por el método de Disolución-Extrusión.....	165

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Diagrama esquemático del proceso de producción de la panela	29
Figura 2.2. Presentaciones de la panela como producto final	30
Figura 2.3. Esquema General del Trapiche Panelero	33
Figura 2.4. Hornilla típica de 3 pailas	33
Figura 2.5. Tipos de molinos en un trapiche de panela tradicional.....	35
Figura 2.6. Diagrama esquemático del balance de masa para el proceso de producción de panela, a) balance de masas para la combustión, b) balance de masas en la etapa de producción.....	41
Figura 2.7. Diagrama del proceso de producción de panela	42
Figura 2.8. Diagrama del balance de masa para el trapiche panelero	42
Figura 2.9. Relación de conservación de la energía.....	48
Figura 2.10. Diagrama esquemático del balance de energía para el proceso de combustión en una hornilla panelera.	49
Figura 2.11. Flujos energéticos a través del sistema, en la etapa de combustión de la producción de panela.	49
Figura 2.12. Esquema del proceso de calentamiento de los jugos	54
Figura 2.13. Esquema del proceso de concentración de los jugos	58
Figura 2.14. Diagrama de flujo de los procesos en los que se involucran los gastos energeticos en el proceso de produccion de panela	59
Figura 2.15. Modelo utilizado para estimar las masas de agua evaporada	60
Figura 3.1. Fotografía del pH-metro manual	67
Figura 3.2.1. Fotografía del Termómetro de alimentos utilizado	67
Figura 3.3. Fotografía del Refractómetro Manual	69
Figura 3.4. Esquema del Montaje Experimental del Método de Disolución-Extrusión	72
Figura 3.5. Sistema de extracción solido-liquido mediante aparato soxhlet.....	73
Figura 3.6. Aparato típico de lecho fijo para un proceso de lixiviación.	74
Figura 4.1. Ubicación del municipio de La Vega-Cauca	79
Figura 4.2. Mapa del Municipio de la Vega	79
Figura 4.3. Instalaciones del trapiche Comunitario de la Laja del corregimiento de Santa Juana del Municipio de la Vega (Cauca).	80
Figura 4.4. Corte y apronte de caña panelera.....	83
Figura 4.5. Molino para la obtención del jugo de la caña y del bagazo.....	83
Figura 4.6. Espacio para el secado del bagazo.....	84
Figura 4.7. Pre-limpieza del jugo de caña recién extraído.....	85
Figura 4.8. Hornilla panelera	81
Figura 4.9. Chimenea de la hornilla panelera	82

Figura 4.10. Pailas de la hornilla panelera	81
Figura 4.11. Inicio del proceso de descachace y adición de cadillo	86
Figura 4.12. Jugo descachazado.....	86
Figura 4.13. Etapa de evaporación y concentración de los jugos de caña	87
Figura 4.14. Concentración de los jugos, medición de la cantidad de sólidos solubles.....	87
Figura 4.15. Adición de cera de laurel a las pailas.....	88
Figura 4.16. Etapas de evaporacion y concentracion del los jugos hasta el punto.	88
Figura 4.17. Punto de la panela procesada.....	89
Figura 4.18. Verificación manual del punto de la panela procesada.	89
Figura 4.19. Traslado de las mieles al recipiente de batido	90
Figura 4.20. Depósito, moldeo y formación de la panela	91
Figura 4.21. Diagrama de Bloques del Proceso Tradicional de Producción de Panela	91
Figura 4.23. Molino Panelero R-2	99
Figura 4.24. Partes del Tallo de la Caña	126
Figura 4.25. Molécula de Sacarosa	127
Figura 4.26. Esquema del Proceso de Osmosis	127
Figura 4.27. Membrana Semipermeable	129
Figura 4.28. Célula Vegetal del tallo de caña de azúcar y el efecto de la temperatura en su membrana.....	130
Figura 4.30. Diagrama de bloques del proceso de fabricación de panela utilizando el Método Disolución – Extrusión	150
Figura 4.31. Diagrama comparativo de índices energéticos del proceso de producción de panela	168

GLOSARIO

APRONTE: Tiempo que permanece la caña almacenada en las instalaciones del trapiche hasta que entra a proceso.

AZÚCARES REDUCTORES: Monosacáridos (glucosa y fructosa) que resultan de la hidrólisis de la molécula de sacarosa.

BAGACERA: Área destinada al almacenamiento del bagazo.

BAGACILLO: Restos más pequeños de bagazo (polvillo).

BAGAZO: Parte sólida (fibra) que resulta de la extracción del jugo de la caña.

°BRIX: Unidad de medida para determinar la cantidad de azúcar presente en el jugo de caña. Es tomada con la ayuda de un refractómetro.

CACHACERA: Paila de hierro o acero inoxidable donde se deposita la cachaza resultante de la clarificación.

CACHAZA: Remanente compuesto por bagazo, tierra, colorantes, proteínas, celulosa y otras impurezas que flotan sobre la superficie de los jugos al efectuar la clarificación.

CADILLO: Mucilago vegetal utilizado para la limpieza de los jugos.

CERA: Agente lubricante y antiespumante utilizado en la elaboración de la panela.

COCHADA: La producción, en las panelas, el guarapo o miel que hace el primer fondo o la última paila.

DESCACHAZADORA: Paila de hierro o acero inoxidable donde se realiza la clarificación de los jugos.

FONDOS: Recipientes metálicos, en donde los jugos y mieles de la caña reciben energía para realizar las operaciones de clarificación, evaporación y concentración.

GAVERA: Moldes de madera con diferentes formas y tamaños que se utilizan para dar forma a la panela.

GRANO: Textura final de la panela que puede ser fino (panela dura) o grueso (panela blanda).

MATERIAS EXTRAÑAS: Son los restos de vegetales, de insectos, huevos de insectos, larvas, pelos de roedores, arena, tierra, u otro tipo de impurezas presentes en la panela.

MUCÍLAGO: Sustancia mucilaginosa de origen vegetal que permite el aglutinamiento de las impurezas en la superficie de los jugos de caña facilitando y mejorando el proceso de limpieza y clarificación

PCI: (poder calorífico inferior) :Es la cantidad total de calor desprendido en la combustión completa de una unidad de volumen de combustible sin contar la parte correspondiente al calor latente del vapor de agua generado en la combustión, ya que no se produce cambio de fase, y se expulsa como vapor.

PANELA MELCOCHA: Panela con deficiencias de textura (blanda).

PRELIMPIADOR: Equipo situado inmediatamente después de la molienda, encargado de separar por densidad las impurezas mayores contenidas en los jugos.

PUNTO DE PANELA: Punto en el cual las mieles alcanzan una concentración cercana a los 94 °Brix, y están listas para sacarlas de la hornilla hacia el cuarto de moldeo.

REMELLÓN: Cucharón que se emplea para pasar las mieles de un fondo a otro, generalmente fabricado con una paila sujeta a un palo.

SÓLIDOS SEDIMENTABLES: Cantidad de materia extraña (arena, tierra y otros) que se determinan por sedimentación.

TALLADOR: Persona encargada del proceso de molienda de la caña

RESUMEN

En este trabajo se ha realizado el estudio para determinar el grado de efectividad de un método alternativo para la extracción de jugo de caña planteado por el Ingeniero Francisco José Montaña Fuentes, al proceso campesino y popular del Municipio de la Vega (Cauca). Partiendo de varios supuestos como la existencia de un proceso alternativo de extracción del jugo de caña panelera por medio de la implementación del método de disolución-extrusión, el documento revela los diferentes análisis que permite comparar este proceso con el que han utilizado centenariamente las comunidades agrarias de diversos países.

El texto recoge la experiencia de la producción de panela de la Comunidad de la vereda La Laja (Vega - Cauca), y señala la forma como esta comunidad enfrenta las disposiciones legislativas, y buscan nuevas propuestas que permitan optimizar su producción panelera. Este trabajo de investigación se acerca a su vida diaria, a sus problemáticas, pero también señala las posibilidades a futuro, desde un análisis técnico epistemológico de la realidad productiva.

En el examen minucioso de aspectos fundamentales para la comprensión de las etapas de disolución- extrusión, se examinan perfiles que se soportan en el análisis matemático y técnico de balance energético y de masas, para profundizar en aspectos de inocuidad, eficiencia, efectividad y calidad productiva en la viabilidad del cambio de referente productivo.

Finalmente se presentan los resultados de los análisis energéticos de los dos procesos utilizados, el tradicional de mazas y el método disolución-extrusión, las conclusiones finales y sugerencias para el mejoramiento del proceso de producción de panela según lo estipula la ley.

CAPITULO I

1. INTRODUCCIÓN

El trabajo de grado, en modalidad de pasantía, presenta dos elementos que son: la comprobación de unas aplicaciones técnicas, y la otra es la de ver su resultado directamente en las comunidades involucradas con los procesos productivos parcelarios, examinando su eficiencia, rentabilidad y capacidad, frente a otro método de producción tradicional.

Esta investigación usa la Ingeniería física como herramienta para examinar la efectividad del diseño de la planta procesadora de panela comunitaria utilizando el método de disolución-extrusión, en la etapa de extracción del jugo de la caña panelera, presentada por el Ingeniero Agroindustrial de la Universidad del Cauca Francisco José Montaña Fuentes, a la Fundación Despertar dentro del Proceso campesino y popular del Municipio de La Vega como una forma de preservar la producción artesanal de la panela, base de la alimentación campesina, tanto a nivel colombiano como de otros países.

Este trabajo permite reexaminar como se ha usado el proceso para la extracción de los azúcares presentes en la caña. Poder medir su efectividad, rapidez y rendimiento, y explicarlo desde un proceso físico – mecánico de manera científica.

Es fundamental señalar que sobre la utilización del método disolución-extrusión para el proceso de la extracción de los azúcares de la caña no existen referencias bibliográficas, por lo que se han tenido que fundamentar numerosos aspectos que no se habían previsto inicialmente, aumentando la complejidad del trabajo. En el proceso de investigación se hizo indispensable profundizar en los conceptos mecánicos de extrusión y compresión, así como en los procesos bioquímicos y físicos de la osmosis, ósmosis inversa, lixiviación y disolución, buscando la manera de explicar el método disolución-extrusión, ya que en la propuesta presentada por el ingeniero Montaña no se encuentra información suficiente y apropiada sobre el funcionamiento y organización del nuevo método.

En este trabajo de investigación se ejecuta un plan o estrategia con el fin de examinar si dicha propuesta logra alcanzar los objetivos propuestos, respondiendo a las preguntas del Proceso Campesino y Popular del Municipio de la Vega – Fundación Despertar, sometiendo a contraste las hipótesis iniciales, con el funcionamiento in situ del experimento.

Se parte de una pregunta central que involucra la efectividad de un proceso desconocido aún en un medio real: ¿Será el método de disolución – extrusión una alternativa real para la extracción de los azúcares de la caña para la elaboración de panela?

Al tener en cuenta la complejidad del proceso de obtención del jugo de la caña y su transformación en panela a través del método de disolución extrusión, y la coordinación de etapas como la fase de calentamiento inicial del agua, con la subsiguiente extrusión y la posterior evaporización y concentración de los jugos y la utilización de energía en dichas etapas, inicialmente la hipótesis dada, es que este proceso no podría ser rentable.

1.1. Planteamiento del problema y motivación

Se constituye la producción y consumo de la panela en un patrimonio cultural, social y económico de las comunidades agrarias se convierte así, en un elemento importante de la soberanía alimentaria, puesto que su producción se ha realizado en pequeñas parcelas en donde el capital activo es mínimo. Ahora las leyes que regulan la producción como la resolución 000779 de marzo 17 de 2006 de imposible aplicación para los productores individuales, por lo que el Proceso campesino y Popular del Municipio de La Vega se propone la construcción de un trapiche comunitario que agrupe a 103 familias paneleras del corregimiento de Santa Juana que cumpla con los requisitos sanitarios establecidos en la resolución, pero con la posibilidad de cambiar la forma tradicional de extraer los jugos de la caña a través de los molinos de mazas por el **proceso de disolución- extrusión**, propuesta presentada por el Ingeniero Montaña, que garantizaría la inocuidad del proceso y el

aumento en la producción de panela; propuesta que en este trabajo de investigación ha sido analizada.

Por lo tanto el objetivo central de este proyecto será evaluar la efectividad de este método en un espacio real, establecer cuál es su grado de efectividad, productividad, rendimiento, inocuidad del producto así como las facilidades de manejo. Estas constataciones permitirán ver si es indispensable que se implemente el **proceso de disolución- extrusión** a un nivel más amplio en las comunidades que producen panela.

1.2. Objetivos del trabajo

1.2.1. Objetivo general

Estudiar la factibilidad de la optimización del proceso de extracción de jugo de caña con la implementación del proceso disolución-extrusión para la planta procesadora de panela comunitaria de economía campesina del grupo la Laja perteneciente al corregimiento de Santa Juana del Municipio de la Vega (Cauca).

1.2.2. Objetivos específicos

- ✓ Realizar el estudio del desempeño energético del trapiche panelero perteneciente al grupo de producción La Laja del corregimiento de Santa Juana.
- ✓ Analizar las condiciones de funcionamiento del trapiche panelero con el fin de establecer las modificaciones requeridas al proceso y/o equipos con el fin de cumplir con la normatividad existente.
- ✓ Realizar el estudio de viabilidad de la implementación del método de disolución – extrusión dentro del proceso de la extracción del jugo de la caña para la elaboración de la panela del trapiche del grupo de producción la Laja.

- ✓ Proponer mejoras para obtener un mayor porcentaje de jugo de caña, variando el método tradicional utilizado en la fabricación de panela en el trapiche del grupo de producción la Laja.

1.3. Organización del documento

El documento presente se ha dividido en cinco capítulos de acuerdo a los procesos que se han realizado. En el capítulo I se encuentra el planteamiento del problema, los objetivos del trabajo, la motivación y contribución del mismo para las comunidades campesinas paneleras de la región.

En el capítulo II se establece una comprensión de los elementos generales de la producción de la panela y su importancia en la economía del país, se analiza las disposiciones jurídicas y su significado para la producción panelera tradicional, así como la relación contextual del sitio objeto del experimento, con el fin de aclarar cuáles serán las condiciones técnicas y sociales, los modelos para el diagnóstico energético de los trapiches. Finalmente, en este capítulo se hace una breve explicación del método de extracción de jugo de la caña por el método de disolución extrusión.

En el capítulo III se describen todos los materiales y métodos que se van a utilizar para el desarrollo de este trabajo de investigación.

En el capítulo IV se caracteriza la producción de la panela en el Corregimiento de Santa Juana, específicamente en la vereda de la Laja, en el cual se desarrolla el estudio de campo. Se muestran procedimientos matemáticos de balances de masas y energía tanto para el proceso tradicional de elaboración de panela como para el trapiche cuando se modifica la etapa de extracción de jugo de caña por el Método de Disolución – Extrusión. Para de esta forma identificar las falencias o las ventajas, para su posible implementación. En este capítulo se determinan índices que permitieran diagnosticar el desempeño energético del trapiche.

Además se establece la comparación de los resultados obtenidos por el método tradicional de mazas con el método disolución-extrusión, realizando un análisis de los dos procesos, en el que se establecen los parámetros de comparación desde la efectividad, energía, balance de masas y se muestran los valores obtenidos en el proceso de investigación, dilucidando las etapas que conforman los diferentes procesos de transformación de la caña panelera en el producto final, demostrando técnicamente sus valores y referencias. En el capítulo V: se listan las conclusiones y las sugerencias que deberá atender el colectivo campesino y popular del Municipio de la Vega para lograr un mejor desarrollo social, tan especial y diverso como el Macizo Colombiano.

1.4. Contribución

El Ministerio de la Protección Social a través de la resolución 000779 de 2006 establece el reglamento técnico sobre los requisitos sanitarios que se deben cumplir en la producción y comercialización de la panela para consumo humano, requisitos que individualmente el productor campesino no llega a cumplir por sus condiciones económicas; la Fundación Despertar ha visto la posibilidad de construir una planta procesadora de panela comunitaria que cumpla con dichas especificaciones, la propuesta que han recibido de diseño para dicha planta propone un nuevo método para la extracción de los azúcares de la caña; este trabajo estudio la factibilidad de implementación del método, el resultado de dicha investigación le permite a la Fundación determinar la implementación del nuevo método o el mejoramiento del ya existente, para garantizar las condiciones de producción de panela de 103 familias que viven de este producto.

CAPITULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Agroindustria panelera en Colombia.

La ubicación estratégica de Colombia en el hemisferio Sur América ofrece la posibilidad de obtener diversas variedades de productos agrícolas que han conseguido posicionarse tanto en la producción nacional como internacional (banano, café, panela, etc.).

Entre estos, la agroindustria panelera en el ámbito regional y nacional es de suma importancia, tanto a nivel socio - económico como nutricional. Contamos con el consumo de panela más alto del mundo con un promedio de 23 kilos por persona. Somos los segundos productores a nivel mundial después de la India. La caña contribuye con el 6.7% a la formación del Producto Interno Bruto (PIB) agrícola. La mayoría de las actividades de producción se realizan dentro de esquemas de economía campesina en unidades de pequeña escala [1].

La agroindustria panelera se considera la actividad productiva que más utiliza unidades de trabajo por hectárea cosechada y beneficiada. Se estima que existen cerca de 70.000 unidades agrícolas que cultivan la caña panelera y 15.000 trapiches en los que se elabora panela y miel de caña, en la actualidad se emplean cerca de 25 millones de jornales y se vinculan a esta actividad alrededor de 350.000 personas, es decir, el 12 % de la población rural económicamente activa, siendo el segundo renglón generador de empleo después del café [2]. Se puede afirmar que el consumo de panela constituye uno de los rasgos característicos de la identidad cultural de la nacionalidad colombiana. La panela se produce en casi todo el país durante todo el año y constituye la economía básica de 236 municipios, en doce departamentos del país [3]. Las regiones colombianas más productoras de panela son Cundinamarca, Santander, Antioquia, Boyacá, Cauca y Nariño, departamentos que concentran más de las dos terceras partes de la producción nacional, los rendimientos obtenidos por hectárea cosechada son muy heterogéneos, debido a las diferencias en los contextos socioeconómicos y tecnológicos en que se desarrolla la producción.

2.2. El sector panelero en el departamento del Cauca.

En general, se tiene que la producción de panela es realizada en forma artesanal, con bajos niveles de incorporación de avance técnico. La principal zona de producción de panela se ubica en los municipios de Cajibío, Morales, Piendamó y el Tambo. Es un renglón de la producción que brinda condiciones materiales de vida a toda la comunidad campesina de este departamento. Se considera que alrededor de 2500 familias campesinas derivan su sustento semanal de este producto, por ejemplo en el Municipio de la Vega (Cauca) de los 13 corregimientos que lo conforman en 9 de ellos, la panela corresponde el segundo factor de ingresos. La producción de panela es permanente debido a la técnica de producción conocida como el “entresaque”, la cual permite que no la producción sea cada semana [4].

2.3. El sector panelero en la Vega (Cauca).

La Vega cabecera Municipal del Municipio que lleva el mismo nombre, con 3.500 habitantes, dista a 120 Kilómetros de la ciudad de Popayán capital del Departamento del Cauca, tiene 65 Kilómetros de carretera destapada y un viaje normalmente dura 5 horas.

El Relieve del municipio es montañoso con laderas muy inclinadas y pequeños valles. Las alturas varían entre los 700 y los 4.400 m.s.n.m. Al ser sus suelos con alta pendiente son poco aptos para la ganadería y cultivos intensivos. Sin embargo hay conflictos por uso del suelo, deforestación, cultivos ilícitos, expansión de la colonización y sistemas de producción inadecuados. Posee una exuberante vegetación en donde se conjugan la vegetación ecuatorial, con la flora sub andina, andina y alto andina; el 45% del municipio está constituido por páramos.

Economía del Municipio de La Vega, el sector agropecuario constituye el sector dinámico sobre el que recae el peso de la economía del Municipio de La Vega. Es la actividad productiva de la población campesina del municipio, la que sustenta el producto interno local, de la misma manera que la economía campesina genera los escasos recursos propios del municipio, pues son los únicos que constitucionalmente tributan.

Para finales de 2006, los principales productos orgánicos producidos en el Municipio de La Vega eran café, caña panelera, maíz, yuca, plátano, trigo, hortalizas y verduras. Otros renglones de la economía como la ganadería de leche y carne, especies menores y frutas son en su mayoría actividades de autoconsumo, puesto que las comunidades indígenas y campesinas en la región no tienen un buen excedente de producción que les permita mantener una eficiente comercialización, no obstante es conocido el Municipio de La Vega por sus diferentes condiciones tanto de suelo como de clima.

2.4. Grupo de Producción La Laja.

El Colectivo de producción de la Vereda La Laja en el Corregimiento de Santa Juana hunde sus raíces en todo el trabajo de constitución del Proceso Campesino y Popular del Municipio de La Vega que se inicia a finales de la década de los 80, y que hoy sirve de grupo de producción anfitrión para la realización de esta investigación sobre la panela, específicamente sobre la viabilidad de la implementación del método Difusión – Extrusión que fue propuesto a la organización para ser implementado como una tecnología apropiada para la producción parcelaria de panela. A partir de diversas dinámicas de organización, las comunidades campesinas del Municipio de La Vega llegaron a la conclusión que recuperar, conservar y mejorar el proceso productivo de la economía parcelaria es algo fundamental, toda vez que de ella depende las condiciones materiales de su existencia biológica y cultural. Nacen ideas básicas como la Autonomía y la Soberanía alimentaria.

Así, desde 1987, la Asociación Comunal de Juntas del Municipio de La Vega, que fue la forma como nació el Proceso Campesino, inició a un análisis de la producción agropecuaria del Municipio, las costumbres de producción, las costumbres de consumo, circuitos de intercambio, la calidad de sus suelos y de los productos indispensables para generar dicha soberanía alimentaria. Una primera evaluación sirvió para diagnosticar la situación organizativa de los campesinos del municipio respecto a los grupos de producción. Se crea las ASPROS, expresión que ha servido de sigla para referirse a las Asociaciones de Productores.

Nace de esa manera la Asociación de Productores de Alimentos de La Vega, ASPROVEGA como la forma de combatir la cadena productiva agroindustrial del narcotráfico, que tiene como nefasta consecuencia hacer los cultivos de coca parte de los campesinos que se constituyen de esa forma en una de las primeras víctimas de esta agroindustria. Además porque los ubica como la causa del problema y no como víctimas de esta actividad. El trabajo con respecto a este eje consolidó el Plan Ambiental Agropecuario y de Salud “Aurora”, el cual plasma nuestra política estratégica.

La panela producto que constituye condición de vida para las comunidades de esta región toda vez que es el producto de cuyo intercambio las familias campesinas obtienen su sustento semanal, mientras que el café provee un ingreso anual. Esta región con un promedio de altitud de 900 metros sobre el nivel del mar es ideal para la producción de caña panelera y forma parte del ámbito cultural de comunidades indígenas yanaconas con quienes intercambian sus productos de clima frío. Para este Colectivo de Producción ser anfitrión de esta investigación es muy importante, porque entiende lo que está en juego al perfeccionar el proceso productivo de la panela en las condiciones parcelarias de producción.

2.5. Legislación sobre la Producción de Panela en Colombia.

En 1940 durante la presidencia de Eduardo Santos se toma la decisión de reservar la elaboración de panela como producción agrícola artesanal, de modo que este proceso productivo se mantuvo sin mayor vigilancia por parte del estado hasta 1979, cuando se promulga la ley 9, esta ley regula entre otras cosas la parte de alimentos altamente perecederos y se dictan medidas sanitarias para el control de estos establecimientos, además el artículo 567 reconocía que los trapiches paneleros son una actividad artesanal por lo que el ministerio de salud no podría exigirles la licencia sanitaria de funcionamiento, pero si se empezó a contabilizar los trapiches artesanales exigiendo documentación, visita de corroboración y nomenclatura. Después, en 1990 bajo el mandato de Gaviria, la ley 40 sigue la misma línea de orientación según la cual se protege la pequeña producción panelera, al definirla como una actividad agrícola desarrollada mediante la utilización de

trapiches, con esta ley se buscó prohibir la elaboración falsa de panela por los ingenios, sin embargo estos siguieron sacando panela de azúcar derretida.

La ley 40 de 1990, diferencia los tipos de trapiches en artesanales o domésticos de los comerciales, en el artículo 7 dicta que toda persona natural o jurídica que opere un trapiche panelero, para poder funcionar, deberá inscribir dicho establecimiento ante la dirección local de salud, sin establecer diferencia entre los trapiches artesanales y los de carácter comercial.

El 27 de junio 1995 con la **RESOLUCIÓN 002284** se dictan medidas de carácter sanitario, de la producción, elaboración y comercialización de la panela, en esta resolución se considera que **los trapiches paneleros no son en sentido estricto fábricas de alimentos sino establecimientos dedicados a una actividad artesanal que no requieren licencia sanitaria de funcionamiento**, sino que deben someterse a un régimen especial para efectos de su inscripción y control sanitario, en los términos previstos en la Ley 40 de 1990, la cual establece una nomenclatura para identificar la inscripción de un trapiche según codificación determinada por el Ministerio de Salud, para las licencias sanitarias de funcionamiento de las fábricas de alimentos.

Con el **decreto 3075 de 1997** bajo el enunciado de que la salud es un bien de interés público se dictan normas sobre el funcionamiento de todas las fábricas y establecimientos donde se procesan los alimentos, regulando las actividades de fabricación, procesamiento, preparación, envase, almacenamiento, transporte, distribución y comercialización de alimentos en el territorio nacional, así como para la distribución, importación, exportación y comercialización de materias primas para alimentos.

En abril de 2003, se formó el Comité Nacional para vigilar la calidad de la panela, con el fin de “controlar y prevenir la producción ilegal de panela a través de los “derretideros de azúcar”. Catorce meses después el presidente Uribe, expide la **Resolución 2546 del 2 de junio de 2004** *“Por la cual se establece el reglamento técnico de emergencia sobre la producción y comercialización de la panela para el consumo humano y se dictan otras*

disposiciones”. Se menciona en el acto administrativo, que en la panela se han encontrado sustancias blanqueadoras y colorantes aditivos.

La **Resolución 000779 del 17 de marzo de 2006** reglamento de forma permanente la producción y comercialización de la panela para el consumo humano, que era lo que hacía la resolución 2546 de 2004 que tenía carácter de reglamento de emergencia y como tal caducaría al año de su entrada en vigencia. La resolución 000779 reglamenta condiciones sanitarias de los trapiches y de las centrales de acopio de mieles vírgenes, sobre el envase, embalaje, rotulado, reenvase, almacenamiento, distribución, transporte y comercialización. Si estas disposiciones no se cumplen las autoridades pueden realizar decomisos y cierres de trapiches.

En la **resolución 3462 del 11 de septiembre de 2008** se dictan disposiciones, para exigir registro de inscripción ante el Invima a los trapiches paneleros y centrales de acopio de mieles vírgenes procedentes de trapiches. Se establecen sanciones de no cumplimiento, como multas sucesivas hasta por una suma equivalente a 10.000 salarios diarios mínimos legales vigentes.

2.6. Descripción del proceso tradicional de producción de panela en el país.

La panela se obtiene de la evaporación del jugo de caña. Sus principales componentes nutricionales son: azúcares (sacarosa, glucosa y fructosa), vitaminas (A, C, D, E y algunas del complejo B), y minerales (potasio, calcio, fósforo, magnesio, hierro, cobre, zinc y manganeso, entre otros). Entre los carbohidratos, el azúcar sacarosa es el principal constituyente de la panela, con un contenido que varía entre 75 y 85% del peso seco. Por su parte, los azúcares reductores (glucosa y fructosa entre 6 y 15%) poseen una disponibilidad de uso inmediato para el organismo, lo cual representa una gran ventaja energética, estos son fácilmente metabolizados por el cuerpo, transformándose en energía necesaria requerida por el mismo [5].

La unidad productiva tradicional de panela se conoce como trapiche. La producción de panela no ha variado a través de los años, ya que el producto se obtiene como resultado de la evaporación del jugo de caña, sin mayor tratamiento. El proceso en general consiste en el corte de la caña, el molido y extracción del jugo de la caña, separación de impurezas, calentamiento del jugo, descachazar, evaporar hasta el punto de panela, realizar el batido y finalmente el envasado [6]. El proceso de fabricación de panela se inicia con el corte de la caña. Hay dos formas de realizar esta tarea: una es por parejo¹, la otra por entresaque o desguíe². Una vez cortada la caña debe ser alzada y transportada al molino. El apronte o almacenamiento de caña previo a la iniciación de la molienda, se hace con el propósito de mantener abastecido de caña al molino. La caña debe permanecer almacenada el menor tiempo posible.

Una vez iniciada la molienda la caña pasa a través del molino en el cual por presión física se le extrae el jugo que se compone del 18-22% de sólidos solubles, un porcentaje variable menos del 15% de sólido insoluble y el resto agua, obteniéndose además el bagazo. En la cámara de combustión el bagazo reacciona con aire para obtener energía térmica, produciendo gases calientes y cenizas, los gases calientes contribuyen a la evaporación del jugo de caña. La cantidad de jugo depende de las condiciones de operación del molino.

El bagazo se denomina "bagazo verde" y su humedad depende del grado de extracción del molino, fluctuando entre 50 y 60%. Este bagazo se almacena hasta alcanzar una humedad inferior al 30% valor necesario en las cámaras de combustión de las hornillas para poder utilizarlo como combustible. El jugo se conoce como "jugo crudo" o "sin clarificar" y es pasado a través de sistemas de pre-limpieza con el fin de retener la mayor cantidad de impurezas y así facilitar el proceso de clarificación. El jugo pasa a la paila recibidora a una temperatura cercana a la del ambiente para iniciar su calentamiento hasta 50 o 55°C, una vez alcanzada esta temperatura se adicionan los agentes clarificantes: los mucílagos vegetales obtenidos de la maceración de las cortezas de balsa, cadillo y guásimo³. La etapa

¹ Corte a ras de suelo de toda la mata de caña sin dejar colinos

² Corte únicamente de las cañas maduras

³ El balsa, cadillo y guásimo tienen la propiedad de desprender el mucílago (sustancia orgánica)

de clarificación tiene como fin eliminar los sólidos de suspensión, las sustancias coloidales y algunas sustancias colorantes presentes en el jugo.

Las impurezas se aglutinan, por efecto combinado de calor y mucílago, aumentando de tamaño estas flotan dentro del jugo para ser retiradas en forma manual. Esta etapa debe realizarse bajo ciertas condiciones de tiempo y temperatura y de su eficiencia depende en gran parte la calidad del producto terminado. Sin embargo, hay algunas impurezas bastante pequeñas que no se pueden retirar por el método tradicional de limpieza, siendo necesario filtrar los jugos con el fin de disminuir su turbiedad a través de lonas o mallas de acero inoxidable.

Terminado el proceso de clarificado, se inicia la evaporación del agua aumentando de esta manera la concentración de azúcares en el jugo; en esta etapa se adiciona cal con el fin de evitar la hidrólisis de la sacarosa y mejorar el grano y dureza de la panela. La evaporación se realiza en pailas a presión atmosférica y el calentamiento es a fuego directo. Durante el proceso de evaporación los sólidos en suspensión aún presentes en el jugo (cachaza) se aglomeran y flotan, lo que permite separarlos manualmente.

Cuando el jugo alcanza un contenido de sólidos solubles cercano a los 70 °Brix⁴, adquiere el nombre de miel y se inicia la concentración, esta fase consiste en elevar el contenido de azúcar en el jugo de 20% a 90%. La manera como se lleve a cabo este proceso incide directamente en la textura final de la panela, cuando el pH del jugo es bajo se favorece la formación de azúcares reductores que modifican la consistencia final del producto y pueden llegar a impedir su cristalización, en esta etapa se presentan temperaturas cercanas a los 100°C, este proceso se realiza en la paila punteadora o concentradora. En esta parte del proceso se adiciona aceite de higuera, cebo o cera de laurel que cumplen funciones de antiespumante y lubricante, respectivamente.

⁴ °Brix hace referencia a la cantidad total de sacarosa disuelta en un líquido.

Durante la concentración se obtiene el punto de panela a temperaturas entre 118 y 125°C; con un porcentaje de sólidos solubles entre 88 y 94°Brix. El punto se determina por la consistencia, color y densidad de las mieles. La temperatura final de punteo depende, en orden de importancia del Brin⁵ de las mieles, de la altura sobre el nivel del mar del trapiche y de la pureza de las mieles. El punteo es la fase mediante la cual se da el punto final a la miel para obtener la panela. Se verifica en la última paila. El punto de la panela lo establece el campesino experto de varias formas: Sobre el remellón cuando la miel no corre, al batir la miel con el remellón en el aire forma bomba, se toma un poco de miel con la uña y se lleva a la boca para ver si se cristaliza.

Obtenido el punto la miel se deposita en una batea. Allí, la miel se bate constantemente a fin de que aclare y enfríe. La masa casi fría se vierte en moldes cuadrados o redondos y se deja enfriar completamente. Posteriormente, se retira el molde y la panela se empaqa. En la Figura 2.1, se muestra un esquema del proceso general de producción de panela y en la Figura 2.2, la forma y presentación en el que se puede comercializar el producto [7].

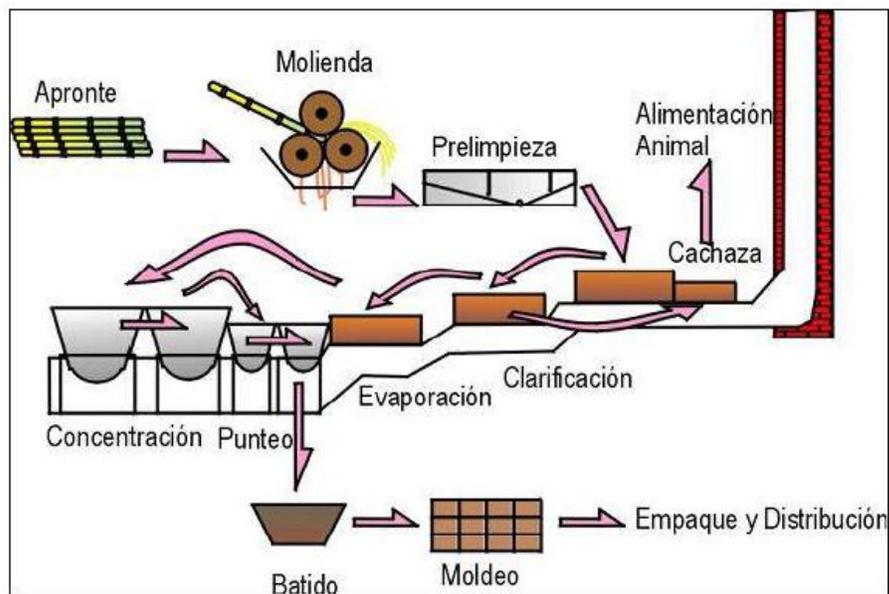


Figura 2.1. Diagrama esquemático del proceso de producción de la panela

⁵ Coloración de la miel durante el proceso de punteo.



Figura 2.2. Presentaciones de la panela como producto final

2.7. Requisitos de la calidad de la panela

Para evaluar la calidad de la panela existen dos criterios:

Calidad organoléptica o sensorial: Esta relacionados con el olor, sabor, color, y textura del producto citados en el decreto 3075 de 1997. Es importante diferenciar factores en el producto terminado sólido y su presentación líquida (aguapanela), además debe entenderse que la calidad es el resultado de las buenas prácticas o cuidados tenidos desde el cultivo, fertilización, corte, alce y transporte hasta terminar en el proceso de fabricación en el trapiche panelero. Ninguno de estos cuidados es aislado y la sumatoria de los mismos redunda en la calidad final del producto.

Textura: Corresponde a la dureza del producto, ésta no debe ser tan alta que dificulte su fragmentación, ni blanda y melcochuda, que sin ser indicativo de mala calidad reduce su vida útil. Tampoco debe estar revenida pues ésta característica es la resultante del exceso de humedad y malas Condiciones de almacenamiento.

Color: Debe ser natural en: la gama de las tonalidades cafés, sin llegar al anaranjado fuerte (corresponde usualmente a colorantes adicionados) ni al chocolate oscuro. Este parámetro

tan determinante en el mercadeo de la panela no debe ser tan tenido en cuenta dado que esta característica puede corresponder en muy buena parte a las condiciones genéticas de la variedad de caña utilizada “El color no garantiza la calidad”.

Sabor: Dulce, libre de sabores fermentados, ácidos metálicos o ajenos a la naturaleza del producto.

Apariencia: Limpia, translúcida, no turbia ni opaca y libre de residuos sólidos como bagazo o insectos.

Integridad: Debe ser completa sin presentar faltantes, desportilladuras o fragmentos en el caso de ser empacada.

Inocuidad: Libre de sustancias o aditivos prohibidos por la legislación sanitaria nacional, como colorantes y blanqueadores (estos solamente se pueden comprobar mediante análisis en laboratorio)

En presentación líquida: El producto en solución, es decir como aguapanela debe ser translúcido, sin grasa en la superficie y en lo posible libre de sedimentos en el fondo, no debe presentar notas ácidas (salvo que se le haya adicionado algún saborizante) ni fermentadas.

Calidad físico - química: Se fundamenta en la resolución 002284 de junio 27 de 1995 (vigente en la actualidad) emanada del Ministerio de la Protección Social por la cual se dictan medidas de carácter sanitario sobre la producción, elaboración y comercialización de la panela. De acuerdo al Ministerio de la Protección Social la panela según su presentación debe cumplir con los requisitos físico-químicos que se muestran en las tablas 2.1 y 2.2.

Tabla 2.1. Requisitos físico-químicos de la panela en cuadro

REQUISITOS	MÍNIMO	MÁXIMO
Azúcares Reductores expresados en % de Glucosa	5.5	-
Azúcares Reductores expresados en % de Sacarosa	-	83
Proteínas en % (N x 6.25)	0.2	-
Cenizas en %	0.8	-
Humedad en %	-	9
Plomo Expresado: Pb en mg/Kg	-	0.2
Arsénico Expresado: As en mg/Kg		0.1
SO ₂	NEGATIVO	
Colorantes	NEGATIVO	

Tabla 2.2. Requisitos físico-químicos de la panela granulada o en polvo

REQUISITOS	MÍNIMO	MÁXIMO
Azúcares reductores, expresados en glucosa, %	5.74%	-
Azúcares no reductores expresados en sacarosa, en %	-	90%
Proteínas, en % (N x 6.25)	0.2%	-
Cenizas, en %	1.0%	-
Humedad, en %	-	5.0%
Plomo expresado con Pb en mg/kg	-	0.2
Arsénico expresado como As en mg/kg	-	0.1
SO ₂	NEGATIVO	
Colorantes	NEGATIVO	

2.8. El trapiche Panelero.

El trapiche panelero es el establecimiento donde se realiza la extracción, clarificación, evaporación y concentración del jugo de la caña para la producción de la panela. El trapiche consta de dos partes fundamentales para su funcionamiento, primero el sistema de calentamiento conocido como la hornilla panelera y segundo el sistema de extracción de jugos de la caña, es decir el molino en el caso tradicional. La figura 2.3 muestra el esquema general del trapiche panelero.

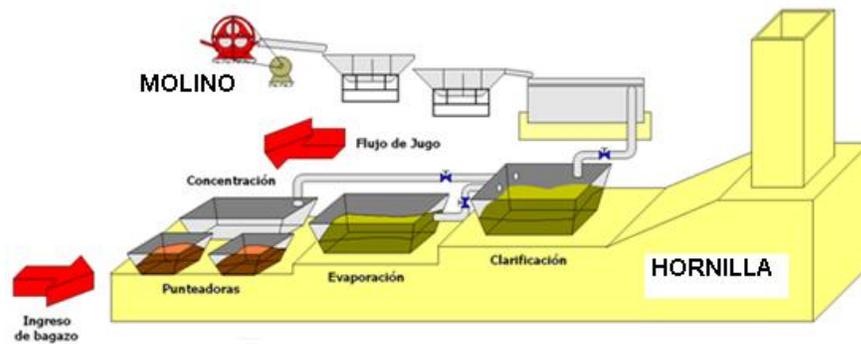


Figura 2.3. Esquema General del Trapiche Panelero

2.8.1. Hornillas Utilizadas en los Trapiches Paneleros

En un trapiche tradicional, la panela se produce en hornillas. Una hornilla consta de la cámara de combustión y la zona de evaporación del jugo de caña o zona de proceso. En la cámara de combustión se utiliza el bagazo como combustible y este reacciona con aire para obtener energía térmica produciendo gases calientes y cenizas. Los gases calientes contribuyen a la evaporación del jugo de caña.

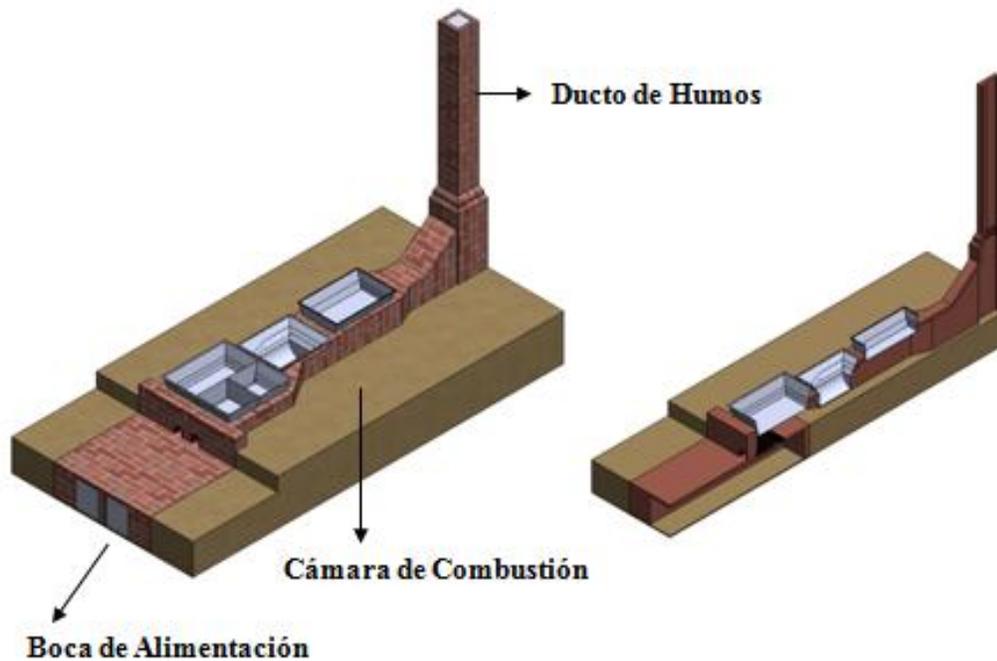


Figura 2.4. Hornilla típica de 3 pailas

La evaporación es abierta, porque se realiza en pailas expuestas a presión atmosférica y el calentamiento se hace a fuego directo, porque los fondos de las pailas se exponen directamente a los gases de combustión.

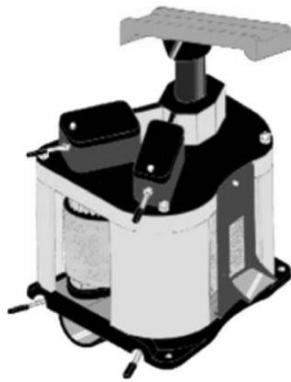
La hornilla puede tener desde 3 hasta 6 pailas para el proceso de calentamiento, evaporación, concentración, y punteo del jugo de caña. En la Figura 2.4, se observan las principales partes que conforman la hornilla panelera.

Cámara de combustión: Es el espacio en el cual se realiza la combustión del bagazo. Consta de cenicero, boca de alimentación y parrilla. *El Cenicero*, está ubicado directamente debajo de la parrilla. Su función es almacenar las cenizas y precalentar el aire necesario para la combustión. *La Boca de alimentación*, es la abertura por la cual se introduce el bagazo. Se construye generalmente en hierro gris fundido, el cual soporta temperaturas altas sin deformarse. *La parrilla* sirve de lecho para el bagazo, permite la entrada de aire para la combustión y el paso de cenizas hacia el cenicero. Al igual que la boca de alimentación se fabrica en hierro gris fundido.

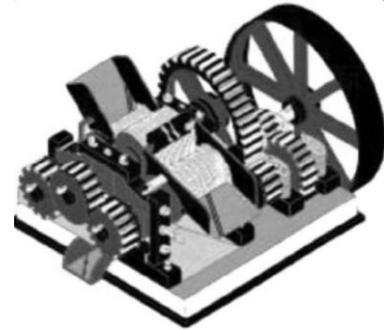
Ducto de Humos: También es conocido como buque, conducto de gases y camino. Su función es guiar los gases de la combustión y ponerlos en contacto con las pailas para calentar los jugos.

2.8.2. Los Molinos utilizados en los Trapiches Paneleros

El molino panelero es el equipo destinado a extraer el jugo de la caña, mediante la compresión que se produce cuando se hace pasar la caña entre los rodillos o mazas que giran a una determinada velocidad. De acuerdo con la orientación de las mazas, los molinos paneleros se pueden clasificar en molinos verticales y molinos horizontales [8].



a) Molino Vertical



b) Molino Horizontal

Figura 2.5. Tipos de molinos en un trapiche de panela tradicional

Hay tres características básicas que definen el desempeño de un molino: La capacidad, la extracción y la potencia requerida, que combinadas adecuadamente permiten obtener un óptimo rendimiento [9].

Capacidad

La capacidad del molino se define como la cantidad de caña que se puede moler en un tiempo determinado y se expresa en kg/h o ton/hora. Se puede calcular de dos formas:

Capacidad nominal: Cuantifica la caña molida en un tiempo determinado, generalmente muy corto, y la máquina trabaja en forma continua y bajo condiciones ideales.

Capacidad real: Para determinar esta capacidad se contabiliza, además, el tiempo empleado en el mantenimiento del equipo y en descansos de los operarios, bajo condiciones normales de trabajo en los trapiches. La capacidad real es siempre inferior a la nominal, porque la cantidad de caña molida se reduce, entre otros, por los siguientes factores: Limpieza, forma y diámetro de la caña; pericia y capacidad de trabajo de los operarios; potencia y estado mecánico del motor (tiempo empleado en el mantenimiento de los equipos).

La equivalencia entre estas dos expresiones no es directa, el tonelaje por hora significa que el molino opera sin interrupción. Para expresar en toneladas de caña por día, hay que tomar en cuenta las paradas e interrupciones.

En general los factores que determinan la capacidad en el molino son: el contenido de fibra en la caña, las dimensiones y velocidad de los cilindros, el número de cilindros, la preparación de la caña y la geometría del molino. Una expresión matemática para el cálculo de la capacidad del molino que relaciona los factores anteriormente mencionados es la siguiente [9].

$$Cap = \frac{0.55 * n * L * D^2 * \sqrt{N}}{f} \quad \text{con } L = 1.5D \quad (2.1)$$

donde:

Cap: Capacidad del molino en Toneladas de caña / Hora (TCH)

f: fibra de caña con relación a la unidad

n: velocidad de rotación de los cilindros en rpm.

L: Longitud de los cilindros, en m

D: Diámetro de los cilindros, en m

N: número de cilindros del molino

Para determinar el coeficiente f , se utiliza la siguiente fórmula [9]

$$f = \left(\frac{\text{Bagazo en 500 g de caña}}{10} - 4 \right) \quad (2.2)$$

De acuerdo con la variedad, las condiciones de cultivo y la madurez alcanzada hasta la cosecha, el contenido de fibra en la caña fluctúa entre 10 y 18% [9]. Sin embargo, diversos estudios [8,9] caña mostraron un valor promedio del porcentaje de fibra en la caña. Estos resultados se detallan en la tabla 2.3.

Una velocidad recomendada para la molienda de caña es de 5 a 15 rpm [9]. Generalmente, se usa una velocidad de: $n = 12$ rpm, donde se consiguen buenas condiciones de extracción [9].

Tabla 2.3. Porcentaje de fibra de caña (*f*).

Caña (g)	Bagazo (g)	Fibra <i>f</i> (%)
500	134	13
500	135	13.1
500	117	11.3
500	136	13.2
Promedio		12.65

Extracción

La extracción ocurre cuando la caña se somete a compresión en los rodillos o mazas del molino, lo cual propicia la salida del contenido del líquido de los tallos. Se consideran satisfactorias aquellas extracciones, entre 58 a 63% [9]. Los productos finales de esta fase son el “jugo crudo” y el “bagazo”; el primero, es la materia prima que se destina a la producción de panela, mientras el segundo se emplea como material combustible para la hornilla después de secado.

La forma más común de expresar la cantidad de jugo recuperado es la “extracción en peso” (E_p), concepto que relaciona la cantidad en kilogramos del jugo recuperado en el molino (P_j) con respecto al peso de la caña molida (P_c), como se expresa en la siguiente ecuación [9].

$$E_p = \frac{P_j}{P_c} * 100 \quad (2.3)$$

El parámetro (E_p), es fácil de determinar si se dispone de una balanza. La extracción en peso es un indicativo del funcionamiento del molino, aunque no permite cuantificar las pérdidas o el rendimiento real del jugo porque relaciona, sin distinción, dos insumos diferentes: jugo y caña. Por esta razón, para determinar el rendimiento real o “extracción de jugo” (E_j), es necesario conocer la cantidad de jugo que permanece contenida en el bagazo.

Si se relaciona la cantidad de jugo recuperado (P_j) con la cantidad de jugo contenida en la caña (P_{jc}), se tendrá la extracción de jugo (E_j), la cual se expresa de la siguiente manera [9].

$$E_j = \frac{P_j}{P_{jc}} * 100 \quad (2.4)$$

La cantidad de jugo contenido realmente en la caña P_{jc} está determinada por la fibra (P_f) presente en el tallo, y el peso de la caña molida P_c [9], es decir:

$$P_{jc} = P_c - P_f \quad (2.5)$$

De lo cual se infiere que,

$$E_j = \frac{P_j}{P_c - P_f} * 100 \quad (2.6)$$

Potencia

Indica el trabajo realizado o la energía consumida por unidad de tiempo. En los molinos, el consumo de potencia depende del trabajo realizado para comprimir la caña y de la energía consumida por la máquina. Así mismo, comprende la fricción entre las partes en movimiento con otras piezas estacionarias, como los engranajes, las mazas con raspadores y el tornabagazo, entre otras.

Estos términos son difíciles de estimar pues interactúan con otras variables imposibles de cuantificar, como el efecto de la variedad de caña, el estado de las superficies en rozamiento, y la calidad y conservación de la lubricación. En trabajos realizados por el ICA (Instituto Colombiano Agropecuario) [10], se encontró una ecuación empírica para determinar la potencia requerida, en función de la extracción en peso (E_p) y de la capacidad, con buen margen de seguridad.

$$P = -10.53 + 4.83 * C + 0.19 * E_p \quad (2.7)$$

donde,

P : Potencia consumida, kW (1 kilovatio (kW) = 1.34 caballos de fuerza (HP)).

C : Capacidad de molienda nominal, Ton/h y E_p : Extracción en peso, %.

Los valores logrados con la ecuación anterior son válidos para motores diesel o eléctricos y molinos en buen estado mecánico. Cuando se analizan los motores de gasolina, el valor obtenido se debe duplicar debido a que éstos son generalmente de alta velocidad y bajo torque de salida en el eje; por lo tanto, no soportan las sobrecargas que se presentan normalmente en el molino [10].

Con base en la ecuación anterior, se puede estimar que para moler una tonelada de caña por hora, con un nivel de extracción en peso de 60%, se requieren como mínimo ocho caballos de fuerza (HP) de potencia en el motor. En general se puede afirmar que un molino panelero de tres mazas está operando con eficiencia cuando se obtiene una extracción en peso superior a 60% [10].

2.8.3. Método Disolución-Extrusión

Dentro de la propuesta que presenta el Ingeniero Agroindustrial Francisco Montaña, a la Fundación Despertar para la construcción del trapiche panelero comunitario en el corregimiento de Santa Juana [11], se explica brevemente el Método Disolución- Extrusión y lo propone como la técnica que se podría implementar como garantía para la inocuidad del proceso dentro de la etapa de extracción de jugo de caña panelera. “Se parte de la caña corta, la cual pasa a un proceso de lavado para eliminar suciedad e impurezas provenientes del cultivo o recolectadas durante el transporte a la planta de procesamiento, posteriormente, se realiza un proceso de reducción de tamaño el cual se hace con ayuda de cuchillas, convirtiendo el vástago de caña en astillas de menor tamaño.

El siguiente proceso es introducir los vástagos de caña en agua caliente donde empieza el proceso de extracción de los azúcares y otras sustancias hidrosolubles. Posteriormente se pasa la caña en medio de dos cilindros en acero el cual mecánicamente termina de extraer los azúcares y retira un gran porcentaje de agua, teniendo como resultado agua miel el cual pasa al proceso de reducción (evaporar el agua para obtener la panela) y bagazo de caña el cual se utiliza como en la combustión para generar calor en el proceso”.

El porcentaje de extracción de los jugos por este método puede ser calculado de la siguiente forma [9]

$$E = \frac{P_j + (P_a - v)}{P_c + P_a} * 100 \quad (2.8)$$

donde E es el porcentaje de extracción en peso, P_j es el peso del jugo, P_c es el peso de la caña, P_a es el peso del agua adicionada inicialmente y v son las pérdidas de agua por evaporación

2.9. Modelos para el diagnóstico energético de los trapiches

Se encuentra que el grado de desarrollo tecnológico y el estado de la infraestructura influyen directamente sobre la eficiencia energética del proceso y que se pueden lograr mejoras considerables en el uso de la energía por medio de modificaciones sencillas y sobre todo mediante un buen diseño térmico de los sistemas [12]. El diagnóstico energético es una evaluación del consumo energético de los diferentes procesos productivos que se llevan a cabo para la elaboración de panela. Este análisis permite identificar cuáles son los procesos de mayor consumo de energía y las falencias de la infraestructura del trapiche panelero.

Para realizar el diagnóstico energético del trapiche panelero es necesario dividir el proceso general de producción de panela en dos fases, la primera fase consiste en todo lo relacionado a la combustión del proceso y la segunda fase hace referencia a los parámetros involucrados en la parte de producción de la panela [12]. Para cada una de estas fases se desarrollaran balances de masas y energías y cálculos de los consumos energéticos. El resultado de estos parámetros nos dará la información necesaria para realizar el análisis energético del trapiche panelero.

2.9.1. Balance de masas

Una de las leyes básicas de la física es la ley de la conservación de la masa. Esta ley, expresada en forma simple que la masa no puede crearse ni destruirse.

Por consiguiente, la masa total de todos los materiales que intervienen en el proceso de producción de panela debe ser igual a la de todos los materiales que salen del mismo, más la masa de los materiales que se acumulan o permanecen en el proceso.

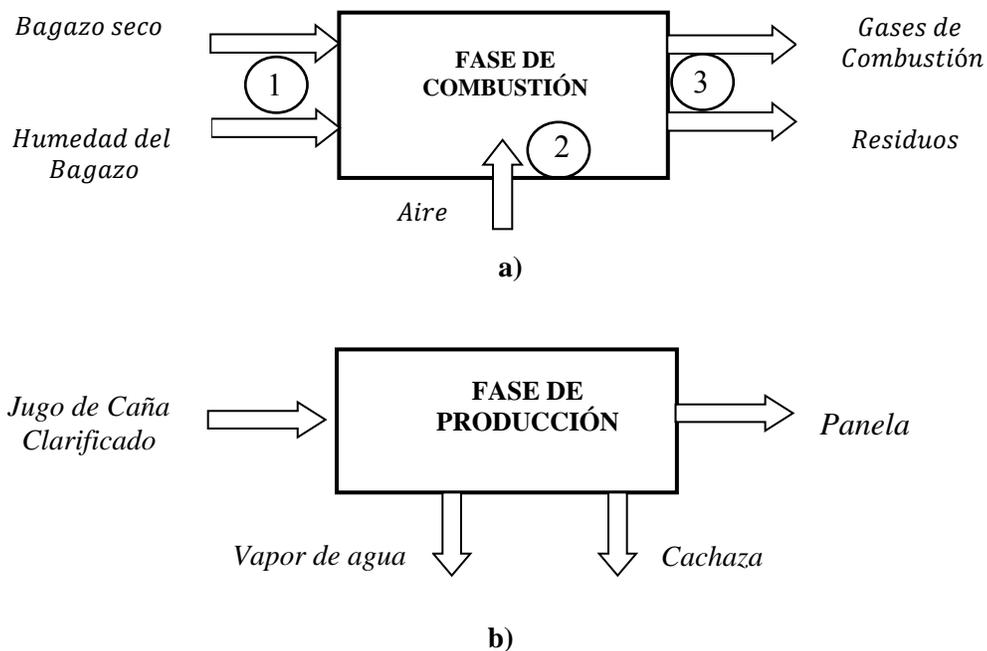


Figura 2.6. Diagrama esquemático del balance de masa para el proceso de producción de panela, a) balance de masas para la combustión, b) balance de masas en la etapa de producción

En el balance másico de la combustión en la producción de panela se considera que entran bagazo húmedo y aire a la cámara de combustión y salen gases de combustión y residuos. En el proceso productivo se considera que entra jugo de caña clarificado y salen vapor de agua, panela y cachaza. Tal como se indica en la Figura 2.6. Para desarrollar el balance de masas del trapiche panelero, se analizará el proceso en dos fases, primero, la **fase de combustión** y segundo el **proceso de producción**, en cada una de estas etapas se identifican las variables de interés.

En la Figura 2.7, se presenta un esquema general del proceso de producción de panela.

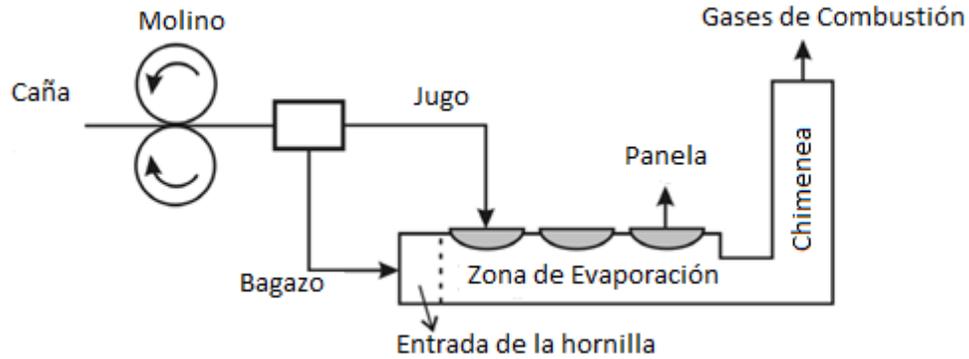


Figura 2.7. Diagrama del proceso de producción de panela

En la Figura 2.8, se muestran las variables que representan los parámetros de interés en el proceso de balance de masas. El lado izquierdo de la figura representa las variables de entrada y el derecho las variables de salida.

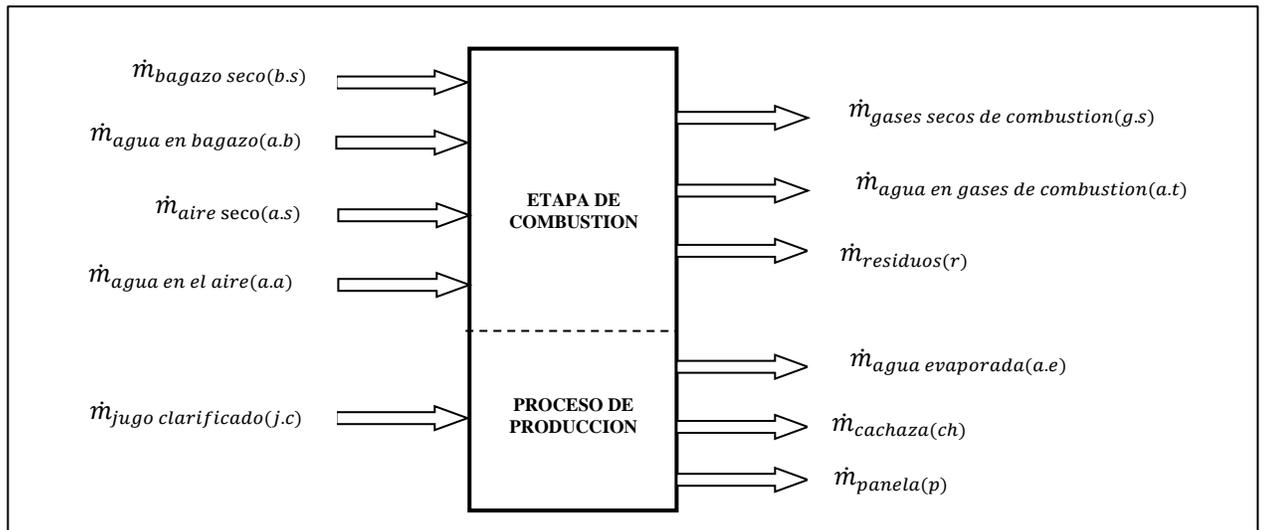


Figura 2.8. Diagrama del balance de masa para el trapiche panelero

2.9.1.1. Análisis de Balance de Masas para la Etapa de Combustión

Partiendo de la ecuación de conservación de masa, para la etapa de combustión del proceso de producción de panela se tiene:

$$\dot{m}_{b.s.} + \dot{m}_{a.b.} + \dot{m}_{a.s.} + \dot{m}_{a.a.} = \dot{m}_{g.s.} + \dot{m}_{a.t.} + \dot{m}_r \quad (2.9)$$

En esta expresión los flujos másicos de izquierda a derecha corresponden a bagazo seco ($\dot{m}_{b.s.}$), agua en el bagazo ($\dot{m}_{a.b.}$), aire seco ($\dot{m}_{a.s.}$), agua en el aire ($\dot{m}_{a.a.}$), gases de combustión secos ($\dot{m}_{g.s.}$), agua en los gases ($\dot{m}_{a.t.}$) y residuos (\dot{m}_r), respectivamente.

A continuación se describe el proceso de cálculo de cada uno de estos parámetros.

Flujo másico de bagazo seco

El bagazo seco (combustible utilizado en la combustión) se va introduciendo en la cámara de combustión a medida que transcurre el proceso de producción de panela. Inicialmente este bagazo no es exactamente seco, ya que contiene un cierto porcentaje de humedad, en ese sentido, el flujo másico del bagazo seco, $\dot{m}_{b.s.}$, se obtiene de la siguiente manera:

$$\dot{m}_{b.s.} = \dot{m}_{b.h.}(1 - w) \quad (2.10)$$

Donde w es la humedad (agua) en el bagazo, y el término $\dot{m}_{b.h.}$ se refiere al bagazo húmedo. Para el cálculo de la ecuación 2.9 se requiere de datos que permitan cuantificar la humedad presente en el bagazo. Estos datos son extraídos de tablas que se reportan en la literatura [9], para la composición aproximada de la caña de azúcar (Tabla 2.4) tal como se muestra a continuación.

Tabla 2.4. Composición aproximada de la caña de azúcar

Agua	70 %
Sacarosa	14.50 %
Fibra	13 %
Azúcares reductores	1 %
Cenizas	0.5 %
Grasa y ceras	0.2 %
Gomas	0.2 %
Sustancias nitrogenadas	0.4 %
Ácidos orgánicos; libres y combinados	0.2 %
En la ceniza existe 0.07 % de ácido fosfórico y 0.12 % de potasa.	

Teniendo en cuenta la composición de la caña panelera, se estima que en su molienda, se extrae la mayor cantidad de agua, de sacarosa y de fibra posibles, de tal modo que de acuerdo con los datos reportados en la tabla 2.4, la humedad (w) en el bagazo es:

$$w = \%_{agua} - \%_{sacarosa} - \%_{fibra} = 42.5 \% \quad (2.11)$$

Sin embargo, hay que tener en cuenta que no toda la sacarosa ni la fibra de la caña se extrae en la etapa de la molienda, por lo cual se puede estimar un valor de humedad aproximado de $w = \dot{m}_{a.b.} = 50\%$ en el bagazo [9,12].

Flujo másico de aire seco

El flujo másico de aire seco $\dot{m}_{a.s.}$ que entra en la cámara de combustión, se calcula a partir del análisis Orsat [9] de los gases de combustión (ver anexo D) y de los datos experimentales consignados en la tabla 2.5, estos datos son extraídos de tablas que se reportan en la literatura [9,12], para la composición aproximada del bagazo, tal como se muestra a continuación.

Tabla 2.5. Composición aproximada del bagazo

Componente	Composición Molar	Porcentaje en Peso
Carbono	3.73	47%
Hidrogeno	6.3	6.5%
Oxigeno	2.98	44%
Nitrógeno	0.00129	0%
Cenizas	-----	2.5%

La composición elemental del bagazo seco, está determinada experimentalmente como se muestra en la tabla 2.5. ($C_{3.73}H_{6.3}O_{2.98}N_{0.00129}$), y aunque esta composición puede variar según el tipo de caña panelera, la tendencia es que el bagazo prácticamente no contiene nitrógeno, por lo que se asume que todo el nitrógeno presente en los gases de combustión generados durante el proceso de producción de panela proviene del aire atmosférico. En este caso se trabaja con la composición del aire, que despreciando otros gases se puede estimar una composición de 79% de nitrógeno y 21% de oxígeno, de tal modo que es posible obtener la cantidad de oxígeno en el aire, si se conoce la cantidad de nitrógeno presente en los gases de combustión [13,14].

$$(O_2)_{aire} = (N_2)_{gases} * \frac{0.21}{0.79} \quad (2.12)$$

Y luego se puede considerar que el flujo másico de aire seco es la suma de los flujos de oxígeno y nitrógeno.

$$\dot{m}_{a.s.} = \dot{m}_{O_2} + \dot{m}_{N_2} \quad (2.13)$$

Flujo másico de agua en el aire

La humedad del aire se puede determinar a partir de las mediciones de temperatura ambiente y humedad relativa. La humedad absoluta, ω se puede calcular como [14].

$$\omega = \left(\frac{18}{29}\right) \left(\frac{p_v}{p_{bar} - p_v}\right) \quad (2.14)$$

donde:

$$p_v = \phi p_g \quad (2.15)$$

p_{bar} es la presión barométrica local, p_v es la presión parcial del vapor en el aire atmosférico, y p_g presión de saturación a la temperatura del aire, bar, ϕ es la humedad relativa. El flujo másico de agua en el aire se puede obtener como:

$$\dot{m}_{a.a.} = \omega \cdot \dot{m}_{a.s} \quad (2.16)$$

Flujo másico de los residuos

El flujo másico de los residuos, \dot{m}_r , representa la cantidad productos de la combustión del bagazo. Como observación general se nota que el nivel de no quemados presentes en la mayoría de los trapiches es muy bajo y en algunos casos se puede despreciar [12]. No obstante, para un cálculo más preciso del balance de masas es conveniente no despreciar este parámetro. Para su cálculo se tendrá en cuenta el porcentaje de cenizas presentes en el bagazo seco utilizado.

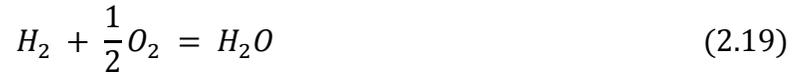
$$\dot{m}_r = 2.5\% \dot{m}_{b.s.} \quad (2.17)$$

Flujo másico de agua en los gases de combustión

El agua en los gases de combustión es la suma del agua en el bagazo, el agua del aire y el agua que se genera debido a la reacción química entre el hidrogeno presente en el bagazo y el oxígeno del medio. Ahora bien, el flujo de masa del agua en los gases de combustión está dado por la siguiente ecuación:

$$\dot{m}_{a.t.} = \dot{m}_{a.b.} + \dot{m}_{a.a.} + \dot{m}_{a.generada.} \quad (2.18)$$

El término $\dot{m}_{a.generada}$ se refiere al agua generada en la combustión del hidrogeno. La combustión del hidrógeno toma lugar de acuerdo con la siguiente reacción (ecuación estequiométrica de la generación de agua) y debe tenerse en cuenta por la correspondiente aparición de agua.



Teniendo en cuenta que por cada molécula de agua hay 2 moles de hidrogeno, y que el peso de 1 mol de hidrogeno es de 1g y el peso de 1 mol de agua es de 18 g, se puede observar que el peso del agua formada es 9 veces el peso del hidrógeno.

De acuerdo a lo anterior se tiene que para una composición de bagazo seco con 6.5% de hidrogeno [9], el flujo de la masa de agua generada en los gases de combustión puede ser expresada como:

$$\dot{m}_{a.generada} = 9 * 6,5\% * \dot{m}_{b.s.} \quad (2.20)$$

Flujo Másico de Gases Secos

El flujo de gases secos generados en la cámara de combustión, se determina a partir de la ecuación de balance de masa descrita para el proceso de combustión en la producción de panela, despejando $\dot{m}_{g.s.}$ de la ecuación (2.8):

$$\dot{m}_{g.s.} = \dot{m}_{b.s.} + \dot{m}_{a.b.} + \dot{m}_{a.s.} + \dot{m}_{a.a.} - (\dot{m}_r + \dot{m}_{a.t.}) \quad (2.21)$$

2.9.1.2. Análisis de Balance de Masas en la Etapa de Producción

Flujo Másico de Jugo de Caña Panelera

El producto que se extrae con la ayuda del molino es el jugo de caña $\dot{m}_{caña}$, para nuestro análisis los productos de interés son los jugos clarificados $\dot{m}_{j.c.}$ y la panela producida \dot{m}_p .

La cantidad obtenida de $\dot{m}_{j.c.}$ es la diferencia entre la capacidad de extracción del molino, EM , y lo que se obtiene como residuo, cachaza CH , por el flujo de jugo de caña panelera, este se calcula a partir de mediciones con base en la siguiente expresión:

$$\dot{m}_{j.c.} = \frac{\dot{m}_{caña}(EM - CH)}{100} \quad (2.22)$$

Según la literatura [9,12], se pueden estimar valores de EM entre 50% - 65% y de 3% para CH . Por otro lado la panela producida, se calcula con la siguiente relación matemática [9,12]:

$$\dot{m}_p = \frac{\dot{m}_{j.c.} \text{ } ^\circ B_{j.c.}}{\text{ } ^\circ B_p} \quad (2.23)$$

Donde $^\circ B_p$ son los grados Brix de la panela y $^\circ B_{j.c.}$ son los grados Brix del jugo clarificado. (1 **Brix** = 1 g de sacarosa en 99 g de agua).

2.9.2. Balance de energía

Todos los cambios de energía del sistema, entre los estados inicial y final, se pueden explicar mediante intercambios de energía entre el sistema y sus alrededores. Supóngase que se somete a un sistema en un estado energético específico, a algún proceso que provoca que cambie dicho estado.

Bajo el principio de conservación de la energía, para todos los casos debe cumplirse la relación de la Figura 2.9.

$$\begin{array}{l} \textit{Entrada de energía al} \\ \textit{sistema desde los} \\ \textit{alrededores} \end{array} = \begin{array}{l} \textit{Salida de energía} \\ \textit{del sistema hacia} \\ \textit{los alrededores} \end{array} + \begin{array}{l} \textit{Acumulación de} \\ \textit{energía dentro del} \\ \textit{sistema} \end{array}$$

Figura 2.9. Relación de conservación de la energía

La ley de conservación de energía, postula que toda la energía que entra a un proceso es igual a la energía que sale más la que queda en el proceso [14]. La energía puede manifestarse de varias maneras. Algunas de sus formas más comunes son la Entalpía, Energía Eléctrica, la Energía química, la Energía Cinética, la Energía Potencial, el Trabajo y el Flujo de Calor.

Para nuestro estudio, aplicando la primera ley de la termodinámica en estado estacionario se puede plantear una ecuación de balance de energía, donde se tienen en cuenta los flujos energéticos a través del sistema en la producción de panela [12,14].

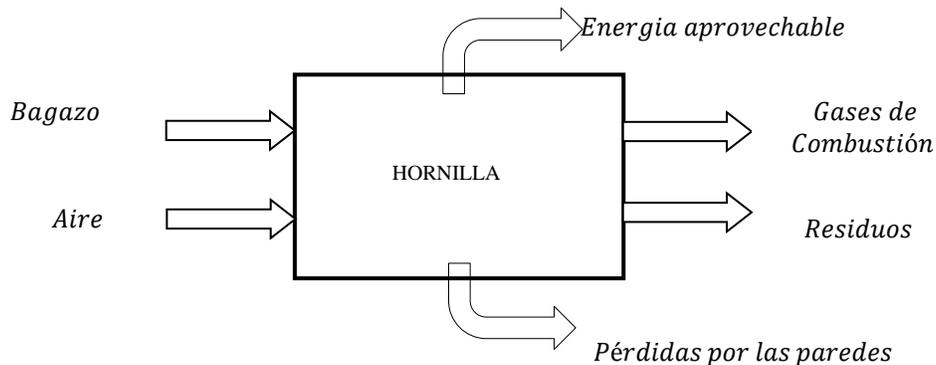


Figura 2.10. Diagrama esquemático del balance de energía para el proceso de combustión en una hornilla panelera.

Aplicando la primera ley de la termodinámica en estado estacionario, que afirma que la energía total de cualquier sistema aislado se conserva, se puede plantear el modelo de balance de energía (Figura 2.11.) de la siguiente manera:

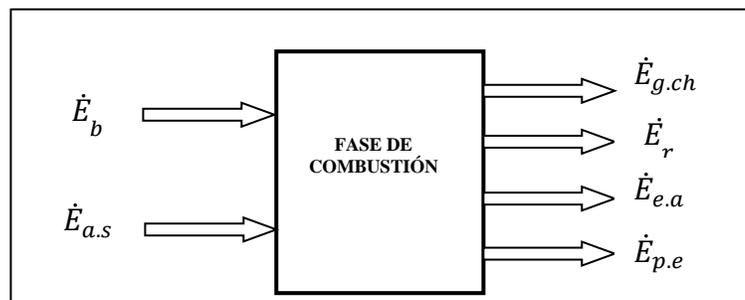


Figura 2.11. Flujos energéticos a través del sistema, en la etapa de combustión de la producción de panela.

En el proceso de combustión en la producción de panela intervienen dos flujos de energía entrantes que son, los asociados al bagazo (\dot{E}_b) y al aire seco ($\dot{E}_{a.s}$) y flujos energéticos de salida que son los asociados a los gases en la chimenea ($\dot{E}_{g.ch}$), el flujo debido a los residuos (\dot{E}_r), el flujo energético aprovechado ($\dot{E}_{e.a}$), y las pérdidas energéticas ($\dot{E}_{p.e}$) [12]

$$\dot{E}_b + \dot{E}_{a.s} = \dot{E}_{g.ch} + \dot{E}_r + \dot{E}_{e.a} + \dot{E}_{p.e} \quad (2.24)$$

A continuación se describe el proceso de cálculo de cada uno de estos parámetros.

Flujo de Energía Asociado al Bagazo

El flujo de energía que acompaña al bagazo \dot{E}_b , se calcula como [12,15]

$$\dot{E}_b = \dot{m}_{b.s}.PCI + \dot{m}_{a.b} \cdot h_f \quad (2.25)$$

Donde PCI es el poder calorífico inferior del bagazo seco, y h_f es la entalpía del agua que entra con el bagazo, que se aproxima como la de líquido saturado a temperatura ambiente, y los valores de los parámetros $\dot{m}_{b.s}$ y $\dot{m}_{a.b}$ se pueden calcular con las relaciones descritas en el apartado 2.9.1. El poder calorífico del bagazo, según su humedad, puede ser extraído de la siguiente tabla [15]:

Tabla 2.6. Valor combustible del bagazo según su humedad

Humedad %	PCI del bagazo (kcal/kg)
42.00	2295.72
43.00	2255.69
44.00	2213.99
45.00	2173.40
46.00	2132.26
47.00	2091.67
48.00	2049.97
49.00	2009.38
50.00	2001.60
51.00	1928.20

Flujo de Energía Asociado al Aire de Combustión

El flujo de energía con el aire para la combustión se obtiene como:

$$\dot{E}_{a.s} = \sum_i \dot{m}_i h_i \quad (2.26)$$

donde $i = N_2, O_2, a.a$ agua en el aire.

De las propiedades de los gases se tiene [14,15]:

$$h_{N_2} = 5,57 \text{ KJ/mol} = 397,9 \text{ KJ/Kg}$$

$$h_{O_2} = 3,4099 \text{ kJ/mol} = 213,11 \text{ kJ/Kg}$$

$$h_{a.a} = \text{entalpia del vapor de agua saturado} = h_g = 2547,2 \text{ KJ/Kg}$$

Y entonces

$$\dot{E}_{a.s} = \dot{m}_{N_2} h_{N_2} + \dot{m}_{O_2} h_{O_2} + \dot{m}_{a.a} h_{a.a} \quad (2.27)$$

Donde los flujos másicos de cada componente son calculados de acuerdo al apartado 2.9.1.

Flujo de Energía Asociado a los Gases en la Chimenea

El flujo energético asociado a los gases en la chimenea es:

$$\dot{E}_{g.ch} = \sum_k \dot{m}_k h_k = (\%perdidas_T \text{ de gases}) * (\dot{E}_{a.s} + \dot{E}_b) \quad (2.28)$$

Donde $k = CO_2, N_2, O_2, CO$.

Entonces:

$$\dot{E}_{g.ch} = \dot{m}_{N_2} h_{N_2} + \dot{m}_{CO_2} h_{CO_2} + \dot{m}_{O_2} h_{O_2} + \dot{m}_{CO} h_{CO} = \%perdidas(\dot{E}_{a.s} + \dot{E}_b) \quad (2.29)$$

Donde los flujos másicos de cada componente son calculados de acuerdo al apartado 2.9.1.

Tabla 2.7. Perdida en los Gases de Chimenea según su temperatura de salida

Temperatura de los gases	% de pérdidas
212	4.10
390	7.70
570	11.50
750	15.90
930	19.65
1110	24.00
1290	28.50
1470	33.10
1650	37.70
1830	43.00

Flujo de Energía Asociado a los Residuos

En el proceso los residuos se retiran de la cámara de combustión cuando están a temperatura ambiente, por lo que no aportan energía en el balance global, es decir $\dot{E}_r = 0$.

Flujo de Energía Aprovechado

El flujo energético aprovechado en el proceso se calcula como:

$$\dot{E}_{e.a} = \sum_j \dot{m}_j C_{p,j} \Delta T_j + \dot{m}_{a.e.} h_{fg} \quad (2.30)$$

donde j = agua evaporada del jugo de caña ($a. e$), panela (p) y cachaza (ch)

El término h_{fg} es la entalpía de vaporización del agua. Las diferencias de temperatura son las temperaturas de salida del agua evaporada, panela y cachaza con referencia a la temperatura de entrada del jugo de caña.

Flujo de Energía Asociado a Pérdidas

Las pérdidas por transferencia de calor a través de las paredes no se calculan directamente, sino que se obtienen a partir del balance de energía:

$$\dot{E}_{p.e} = \dot{E}_b + \dot{E}_{a.s} - (\dot{E}_{g.ch} + \dot{E}_{e.a}) \quad (2.31)$$

Usando las ecuaciones 2.25 a 2.31, el balance de energía (ecuación 2.24) se puede reescribir como:

$$\dot{m}_{b.s}.PCI + \dot{m}_{a.b}.h_f + \sum_i \dot{m}_i h_i = \sum_k \dot{m}_k h_k + \sum_j \dot{m}_j C_{p,j} \Delta T_j + \dot{m}_{a.e}.h_{f.g} + \dot{E}_{p.e} \quad (2.32)$$

2.9.3. Cálculo de consumos energéticos en el trapiche panelero

Para calcular los consumos energéticos en la fase de producción de la panela, se plantea el siguiente orden:

- Cálculo del calor necesario para calentar el jugo de caña Q_0
- Cálculo del calor necesario para concentrar el jugo de caña Q_1
- Cálculo del calor necesario para la etapa de punteo del jugo de caña Q_2

2.9.3.1. Cálculo del Calor Necesario para el Calentamiento jugo de caña

El calor específico (C_p) de una sustancia es la cantidad de calor necesario para elevar un grado Celsius la temperatura de un gramo de la sustancia. La capacidad calorífica (C) de una sustancia es la cantidad de calor necesario para elevar un grado Celsius la temperatura de una cantidad determinada de sustancia. El calor específico es una propiedad intensiva, en tanto que la capacidad calorífica es una propiedad extensiva. La relación entre la capacidad calorífica y el calor específico de una sustancia es:

$$C = M * C_p \quad (2.33)$$

Donde M es la masa de la sustancia en gramos.

Si se conoce el calor específico y la cantidad de una sustancia, entonces el cambio en la temperatura de una muestra (ΔT) indicara la cantidad de calor (Q) que se ha absorbido o liberado en un proceso en particular. La ecuación para calcular el cambio de calor está dada por:

$$Q = M * C_p \Delta T \quad (2.34)$$

$$Q = C \Delta T \quad (2.35)$$

donde, M es la masa de la muestra y ΔT es el cambio de la temperatura:

$$\Delta T = T_{final} - T_{inicial} \quad (2.36)$$

El signo convencional de Q es igual al del cambio de entalpía; es decir, positivo para procesos endotérmicos y negativo para procesos exotérmicos.

La sustancia a calentar, jugo de caña, es una mezcla de agua – miel. Los dos componentes se comportan como sustancias puras (tienen propiedades específicas bien definidas como: densidad, temperatura de fusión, temperatura de ebullición entre otras; estas propiedades no varían aun cuando dicha sustancia pura se encuentre formando parte de un mezcla) cuando están separadas [17], un esquema del proceso de calentamiento del los jugos se muestra en la Figura 2.12.

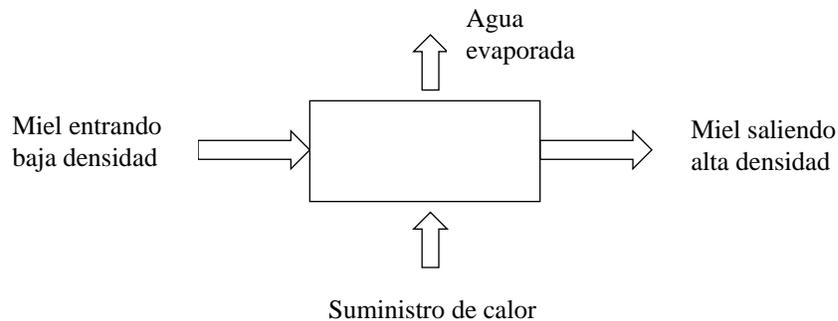


Figura 2.12. Esquema del proceso de calentamiento de los jugos

Inicialmente se calcula el calor necesario para elevar la temperatura de la mezcla agua - miel (jugo de caña), desde la temperatura ambiente hasta la temperatura de saturación del agua (Temperatura a la cual la presión parcial del agua en la mezcla se iguala a la presión

de vapor (P_{sat}) del agua) a la presión atmosférica local dado que lo que se pretende es evaporar el agua que acompaña la miel.

La termodinámica permite realizar análisis matemáticos de trabajo y calor, bien sea para sustancias puras o para mezclas [17, 18]. En este caso se tienen las siguientes ecuaciones.

$$Q_0 = Q_m + Q_a \quad (2.37)$$

$$Q_m = M_m * Cp_m * \Delta T_m \quad (2.38)$$

$$Q_a = M_a * Cp_a * \Delta T_a \quad (2.39)$$

donde:

Q_0 es el calor para calentamiento, Q_m es el calor para la miel, Q_a es el calor para el agua, M_m es la masa de la miel, M_a es la masa del agua, Cp_m es el calor específico de la miel, Cp_a es el calor específico del agua. También,

$$\Delta T_m = \Delta T_a = T_s - T \quad (2.40)$$

donde:

ΔT es la diferencia de temperatura, donde T_s es la temperatura de saturación del agua, y T es la temperatura del jugo al entrar al calentador.

Para obtener los valores correspondientes a la cantidad termodinámica Q_0 se deben evaluar los parámetros involucrados como: M_a la masa del agua, M_m la masa de la miel, T la temperatura ambiente, T_s la temperatura de saturación del agua para la presión atmosférica local, Cp_a el calor específico del agua y Cp_m el calor específico de la miel [18].

Cálculo de las Masas de Agua y de Miel

Las masas de agua y miel son calculadas a partir del análisis de cantidad de sólidos disueltos, se considera que la masa de miel corresponde a la fracción total de sólidos disueltos y el valor restante corresponde a la masa de agua, parte de la cual será evaporada.

Cálculo de las Temperaturas ambiente y de evaporación para la presión atmosférica

La diferencia de temperatura que se utiliza para calcular el calor a consumir durante el calentamiento del jugo, es la existente entre la temperatura de evaporación del agua a la presión atmosférica y la temperatura ambiente. La primera debe ser calculada mientras que la segunda se mide directamente. Para calcular T_s a la presión atmosférica se utilizan las tablas de propiedades termodinámicas del agua saturada (Anexo A.1). Primero se mide la presión atmosférica y luego se interpola el valor de la temperatura en la tabla del anexo A1, ya que los valores de presión son relativamente cercanos.

Calor específico del agua y la miel

La Entalpía es la cantidad de energía que un sistema termodinámico puede intercambiar con su entorno. El término de entalpía fue acuñado por el físico alemán Rudolf J.E. Clausius en 1850 [19].

En una reacción química a presión constante (isobárica), el cambio de entalpía del sistema es el calor absorbido o desprendido en la reacción. En un cambio de fase, por ejemplo de líquido a gas, el cambio de entalpía del sistema es el calor latente, en el caso citado, el de vaporización. En un cambio de temperatura, el cambio de entalpía por cada grado de variación corresponde a la capacidad calorífica del sistema a presión constante [19], así:

$$C_p = \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_p \quad (2.41)$$

El calor específico del agua se puede tomar como 4.198 KJ/Kg K que corresponde al promedio para temperaturas entre 280 K y 373 K, correspondiente al rango en que se lleva a cabo los procesos térmicos para el proceso de producción de panela. Los valores fueron tomados de las tablas de propiedades termodinámicas del agua (Anexo A.2). Para obtener el calor específico de la miel se utiliza la información de las propiedades termodinámicas de una mezcla agua – miel (Anexo A.3) y las ecuaciones que se presentan a continuación [18,19]:

$$M_t * \Delta h_t = (M_a * \Delta h_a) + (M_m * \Delta h_m) \quad (2.42)$$

Donde M_t = masa total del jugo (agua + miel) y Δh_t = entalpía total del jugo, M_a masa del agua, Δh_a es la entalpía del agua y M_m masa de la miel y Δh_m es la entalpía de la miel.

Despejando la entalpía total del jugo de la ecuación 2.42 se tiene:

$$\Delta h_t = \left(\frac{M_a}{M_t} * \Delta h_a \right) + \left(\frac{M_m}{M_t} * \Delta h_m \right) \quad (2.43)$$

Ahora como [19]:

$$\Delta h = Cp * \Delta T \quad (2.44)$$

Reemplazando la ecuación 2.44 en la 2.43, tanto para el agua como para la miel, se tiene:

$$\Delta h_t = \left(\frac{M_a}{M_t} * Cp_a * \Delta T_a \right) + \left(\frac{M_m}{M_t} * Cp_m * \Delta T_m \right) \quad (2.45)$$

Como el cambio de temperatura para el agua y la miel es la misma, debido a que son calentados al mismo tiempo, $\Delta T_a = \Delta T_m = \Delta T$ se tiene:

$$\frac{\Delta h_t}{\Delta T} = \left(\frac{M_a}{M_t} * Cp_a \right) + \left(\frac{M_m}{M_t} * Cp_m \right) \quad (2.46)$$

Despejando el calor específico de la miel Cp_m , se tiene [18]:

$$Cp_m = \frac{\frac{\Delta h_t}{\Delta T} - \left(\frac{M_a}{M_t} * Cp_a \right)}{\frac{M_m}{M_t}} \quad (2.47)$$

Después de tener los valores de masas de agua y de miel, temperatura ambiente y de evaporación a la presión atmosférica y los calores específicos del agua y de miel, se regresa a la ecuación 2.37 para calcular el calor necesario para el calentamiento.

2.9.3.2. Cálculo del Calor Requerido para la Concentración de los Jugos de caña

Como se esquematiza en la Figura 2.13, se tiene una mezcla inicial de agua-miel de baja densidad. Debido al suministro de calor el agua es evaporada, obteniéndose un producto final de alta densidad conocido como miel [18]. Primero se describirá las ecuaciones básicas en el cálculo del calor y posteriormente se describirá los métodos utilizados para evaluar las variables involucradas.

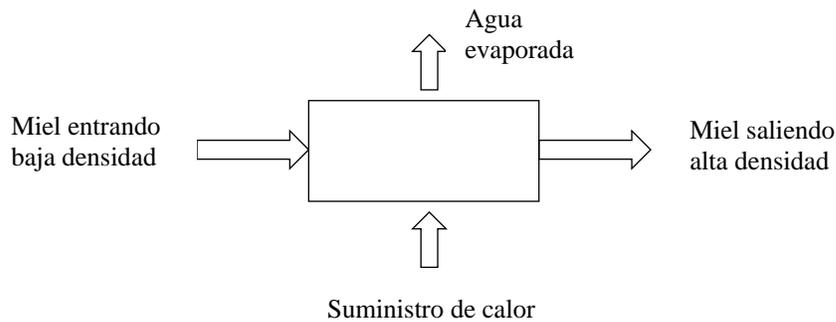


Figura 2.13. Esquema del proceso de concentración de los jugos

El calor a suministrar para el proceso de concentración de la mezcla agua – miel se calcula como el producto de la masa de agua a evaporar por el calor latente de evaporización.

$$Q_1 = a_c * \Delta h_s \quad (2.48)$$

Donde, a_c es la cantidad de agua evaporada en la concentración y Δh_s es el calor latente de vaporización del agua (extraído de las tablas de propiedades termodinámicas del agua, Anexo A1).

2.9.3.3. Cálculo del Calor para el Punteo

El calor a suministrar para el proceso de punteo de la mezcla agua – miel se calcula como el producto de la masa de agua a evaporar por el calor latente de evaporización [18].

$$Q_2 = a_p * \Delta h_s \quad (2.49)$$

donde,

a_p es la cantidad de agua evaporada en el punteo y Δhs es el calor latente de vaporización del agua [19] (extraído de las tablas de propiedades termodinámicas del agua, Anexo A1).

Métodos Utilizados para Evaluar las Variables Involucradas

Las variables involucradas durante la concentración y el punteo de la mezcla agua – miel, son la entalpía de evaporación del agua a la presión atmosférica y la masa de agua a evaporar durante cada uno de los procesos.

Cálculo de la Entalpía de Evaporación del Agua

La valoración de la entalpía de evaporación del agua se ha extractado a partir de la información que suministran los datos contenidos en el anexo A.1 apoyado en un análisis similar al del cálculo de la temperatura de evaporación.

Calculo de las Masas de Agua Evaporada

Existen puntos de referencia para el cálculo de las masas de agua a evaporar, que se encuentran en las etapas donde es necesario adicionar calor al sistema [18]. Las etapas son:

- ✓ el calentamiento
- ✓ el clarificado
- ✓ la concentración
- ✓ el punteo

La Figura 2.14, representa un esquema de los puntos en los que se calcula la masa de agua a evaporar, dentro del proceso

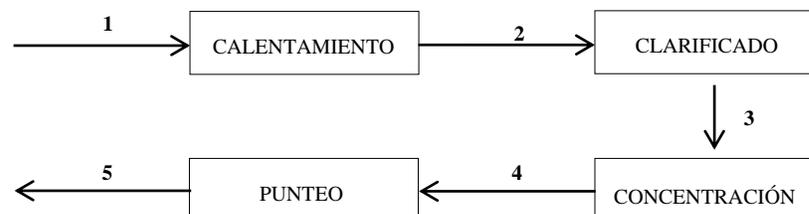


Figura 2.14. Diagrama de flujo de los procesos en los que se involucran los gastos energeticos en el proceso de produccion de panela

Teniendo en cuenta que en cada una de estas etapas se va a evaporar una cantidad de agua desconocida, se establece un modelo que relaciona los procesos de evaporación más importantes. Primero se define a_c como la masa de agua a evaporar durante la concentración y a_p como la masa de agua a evaporar durante la etapa de punteo [18].

Para calcular los valores de a_c y a_p es necesario conocer la densidad inicial y final de la mezcla agua-miel para los dos procesos. Para calcular las masas de agua evaporada se toma un modelo que relaciona las dos evaporizaciones como función de la cantidad de jugo inicial [18].

La figura 2.15 (a) es el punto antes de la concentración de los jugos (punto 3 de la figura 2.14), la figura 2.15 (b) es el punto antes el punteo (punto 4 de la figura 2.14) y la figura 2.15(c) es el punto de obtención del producto final, Panela (punto 5 de la figura 2.14).

El modelo presentado en la figura 2.15, describe el cálculo de la masa de agua evaporada durante la concentración a_c y el punteo a_p , donde Hf es la humedad final y Sd son los sólidos disueltos. El análisis se hace bajo la ley de conservación de masa, donde inicialmente se considera 100% como el jugo a procesar [18], representado por el agua a evaporar en la concentración a_c , el agua a evaporar en el punteo a_p , la humedad final Hf y solidos disueltos Sd .

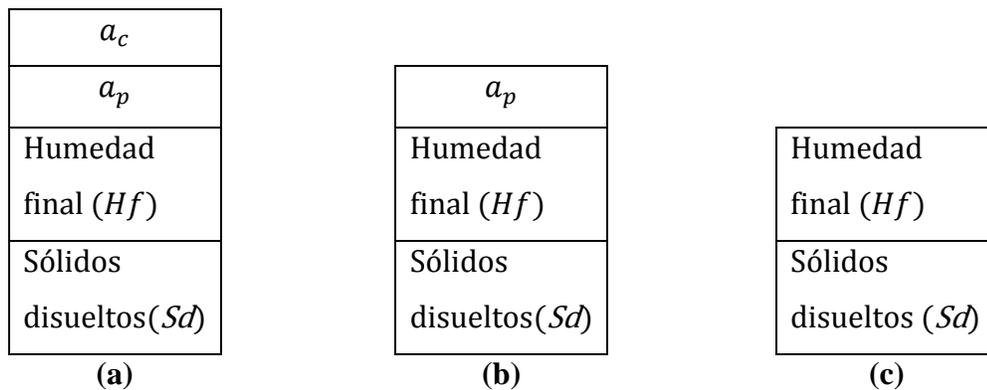


Figura 2.15. Modelo utilizado para estimar las masas de agua evaporada

Entonces, para la situación descrita en el punto de la Figura 15(a) se tendría el siguiente conjunto de ecuaciones [18].

$$100 = a_c + a_p + Hf + Sd \quad (2.50)$$

$$Sd = 100 * b1 \quad (2.51)$$

$$Sd = 100 * b2 \quad (2.52)$$

$$Sd = 100 * b3 \quad (2.53)$$

donde,

$b1$ = Densidad del jugo, en °Brix, en el punto 1 de la Figura 2.14.

$b2$ = Densidad del jugo, en °Brix, en el punto 2, de la Figura 2.14.

$b3$ = Densidad del jugo, en °Brix, en el punto 3, de la Figura 2.14.

Ahora para el bloque (b) de la Figura 2.15.

$$Sd = (100 - a_c) * b4 \quad (2.54)$$

Y finalmente para el bloque (c) de la Figura 2.15.

$$Sd = (100 - a_c - a_p) * b5 \quad (2.55)$$

donde:

$b4$ =Densidad del jugo, en grados Brix, en el punto 4, de la Figura 2.14.

$b5$ =Densidad del jugo, en grados Brix, en el punto 5, de la Figura 2.14.

Luego relacionando las ecuaciones anteriormente descritas, que describen los puntos de evaporación de agua en el proceso de producción de la panela, se puede calcular el valor de a_c y a_p respectivamente. La relación entre el bloque (a) y el (b), de la Figura 2.15, es que la cantidad de sólidos solubles Sd es igual, pues solo se está evaporando agua, entonces igualando las ecuaciones se obtiene:

$$Sd = 100 * b3 = (100 - a_c) * b4 = Sd \quad (2.56)$$

Despejando a_c :

$$\frac{100 * b3}{b4} = 100 - a_c \quad (2.57)$$

$$a_c = 100 - \frac{100 * b3}{b4} \quad (2.58)$$

Donde a_c es la masa de agua evaporada durante la concentración.

Ahora, de la misma forma se obtiene la relación para obtener el agua evaporada durante el punteo, que resulta de resolver en forma simultánea las expresiones matemáticas que describen los bloques (b) y (c), de la Figura 2.15, teniendo en cuenta que la cantidad de sólidos solubles entre estos bloques es igual.

$$Sd = (100 - a_c) * b4 = (100 - a_c - a_p) * b5 = Sd \quad (2.59)$$

Despejando a_p :

$$\frac{(100 - a_c) * b4}{b5} = 100 - a_c - a_p \quad (2.60)$$

$$a_p = 100 - a_c - \left(\frac{(100 - a_c) * b4}{b5} \right) \quad (2.61)$$

Donde a_p es la masa de agua evaporada durante el punteo.

Con el valor de las masas evaporadas y el valor de la entalpía de evaporación del agua a la presión atmosférica, se puede calcular los calores necesarios para la concentración y el punteo, utilizando las ecuaciones 2.48 y 2.49.

2.9.4. Índices para el diagnóstico energético del proceso de producción de panela.

Para diagnosticar el funcionamiento del trapiche panelero estudiado en la Vereda Santa Juana, se han definido varios índices que dan cuenta de la forma en que se emplean los diferentes recursos [12].

Primer índice

Es un indicador del rendimiento del cultivo y se define como el cociente entre la panela producida y la caña procesada.

$$I_1 = \frac{\dot{m}_{panela}}{\dot{m}_{caña}} \quad (2.62)$$

Segundo índice

En los trapiches se busca el autoabastecimiento energético mediante el uso del bagazo como combustible, por lo tanto se define un índice que da cuenta del bagazo sobrante o faltante en los trapiches. Como la humedad con que se produce y se consume el bagazo varía con el nivel de extracción de jugo y el proceso de secado, la cantidad de bagazo húmedo no ofrece una comparación directa de los trapiches. Por esto se define el índice con base en el bagazo seco consumido y producido [12]:

$$I_2 = 100 \left(\frac{\dot{m}_{b.s,producido} - \dot{m}_{b.s,consumido}}{\dot{m}_{b.s,producido}} \right) \% \quad (2.63)$$

Tercer índice

Un índice de suma importancia para diagnosticar el funcionamiento de los trapiches es su eficiencia energética, que se define como el cociente entre la energía aprovechada y la energía del combustible [12]:

$$I_3 = \eta = \frac{\dot{E}_{a.e.} + \dot{E}_{ch} + \dot{E}_p}{\dot{m}_{b.e.} PCI + \dot{m}_{a.b.} h_f} \quad (2.64)$$

Cuarto índice

Para determinar el porcentaje de la energía que se pierde en los gases de combustión, se define el siguiente índice [12]:

$$I_4 = \frac{\dot{E}_{gases}}{\dot{E}_{suministrada}} \quad (2.65)$$

El flujo energético de la corriente de gases es el producto de su flujo másico y su entalpía específica, por lo que su valor depende tanto del exceso de aire como de la temperatura de los gases en la chimenea.

Quinto índice

Otro indicador de la forma como se utiliza la energía del combustible es el siguiente [12]:

$$I_5 = \frac{\dot{E}_{pérdidas}}{\dot{E}_{suministrada}} \quad (2.66)$$

Sexto índice

Finalmente se define un índice que da cuenta del rendimiento global de los trapiches, calculado como el cociente entre el bagazo seco consumido y la panela producida [12]:

$$I_6 = \frac{\dot{m}_{b.s,consumido}}{\dot{m}_p} \quad (2.67)$$

El valor del índice 6 depende del éxito en la extracción de jugos, en el secado del bagazo (en caso de que se realice), en el proceso de combustión, y en el aprovechamiento de la energía en el proceso productivo.

CAPITULO III

3. MATERIALES Y METODOS

Para el desarrollo de cada una de las etapas del trabajo, se utilizaron diferentes sensores y dispositivos electrónicos que permitieron recolectar la información necesaria para hacer un diagnóstico sobre el proceso general de la elaboración de la panela, especialmente en la eficiencia en la etapa de extracción de jugo de caña. A continuación se hace la descripción de cada uno de los dispositivos utilizados para las lecturas de las variables de interés.

3.1. Medición de pH

El pH se constituye en la medida de la acidez o de la alcalinidad de una sustancia. Los ácidos y las bases tienen una característica que nos deja poder medirlos. Los ácidos fuertes tienen altas concentraciones de iones de hidrógeno y los ácidos débiles tienen concentraciones bajas. El pH entonces es un valor numérico que expresa la concentración de iones de hidrógeno.

El método más exacto y más usado para medir el pH es usando un medidor de pH (o pHmetro) y un par de electrodos. Un medidor de pH es básicamente un voltímetro muy sensible, los electrodos conectados al mismo generarán una corriente eléctrica cuando se sumergen en soluciones. Un medidor de pH tiene electrodos que producen una corriente eléctrica; ésta varía de acuerdo con la concentración de iones hidrógeno en la solución. La principal herramienta para hacer las mediciones de pH es utilizando el electrodo de bombilla de vidrio. Tal vidrio tiene una composición especial, sensible a los iones hidrógeno. Un tipo de voltímetro conectado a los electrodos relaciona con el pH la corriente eléctrica producida en la membrana de vidrio. Para cerrar el circuito y brindar una referencia estable y reproducible, se requiere un segundo electrodo. El medidor debe estar calibrado con una solución de pH conocido, llamada "amortiguador" (también solución tampón o buffer) Los amortiguadores resisten las variaciones de pH y tienen valores de pH específicos a temperaturas determinadas.

La medida del pH durante el proceso de elaboración de la panela se hace importante ya que se debe mantener un pH cercano a 5.8, por debajo de este se favorece la producción de azúcares reductores y por encima de este el producto final tendrá un marcado oscurecimiento afectando la calidad de la panela. La calidad de la panela, entre otras cosas, depende del porcentaje de azúcares reductores presentes en el jugo; pues si éste es superior a uno por ciento, se incrementa el proceso de inversión de la sacarosa que depende de la temperatura, el tiempo de permanencia en la hornilla y el pH.

El valor del pH de los jugos se determinó con un pH-metro; este parámetro se midió en las etapas de extracción, limpieza y evaporación. Aquí se introdujo el electrodo en las muestras de jugo de cada etapa y se determinó un rango de acidez del jugo. A continuación se describe el instrumento utilizado para estas mediciones.

Tabla 3.1. Especificaciones de funcionamiento del pH-metro

Especificaciones del pH-metro	
pH	(1 o 2 puntos de calibración)
Rango	pH -2 a 16.00
Resolución / Precisión	pH 0.01 / pH \pm 0.2
Rango de compensación manual de temperatura	0 a 100 °C / 32 a 212 °F
Reconocimiento automático de la solución tampón	4.00, 7.00, 9.22, 10.00 (invalidación manual)
Calibración	Seleccionando 1 o 2 puntos
Potencia	2 Pilas de tipo AA
Duración de la batería	500 horas aproximadamente (25 °C con pilas alcalinas)
Tamaño	175 (l) x 75 (w) x 35 (d) mm
Peso	250 G



Figura 3.1. Fotografía del pH-metro manual

3.2. Medición de Temperatura

3.2.1. Termómetro de Alimentos

El control de temperatura debe realizarse durante todo el proceso de elaboración de panela, esta información nos permite controlar otras variables tan importantes como: °Brix, pH, adición de coagulante, y punto de miel entre otras, que inciden directamente sobre la calidad del producto final.

La medición de la temperatura se hizo durante todo el proceso de extracción de jugo de caña por medio de un termopar digital para alimentos. Este equipo es el más popular de los termómetros utilizados en la industria alimentaria, laboratorios y procesos productivos donde un buen producto, calidad y precisión van de la mano. La siguiente tabla da la información de las características más importantes de este instrumento.



Figura 3.2.1. Fotografía del Termómetro de alimentos utilizado

Tabla 3.2. Especificaciones de funcionamiento del termómetro de alimentos

Especificaciones Termómetro de Alimentos	
Número de Modelo	# DT-05
Rango de medición	-40 °C a 230 °C
Longitud de la punta de prueba	8.5 cm
Exhibición	2.2 x 1.0 cm
Tamaño	20 x 3.4 x 2.6 cm
Batería	AAA
Resolución	0.1 °C
Peso	28 g
Sonda de acero inoxidable Funda protectora de plástico Opción de °F/°C o del botón de asentamiento de los datos	

3.2.2. Termocuplas

En 1821 el físico Alemán Seebeck descubrió el efecto termoeléctrico que constituye la base de las termocuplas actuales. Él observó que fluye una corriente en un circuito cerrado de dos metales diferentes si las dos juntas están a temperaturas diferentes. El voltaje producido o fuerza electromotriz (fem) depende de los metales utilizados y de la relación de temperatura entre las juntas. De acuerdo al tipo de metales que la conforman se clasifican en termocuplas: B, C, E, J, K, L, N, R, S, T, U. Con temperaturas diferentes en cada junta, se producen voltajes y circula una corriente en el circuito. Una termocupla puede por lo tanto medir la diferencia de temperaturas entre las dos juntas, que es el método utilizado en la práctica.

Teniendo en cuenta la temperatura alcanzado por la hornilla en el proceso de producción de panela se eligió la termocupla tipo J (Hierro / constantan) con un rango de temperatura de +20°C a +700 °C que cumple con las especificaciones de desempeño requeridas.

El conductor negativo en la termocupla tipo J es el Constantan (una aleación de 55 % de cobre y 45 % de níquel). No se deben usar en atmósferas sulfurosas por encima de 540° C y no se las recomienda para temperaturas inferiores a 0° C. El 90% de las termocuplas usadas en la industria pertenecen a los tipos J y K. Las del tipo J Figura 3.2.2, se usan en la industria del plástico goma y aleaciones metálicas de bajo punto de fusión tales como las de aluminio.



Figura 3.2.2. Termocupla tipo J

3.3. Medición de concentración de sólidos solubles (°Brix)

Cuando la luz atraviesa de un medio a otro, la velocidad a la cual viaja cambia en relación con la diferencia de la densidad entre los dos materiales. El radio o cambio en la velocidad de la luz es llamado índice de refracción y los instrumentos que miden este parámetro se llaman refractómetros. El índice de refracción de un líquido es relativo a su concentración y por esto, un refractómetro puede desplegar la concentración en unidades adecuadas como pueden ser °Brix (% de azúcar).



- 1- Prisma
- 2- Cubre Objetos
- 3- Tornillo de ajuste
- 4- Tubo espejo
- 5- Ocular

Figura 3.3. Fotografía del Refractómetro Manual

Los grados Brix (símbolo °Bx) miden el cociente total de sacarosa disuelta en un líquido. Una solución de 25 °Bx tiene 25 gramos de sacarosa y 75 gramos de agua en los 100 gramos de la solución.

Para la medición de grados Brix ($^{\circ}\text{Bx}$) o concentración de sólidos solubles en los jugos de caña, se tomaron muestras de jugos en las etapas de extracción, concentración y evaporación utilizando el refractómetro manual de la figura 3.3.

Descripción

Tabla 3.3. Especificaciones de funcionamiento del Refractómetro manual

Especificaciones del Refractómetro Manual	
Referencia	3090
Dimensión	29 x 160 mm
Rango medición	0 – 90 % Brix
Resolución	0.5 % Brix
Compensación de Temperatura	Automática ATC
Accesorios Incluidos	Estuche, pipeta plástica y paño

3.4. Análisis fisicoquímico de la panela

El resultado del análisis fisicoquímico de la panela permite la determinación de proteínas, azúcares reductores, materias extrañas, sacarosa, cenizas, humedad, fósforo, colorantes y hierro del producto en las condiciones iniciales del proceso, este análisis se realizó en la Unidad de Análisis Industriales de la Universidad del Cauca, para garantizar la calidad de los resultados.

Las pruebas que se realizaron tienen que ver con las características fisicoquímicas y organolépticas del producto terminado, teniendo en cuenta el proceso artesanal de producción de panela y el proceso utilizando el método de Disolución-Extrusión para la extracción de los jugos de la caña.

Se evaluaron cantidades tales como azúcares reductores, expresados en glucosa, azúcares no reductores, expresados en sacarosa, proteínas en %, cenizas en %, humedad en %,

plomo expresado con Pb en mg/Kg, arsénico expresado como As en mg/Kg, SO₂ Negativo y colorantes Negativo. Así como la cantidad de materias extrañas y defectos de la panela producida.

3.5. Implementación del Método Disolución-Extrusión

3.5.1. Montaje Experimental del Método de Disolución-Extrusión en el Trapiche Panelero La Laja (Vega Cauca).

Para implementar experimentalmente el Método de Disolución-Extrusión en el trapiche panelero del grupo de producción La Laja en la Vereda Santa Juana (Vega Cauca) se hace necesario adecuar tres etapas experimentales, la primera etapa consiste en colocar algunas cuchillas para cortar y desfibrar, en esta fase se realizara el proceso de reducción de tamaño de la caña y la convertirá en pequeños vástagos.

La segunda etapa consiste en adecuar un recipiente con el tamaño suficiente para contener los vástagos de caña que se utilizan en un día de trabajo para la elaboración de panela en el trapiche de Santa Juana y el agua necesaria para realizar el proceso de extracción de los azúcares y otras sustancias hidrosolubles mediante el proceso de lixiviación. Finalmente se implementa dos cilindros de acero inoxidable donde se pasan los trozos lixiviados de caña, para extraer lo que queda del líquidos en el bagazo y así aprovechar aún más la extracción de jugos ricos en azúcares.

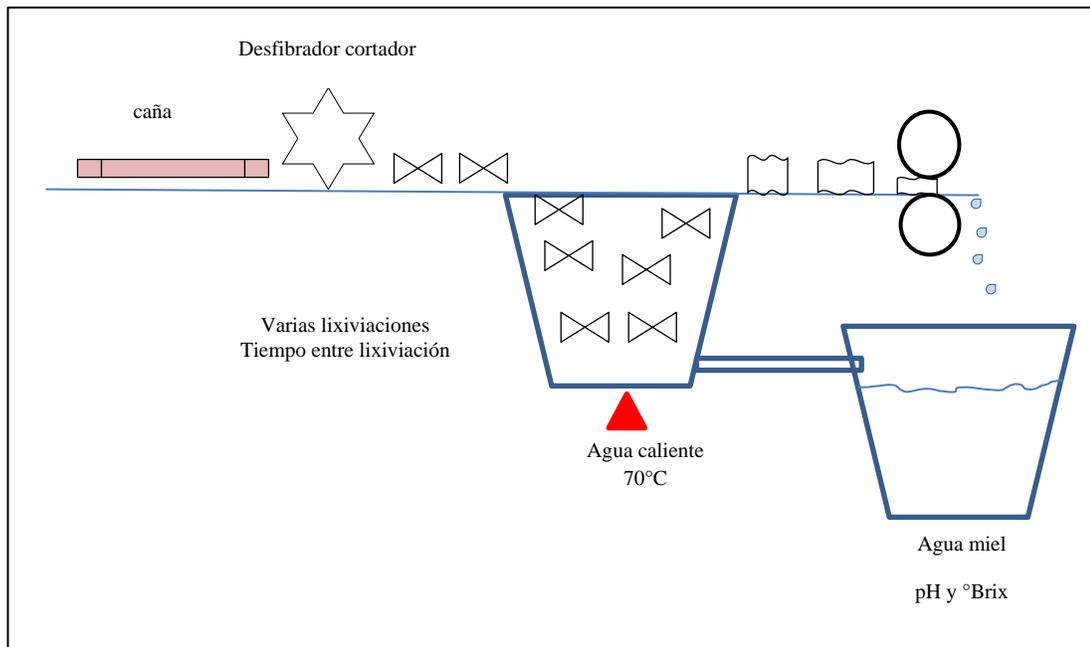


Figura 3.4. Esquema del Montaje Experimental del Método de Disolución-Extrusión

3.5.2. Descripción de los Montajes Experimentales para la identificación de los Parámetros de Interés en el Método Disolución-Extrusión

Para calcular el tiempo promedio, la temperatura, tamaño de la caña y cantidad de agua de imbibición en la cual se logra una completa y óptima permeabilización de las paredes de la caña para la extracción de los azúcares, se realiza un montaje experimental utilizando el aparato de extracción sólido-líquido llamado soxhlet y varios trozos de caña.

Los valores obtenidos de esta experiencia permitirán extrapolar el resultado para cantidades de caña mayores bajo las mismas condiciones de temperatura del agua de imbibición.

La extracción sólido - líquido, es una operación de la ingeniería química que se usa en numerosos procesos industriales. Técnicamente, es una operación de transferencia de masa, donde un disolvente o mezcla de éstos, extraen selectivamente uno o varios solutos que se hallan dentro de una matriz sólida.

Al igual que en la destilación, existen una serie de parámetros físico - químicos, tales como la viscosidad del disolvente, los coeficientes de solubilidad de los solutos, los coeficientes de difusión, las temperaturas de ebullición, etc. que son de importancia fundamental para el diseño del equipo y el éxito del proceso de extracción.

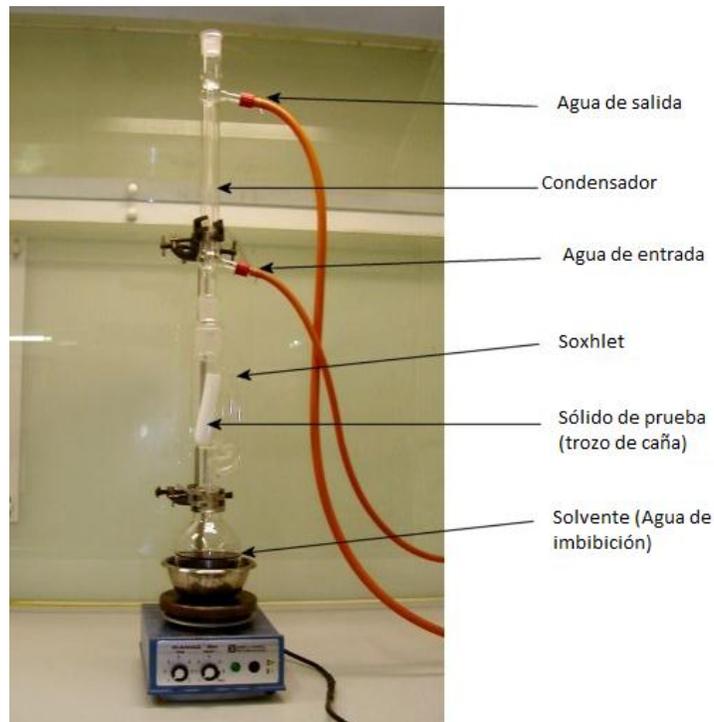


Figura 3.5. Sistema de extracción sólido-líquido mediante aparato soxhlet.

El soxhlet es un sistema de extracción desde un sólido por arrastre de vapor, para dicha tarea, se arma un equipo que consiste en un balón de destilación, que es un balón de fondo esférico, donde se coloca la solución con la que se producirá el vapor que arrastrará los compuestos del sólido. El equipo también tiene una recámara, donde se coloca el sólido desde el cual se va a extraer. El sólido se coloca dentro de un dedal lleno de algodón, y este a su vez va dentro de la recámara. Esta recámara tiene dos conductos a los lados, un tubo de sifón. Este tubo se va llenando, a medida que la presión que el líquido ejerce va aumentando. En el momento en el cual la presión es igual o mayor a la que el vapor ejerce hacia arriba, toda la recámara se descarga del líquido y se dice que se ha completado un ciclo. Además, hay un conducto de vapor, que es el que permite que el vapor del líquido

suba hasta la recámara, y luego suba a la tercera pieza del equipo, que es el condensador. Este es un tubo, dentro del cual hay otro en espiral y corre agua para enfriar y condensar el vapor para que vuelva a la recámara.

Para saber cuántas lavadas o lixiviadas se debe hacer en la caña para poder extraer el máximo de azúcar se llevó a cabo el siguiente experimento.

La construcción más sencilla, consiste en una rejilla de tiras de madera colocadas en forma paralela unas con respecto a otras y lo suficientemente cercanas para sostener al sólido. Éstas, a su vez, pueden descansar sobre tiras similares colocadas en ángulos rectos, separadas 150 mm o más, de forma que el líquido de lixiviación pueda fluir. La solución de azúcar lixiviada fluye hacia afuera por el fondo.

Las cubiertas de la tapa y el fondo pueden ser removidas, de manera que es posible extraer los trozos de caña ya lixiviada, es decir el bagazo, que está saturado de jugo. Este jugo debe ser retirado por un sistema de presión (molino simple) y posteriormente añadir nueva carga al sistema.

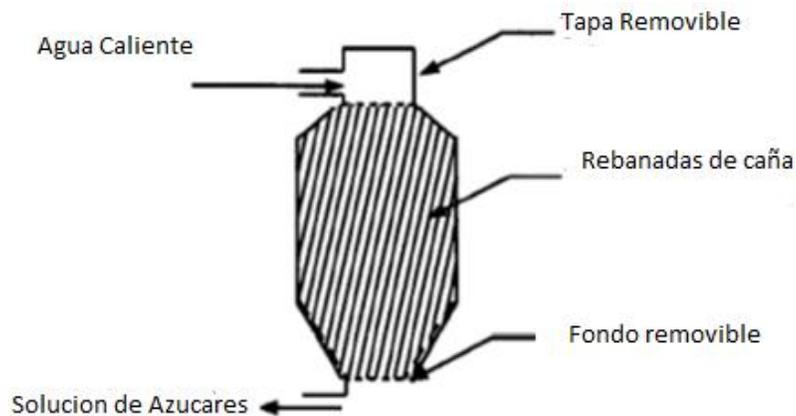


Figura 3.6. Aparato típico de lecho fijo para un proceso de lixiviación.

3.6. Remoción de impurezas

Para determinar el porcentaje de remoción de impurezas se tomó un papel filtro y se colocó en un embudo por donde se hizo pasar una cantidad conocida de jugo. Los residuos que quedaron en el papel filtro se secaron en un horno ($T > 50^{\circ}\text{C}$) e inmediatamente se pesaron. La diferencia entre los pesos iniciales y finales de la muestra proporciona el porcentaje de remoción de impurezas.

3.7. Cálculos de gastos energéticos

Con los datos obtenidos del seguimiento del proceso, se tomó un modelo matemático para el análisis de consumos energéticos en el proceso de producción panelera, donde se calcularon necesidades energéticas del trapiche tales como: Calor necesario para el calentamiento, calor necesario para la concentración, calor necesario para dar punto a la panela, cálculo de la panela producida y panela producida por cada 100Kg de jugo. Para facilitar este cálculo se realizó un programa en MATLAB en el cual se obtienen los datos más relevantes para diagnosticar el gasto energético del proceso de producción de panela en el trapiche de estudio. Igualmente se diagnosticó el proceso de fabricación de panela mediante índices que relacionaron el desempeño final del trapiche en la producción de panela con el proceso de extracción de los jugos de caña.

CAPITULO IV

4. ANALISIS Y RESULTADOS

4.1. Aspectos socioeconómicos del lugar de trabajo

Para entender la dimensión de la problemática por la que están pasando las comunidades campesinas paneleras del Municipio de la Vega (Cauca), se realizó un estudio en el que se recolecto toda la información posible sobre las condiciones sociales, culturas, y económicas de la región, que permite ubicarse en el contexto en el que se desarrollan las actividades agrícolas a pequeña escala, la tecnología dentro de sus procesos. Para la actividad se hizo el seguimiento sobre una de las plantas procesadoras de panela que funcionan en el corregimiento de Santa Juana con el fin de conocer el estado actual del proceso e instalaciones del trapiche.

Para llevar a cabo esta parte de la investigación se realizaron visitas frecuentes a la planta procesadora de panela de uno de los socios del grupo de producción La Laja ubicada en el corregimiento de Santa Juana, durante estas visitas, se realizó una encuesta entre las 103 familias paneleras del corregimiento de Santa Juana y se hizo el seguimiento sobre el proceso de producción de panela, en el cual se registró fotográficamente cada una de las etapas que este comprende determinando las principales variables físicas que afectan e intervienen en el proceso de producción de la panela y que se deben tener en cuenta para el diagnóstico energético del trapiche, el diagnóstico permite determinar los gastos energéticos del proceso y así comparar con la información obtenida por el otro método, para determinar cuál de los dos métodos es más eficiente energéticamente.

4.1.1 Resultados de las Encuestas realizadas en la población de trabajo

A continuación se presentan los resultados obtenidos de la encuesta (ver anexo A) que se realizó a las familias campesinas paneleras del corregimiento de Santa Juana del Municipio de la Vega (Cauca).

Tabla 4.1. Población de la zona productiva de estudio

Encuestados		Etnia		Vivienda o tierra		Tipo de parcela donde labora	
Mujeres	200	Indígena	0	Propietario	402	Comprado	60%
Hombres	212	Afrocolombiano	148	Arrendatario	0	Herencia 40%	
Edad Promedio	39	Mestizo 264		Mancomún	10		
TOTAL	412			Sin propiedad	0		

Tabla 4.2. Economía de la región

Orden de importancia de los cultivos presentes en la zona		Variedad de caña cultivada		¿Porque la cultiva?
Café	1°	Piojota		Rendimiento
Caña Panelera	2°	Piel roja		Rendimiento
Plátano	3°	Platanita		Facilidad
Maíz	4°	Export		Facilidad
Frijol	5°	Calcetona		Rendimiento
Yuca	6°	Puerto rico		Rendimiento

Tabla 4.3. Economía de la panela en la zona

Productos obtenidos de la caña		Jornada de molienda		Destino del producto	
Panela en cuadros	70%	Caña procesada por día	200 Kg	Consumo Propio	25%
Miel	5%	Panela obtenida	36 Kg	Mercado Regional	75%
Panela pulverizada	20%	Jugo obtenido	100 kg	Mercado Nacional	0%
Comida para animales	5%			Exportación	0%

Tabla 4.4. Condiciones de los trapiches paneleros

Situación de los trapiches		Tipo de trapiche		Combustible de la hornilla		Fabricación de la panela	
Alquilados	5%	Diesel	70%	Bagazo	90%	Tiempo de molienda	2 h
Familiares	60%	Gasolina	5%	Leña, caña brava 10%		Tiempo de cocción	2-3 h
Comunitarios	35%	Tracción animal	25%			Control de temperatura	Empírico

La etnia más representativa de la zona es mestiza y en la mayoría de los casos la vivienda es propia, la economía de la región es netamente agrícola, siendo el café el producto más importante dentro de su economía seguida por la producción de panela; la elaboración de panela ofrece ventajas a los campesinos sobre el café, pues se puede hacer molienda casi todo el año. La panela se constituye en el medio de subsistencia para muchos campesinos de la región.

4.2. Proceso de Elaboración Tradicional de Panela Seguido en el Grupo de Producción de La Laja

4.2.1. Instalaciones del Trapiche Panelero

El trapiche panelero comunitario se encuentra ubicado en la Vereda La Laja, corregimiento de Santa Juana, del Municipio de la Vega (Cauca). El municipio de la Vega se encuentra ubicado en el suroccidente colombiano a 119 Km de la ciudad de Popayán, sur-oriente del departamento del Cauca, en las estribaciones del Macizo Colombiano, limitando al norte con el Municipio de la Sierra y Sotará; al oriente con el departamento del Huila; al sur con los municipios de San Sebastián y Almaguer y al occidente con los municipios de Sucre y Patía.

Por ubicarse dentro del Departamento del Cauca, se encuentra totalmente dentro de la Zona Tropical o Ecuatorial, con altas temperaturas y bajas presiones durante todo el año; el Municipio de La Vega tiene una extensión de 624 Km². Su altura promedio sobre el nivel del mar llega a ser de 2.272 metros y en su territorio se pueden encontrar toda la gama de climas. A nivel organizativo sus habitantes han dividió el municipio en cinco zonas, dadas sus características y ubicación.

Zona Centro: (Azul punteado) Cabecera municipal y veredas aledañas.

Zona 4: (Verde) Corregimientos de: Guachicono y Pancitará.

En su Hidrografía se distinguen el Río Guachicono, afluente del río Patía, vertiente del Pacífico así como, el Pancitará y Pútis.

El trabajo de investigación se realizó en la Zona 3, Corregimiento de Santa Juana al Norte del Municipio, Vereda la Laja, en el Colectivo de Producción La Laja. Las instalaciones del trapiche panelero del grupo de producción La Laja, se encuentran construidas de forma artesanal y su infraestructura es de guadua con un área de aproximadamente 120 m². Posee techo de zinc y pisos en tierra en su mayoría como se puede apreciar en la Figura 4.3.



Figura 4.3. Instalaciones del trapiche Comunitario de la Laja del corregimiento de Santa Juana del Municipio de la Vega (Cauca).

Las 103 familias que conforman el grupo de producción La Laja, son campesinos que producen la panela en pequeñas parcelas; los cultivos de caña se ubican alrededor de sus trapiches sobre parajes pendientes y en promedio llegan a ocupar una hectárea, la topografía de la zona hace difícil el apronte de la materia prima, su transporte y el acceso de los insumos, es por esa razón que los campesinos prefieren construir trapiches paneleros móviles que se puedan ubicar cerca a los cultivos de caña.

Hornilla Panelera

En el trapiche se utiliza una hornilla construida en ladrillo común mezclado con arcilla, no presenta grietas, ni fugas de calor lo que hace que su estado general sea aceptable.



Figura 4.4. Hornilla panelera

La cámara de combustión consta de una puerta de entrada para el combustible (bagazo), una parrilla que sostiene el bagazo y permite la entrada de aire, y un cenicero en donde caen y se depositan las cenizas producto de la combustión.

Luego se encuentra un ducto de humos. Está construido igualmente en ladrillo y es por donde circulan los gases de la combustión para transferir el calor a las pailas que contienen los jugos extraídos de la caña y se procede a la evaporación del agua.



Figura 4.5. Ducto de humos de la hornilla panelera

En el trapiche se usan tres pailas redondas o fondos para la concentración de jugos. Están hechas en acero inoxidable y cumplen las funciones de calentamiento, evaporación y concentración del jugo de caña.

La chimenea es un conducto vertical de ladrillo. Está ubicado al final de la hornilla y empalmado directamente con el ducto de humos. Su forma es rectangular y tiene una dimensión aproximada es de 2.5 m de altura.



Figura 4.6. Chimenea de la hornilla panelera

4.2.2. Proceso de Elaboración de la Panela

En todos los trapiches paneleros vinculados al grupo de producción La Laja se realiza un proceso artesanal en la elaboración de la panela. Básicamente la panela que producen en la zona tiene dos presentaciones, en cuadro y pulverizada. Pasos de la producción de la panela.

4.2.2.1. Corte y apronte de la caña

El proceso de fabricación de panela se inicia con el corte de la caña. La técnica de corte de caña utilizada por las familias del grupo de producción La Laja fue la de entresaque que consiste en cortar solo las cañas maduras, dejando los cogollos para obtener una nueva cosecha en un tiempo aproximado a tres meses, de esa manera se garantiza con más frecuencia la molienda. Una vez cortada la caña se alza y transporta al trapiche panelero,

para esta tarea utilizan caballos. El apronte o almacenamiento de caña previo a la iniciación de la molienda, se hace en un espacio dentro del trapiche panelero y se sostiene con estacas, con el propósito de mantener abastecimiento de caña. La caña permanece almacenada por un periodo de tiempo máximo de dos días. La siguiente figura ilustra el proceso de corte y almacenamiento de la caña panelera Figura 4.7.



Figura 4.7. Corte y apronte de caña panelera

4.2.2.2. Molienda

En el trapiche panelero donde se realizó la caracterización del proceso, se utiliza para la extracción de los jugos presentes en la caña un molino R-2 que funciona a motor diesel ver figura 4.8. Los jugos se recogen en recipientes que funcionan como depósito.



Figura 4.8. Molino para la obtención del jugo de la caña y del bagazo

En esta parte del proceso una persona se encarga de darle punta a uno de los extremos de la caña para que al pasarla por el molino, este pueda sujetarla mejor y por presión física se extrae el jugo, de aquí el jugo es depositado en recipientes y luego transportado a una de las pailas donde se realiza la pre-limpieza. El bagazo se pone a secar para usarlo como combustible para la hornilla panelera. El molino y el proceso de molienda se muestran en la Figura 4.8.

4.2.2.3. Secado del bagazo

De la etapa de extracción se obtiene como residuo el bagazo denominado bagazo verde, cuya humedad fluctúa entre 50 y 60% y depende del grado de extracción del molino, la variedad y grosor de las cañas, para este caso en particular el molino hace una extracción del jugo de caña solo de un 50% dejando el bagazo húmedo con el otro 50%.



Figura 4.9. Espacio para el secado del bagazo

El bagazo se lleva hacia la bagacera, en una lona en donde se almacena. El espacio empleado para el secado se muestra en la Figura 4.9. Este espacio es muy pequeño lo que hace difícil la eliminación rápida de la humedad. El bagazo cuando se utiliza como combustible de la hornilla debe tener una humedad inferior a 30%, se garantiza así una mayor eficiencia.

Se hace difícil la eliminación de la humedad del bagazo en tiempos de lluvia, ya que no se cuenta con un espacio amplio y cubierto que permita adecuadamente el secado, por lo que se tiene una humedad superior y el rendimiento del proceso disminuye considerablemente.

4.2.2.4. Pre-limpieza de los jugos

El jugo se conoce como "jugo crudo" o "sin clarificar" y es pasado a través de sistemas de pre-limpieza, con el fin de retener la mayor cantidad de impurezas y así facilitar el proceso de clarificación. El sistemas de pre-limpieza utilizado en el trapiche panelero consta de un marco en madera donde se extiende una lona o toldillo por el que se hace pasar el jugo, la lona retiene las impurezas de gran tamaño que contaminan el jugo. En la Figura 4.10. Se muestra el sistema utilizado. Después de la pre-limpieza se pasa el jugo a la paila recibidora a una temperatura ambiente, para iniciar su calentamiento.



Figura 4.10. Pre-limpieza del jugo de caña recién extraído

4.2.2.5. Descachazado

En esta etapa se tiene como objetivo eliminar impurezas por aglomeración (coagulación) inicialmente y por floculación después. Esta etapa del proceso inicia con el calentamiento del jugo de 50 o 55°C, una vez alcanzada esta temperatura se adicionan los agentes clarificantes, mucílagos vegetales obtenidos de la maceración de las cortezas de balso, cadillo y guásimo. Para esta etapa del proceso se agrega una determinada cantidad de

cadillo diluido en agua y dividido en dos partes; la primera parte se adiciona durante el calentamiento, a una temperatura de 60 a 70 °C, en la Figura 4.11. se muestra el procedimiento.



Figura 4.11. Inicio del proceso de descachace y adición de cadillo

Inmediatamente después de terminada la primera descachazada (75 - 85 °C), se le adiciona la segunda parte de cadillo y se repite el procedimiento. Si al observar el jugo no está claro se le aplica otra pequeña cantidad de cadillo para eliminar totalmente las impurezas. En esta operación se emplean métodos físicos de medida, como el tacto, la observación y la experiencia. Figura 4.12.



Figura 4.12. Jugo descachazado

El volumen de jugo clarificado se divide en dos o tres pailas, de acuerdo a la cantidad de jugo, con el fin de facilitar el manejo de los jugos, mejorar la eficiencia de la evaporación y aumentar la calidad final de la panela.

4.2.2.6. Evaporación y concentración de los jugos

Las etapas de evaporación y concentración, se llevan a cabo en la hornilla el calor que suministra esta permite la evaporación del agua contenida en los jugos de esa manera se logra aumentar el contenido de los sólidos solubles de un rango de 16 - 21 ° Brix hasta 90 - 94 °Brix en el que se alcanza el punto de miel o panela. Las mieles alcanzan una temperatura hasta de 120 °C en promedio.



Figura 4.13. Etapa de evaporación y concentración de los jugos de caña

El proceso de evaporación y concentración de los jugos varía con respecto al tiempo; se han procesado jugos que se demoran más de cuatro horas, especialmente en jornadas nocturnas, en donde la eficiencia de la hornilla no es la mejor, esto hace que exista un desdoblamiento de la sacarosa y presente azúcares reductores causantes de los colores oscuros en la panela y que se pegue el producto en la paila.



Figura 4.14. Concentración de los jugos, medición de la cantidad de sólidos solubles



Figura 4.15. Adición de cera de laurel a las pailas

El trapiche donde se realizó la investigación se utiliza cera de laurel, la cual tiene un aroma agradable y eficiente para evitar que la panela se pegue a las paredes de la paila.



Figura 4.16. Etapas de evaporación y concentración del los jugos hasta el punto.

En el momento de adicionar la cera, la temperatura del jugo no debe alcanzar los 100-105 °C y la concentración de sólidos solubles debe ser entre 65 y 70 °Brix, a condiciones más elevadas, la cera, ya no tiene el efecto esperado y las pailas se pueden quemar mientras los jugos son concentrados y evaporados, Figura 4.16.

4.2.2.7. Punteo

Durante la concentración se obtiene el punto de panela a temperaturas entre 118 y 125°C; con un porcentaje de sólidos solubles entre 88 y 94°Brix, el punto se determina por la consistencia, color y densidad de las mieles. La temperatura final de punteo depende, en orden de importancia del Brin⁶ de las mieles, de la altura sobre el nivel del mar del trapiche y de la pureza de las mieles. El punteo, se refiere a la fase mediante la cual se da el punto final a la miel para obtener la panela. Este proceso se verifica en la última paila, donde se encuentran las mieles resultado de la evaporación del agua de los jugos de caña.



Figura 4.17. Punto de la panela procesada



Figura 4.18. Verificación manual del punto de la panela procesada.

El punto final lo establece el campesino, se puede identificar visualmente con la formación de grandes burbujas o películas muy finas y transparentes formadas en el remellón o

⁶ Coloración de la miel durante el proceso de punteo.

tomando una muestra de miel con una espátula e introduciéndola inmediatamente a un recipiente con agua fría y se evalúa su fragilidad o quebrado.

4.2.2.8. Moldeo

Obtenido el punto se deposita la miel en una batea (recipiente redondo de acero inoxidable). Allí, la miel se agita constantemente a fin de que aclare y enfríe, esta operación dura entre 10 y 15 minutos.

Después de un período de agitación inicial de unos tres a cuatro minutos, las mieles se dejan en reposo; gracias al aire incorporado, comienzan a crecer en la batea; se reinicia la agitación; este proceso se repite dos o tres veces. La masa casi fría se vierte en moldes cuadrados y se deja enfriar completamente. Posteriormente, se retira el molde y se empaca.



Figura 4.19. Traslado de las mieles al recipiente de batido

El tiempo de batido y la altura (volumen) que alcanza las mieles depende del grano o textura, el cual básicamente se relaciona con los °Brix y la pureza de las mieles.



Figura 4.20. Depósito, moldeo y formación de la panela

Finalmente, se presenta un diagrama de todo el proceso de producción de panela.

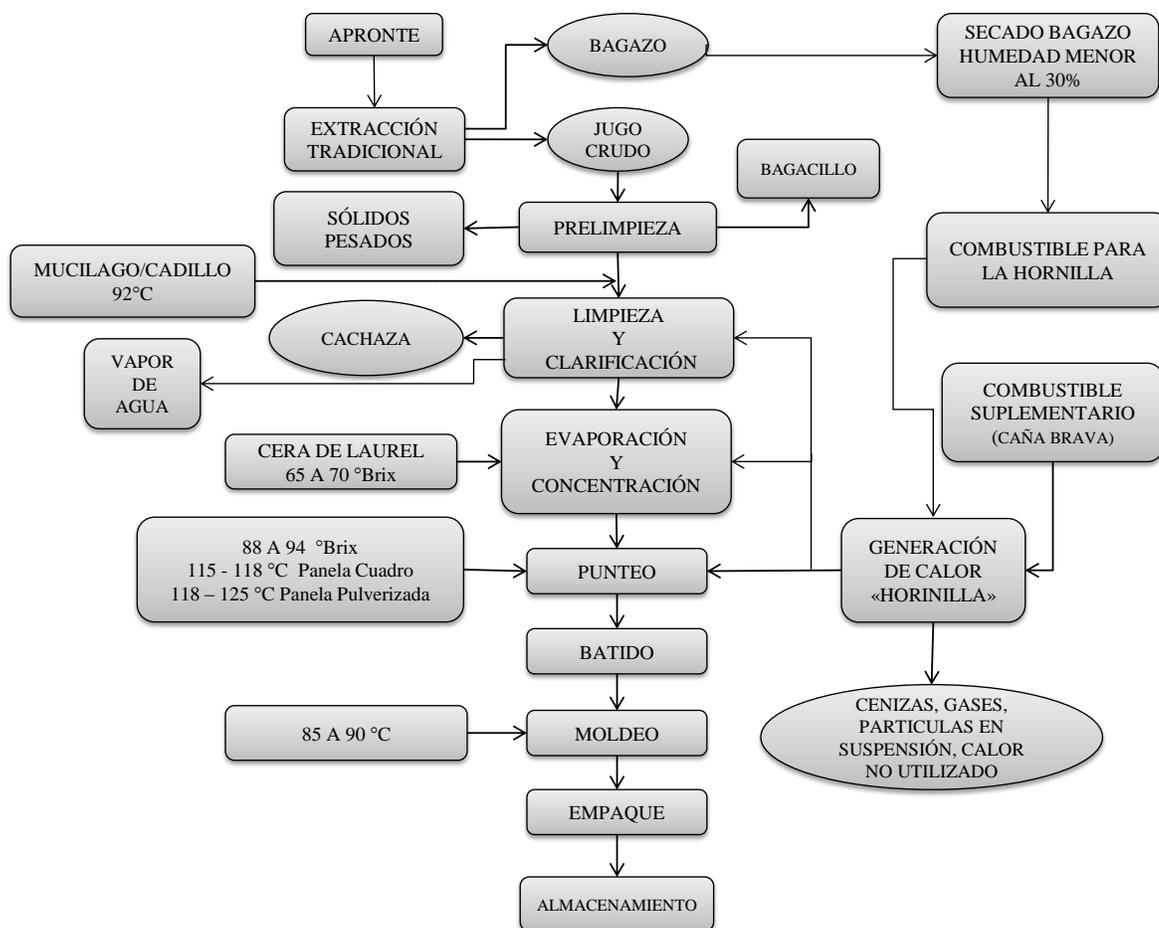


Figura 4.21. Diagrama de Bloques del Proceso Tradicional de Producción de Panela

4.2.3. Parámetros de Interés en el Proceso Tradicional de Fabricación de Panela

El proceso de producción de panela en el grupo de producción La Laja del Municipio de la Vega (Cauca), fue caracterizado teniendo en cuenta los parámetros y variables de mayor impacto que inciden en la calidad del producto final (panela). De acuerdo con lo expuesto en el diagrama de bloques Fig.4.21, hay 4 etapas de interés dentro del proceso; la extracción, la limpieza, la evaporación-concentración de los azúcares en los jugos y el punteo de la miel, para obtener los valores de dichos parámetros y que éstos sean confiables, el seguimiento del proceso de producción de panela se hizo durante 3 meses, se tomaron medidas en cada una de las etapas durante cada molienda, estas moliendas se hacían 4 veces a la semana durante tres meses esto nos da un total de 48 veces en las que se midieron los parámetros, con estos datos se realizó posteriormente el proceso de cálculo y análisis del gasto energético del trapiche. A seguir se explicara cada una de las etapas para determinar los parámetros de interés que se midieron y que brindan la información necesaria para el desarrollo de este trabajo.

Las variables medidas en cada una de las etapas de elaboración de panela fueron: pH de los jugos, temperatura (°C), y porcentaje de sólidos solubles °Brix, estos parámetros deben ser controlados durante todo el proceso para garantizar la homogeneidad y calidad del producto final. También se determinó el grado de madurez de la caña procesada en la elaboración de la panela en cada molienda. Además, se tomaron medidas del peso de la caña (Kg), peso del jugo de caña (Kg), peso del bagazo (Kg), cantidad de panela (Kg), y peso de los residuos (Kg) para realizar los cálculos del diagnóstico energético del trapiche panelero.

4.2.3.1. Etapa de Extracción

En esta etapa se realizó la extracción del jugo de la caña panelera, mediante la compresión física de los tallos de caña en los rodillos o mazas del molino que suelen ser estriados. Para garantizar la buena calidad de la panela se hace necesario controlar algunas variables y

procesos dentro de esta etapa que han sido determinantes para los resultados del análisis fisicoquímico de la panela.

El primer factor a tener en cuenta es el grado de madurez de la caña, a continuación se hace una breve descripción de este. El corte de la caña se debe realizar cuando la caña alcanza el sazonado adecuado, o sea cuando tiene la mayor concentración de sólidos solubles, y alcanza la madurez en sacarosa.

Las cañas inmaduras y sobremaduras dan rendimientos menores y poseen mayor cantidad de azúcares reductores lo cual influyen negativamente en la dureza y el color de la panela, el índice de madurez está determinado por la mayor concentración de sólidos solubles y se halla con el uso del refractómetro; para llevar a cabo esta medición se tomaron 20 (cañas al azar) muestras de caña representativas del cultivo, a las cuales se les realiza una lectura de la concentración de sólidos solubles en los jugos del sexto o séptimo entrenudo del tercio superior (A) y otra del tercio inferior (B), con esas dos lecturas se hace el promedio y se determina el estado de madurez como el resultado de la división de A/B, de acuerdo con los rangos de índices de madurez mostrados en el Tabla 4.7. A continuación se da una breve explicación de cómo se calculó el número de muestras representativas.

El determinar el tamaño de una muestra representa una parte esencial del método científico para poder llevar a cabo la investigación. Al muestreo lo podemos definir como el conjunto de observaciones necesarias para estudiar la distribución de determinadas características en la totalidad de una población, en este caso la extensión total ocupada por las cañas para llevar a cabo la molienda, a partir de la observación de una parte o subconjunto de una población, denominada muestra. El muestreo debe ser representativo, ya que proporciona ventajas de índole económicas y prácticas.

Al definir el tamaño de la muestra, se deberá procurar que la información sea representativa, válida y confiable. Por lo tanto, el tamaño de la muestra será delimitado por los objetivos del estudio y las características de la población. En la tabla 4.5 se muestran las fórmulas que se utilizan para calcular el tamaño de la muestra de acuerdo con el tipo de población.

Tabla 4.5. Fórmulas para calcular la muestra según el tipo de población

Población infinita	Población Finita
$n = \frac{p \times q}{e^2}$	$n = \frac{Z^2 \times p \times q \times N}{e^2(N - 1) + Z^2 \times p \times q}$
Cuando no se sabe el número exacto de unidades del que está compuesta la población.	Cuando se conoce cuántos elementos tiene la población
En donde: Z = nivel de confianza. p = Probabilidad a favor. q = Probabilidad en contra. N = Universo e = error de estimación. n = tamaño de la muestra	

Como se conoce el número de cañas utilizadas para cada molienda se utiliza la ecuación de población finita. El nivel de confianza (**Z**) puede tomar valores de 95%, 94%, 93%, 92%, 91%, 90%, 80%, 62.275% y 50% según el estudio lo requiera. Para este caso en particular se trabajará con $Z = 95\%$ para obtener datos más confiables.

Además se estima las características del fenómeno investigado, donde se considera la probabilidad de que ocurra el evento (p) y la de que no se realice (q); es decir de que la caña este madura o no, siempre tomando en consideración que la suma de ambos valores $p + q$ será invariablemente siempre igual a 1, en ese caso cuando no se cuenta con información previa, se le asignan los siguientes valores $p = 0.50$ $q = 0.50$.

Para determinar el grado de error máximo aceptable en los resultados de la investigación, éste puede ser hasta del 10%; ya que variaciones superiores al 10% reducen la validez de la información, se trabajara con un error del 9%. Durante la investigación del proceso de producción de panela en el grupo la Laja se obtuvo la información necesaria para determinar la población (caña) y así calcular la muestra. A continuación se realiza el cálculo de la muestra con la que se trabajó durante toda la investigación.

Z = nivel de confianza 95%.

p = Probabilidad a favor 0.50.

q = Probabilidad en contra 0.50.

N = Universo 65 cañas por molienda

e = error de estimación 9%.

n = tamaño de la muestra.

$$n = \frac{(0.95)^2 \times 0.50 \times 0.50 \times 65}{(0.09)^2(65 - 1) + (0.95)^2 \times 0.5 \times 0.5}$$

$$n = \frac{14.66}{0.744} = 19.70 \approx 20$$

Para llevar a cabo el estudio se debe trabajar con una muestra de 20 cañas, los datos consignados en la Tabla 4.6 son el promedio de las 48 veces que se realizó la medición;

Tabla 4.6. Promedio de los datos obtenidos de la medición de los °Brix de 20 muestras de caña del cultivo seleccionado para la molienda.

Muestra	Parte terminal (A) °Brix	Parte Basal (B) °Brix
1	22	22
2	20	21
3	18	22
4	19	20
5	21	23
6	21	22
7	16	20
8	18	20
9	20	18
10	18	18
11	22	16
12	20	22
13	18	18
14	20	21
15	20	21
16	23	23
17	20	23
18	21	22
19	18	20
20	20	20
Promedio	19.75	20.6

$$Madurez = \frac{A}{B} = \frac{19.75}{20.6} = 0.9587 \quad (4.1)$$

Tabla 4.7. Estado de madurez de la caña de acuerdo con el índice de madurez

Índice de Madurez (A/B)	Estado de Madurez
0.95 – 1.0	Caña Madura
>1.0	Caña sobremadura
<0.95	Caña inmadura

El análisis anterior da información sobre el estado de madurez de la caña dispuesta para la molienda, se hace importante conocer ese valor para saber cómo va a influir en el estado final del producto. El resultado obtenido del índice de la madurez (Ecuación 4.1) de las cañas utilizadas es de 0.9587 ese valor corresponde a cañas maduras, y garantizan el estado ideal para su corte y molienda pues tienen la cantidad de sacarosa ideal para obtener un producto de calidad, si se encuentra con panela de mala calidad se tendrá que verificar las otras etapas del proceso, ya que el corte se realizó en óptimas condiciones.

Después de verificar el óptimo grado de madurez de la caña se procede a la etapa de molienda. Se hace importante identificar y medir las variables de interés que inciden dentro de la etapa de extracción de jugo de caña panelera por el método tradicional, ya que nos dará la información necesaria de efectividad para comparar esos resultados con los obtenidos a través del otro método para así verificar la viabilidad del Método de Disolución – Extrusión que es el objetivo de este trabajo. En esta parte de la investigación se determinó la cantidad y calidad de jugo de caña obtenido para una cantidad de caña panelera conocida cuando se utiliza el molino tradicional de mazas. En la Tabla 4.8, se presentan los parámetros más importantes y sus valores.

Con los valores de la tabla 4.8 se encuentra la extracción en peso de acuerdo con la ecuación 2.3, conociendo el peso del jugo extraído y el peso de la caña procesada, se estima que la extracción en peso es:

$$Ep = \frac{100 \text{ Kg}}{200 \text{ Kg}} * 100\% = 50\%$$

De los datos reportados en la Tabla 4.8 se puede ver que la capacidad del molino en las condiciones actuales de funcionamiento solo ha sido del 50%, en la literatura se encuentra que la capacidad de un molino de tres mazas bajo unas buenas condiciones de instalación, operación y mantenimiento estará entre el 58% y 65%, por lo que se puede concluir que el molino utilizado en el grupo de producción La Laja Figura 4.23. no se encuentra en sus óptimas condiciones de funcionamiento, lo que afecta directamente en la cantidad en kg de panela producida, esto incide en las ganancias del productor.

Tabla 4.8. Datos obtenidos en la etapa de Extracción de los jugos de caña.

Parámetros de interés	Valores
Tiempo que toma la molienda utilizando el molino tradicional de mazas	30 minutos
Temperatura ambiente	24°C
Peso de la caña procesada para un día de trabajo	200 Kg
Ph de los jugos de la caña panelera	5.49, 5.35, 5.31 Promedio = 5.38
°Brix de los jugos	21, 20, 18 Promedio = 19.67
Masa de agua	80.33 Kg
Masa de miel	19.67 Kg
Peso del jugo de caña	100 Kg
Peso del bagazo	87.5Kg

Del mismo modo se puede calcular el porcentaje de extracción del jugo real E_j , de acuerdo a la ecuación 2.6 donde la cantidad de jugo contenido realmente en la caña P_{jc} está determinada por la fibra (P_f) presente en el tallo, y el peso de la caña molida P_c , es decir que el peso de la fibra para este caso va a estar dado por la relación $P_f = 12,65\% * 200 = 25.3$ kg. Entonces reemplazando en la ecuación 2.6 se tiene que:

$$E_j = \frac{100 \text{ Kg}}{(200 - 25.3) \text{ Kg}} * 100\% = 57.24\%$$

E_j da el porcentaje de jugo que se debería obtener en la etapa de extracción y se encuentra por encima del valor de E_p que reporta la cantidad de jugo obtenido en la realidad, hay pérdidas del 7.24 %, que se debe principalmente al funcionamiento del molino.

En la Tabla 4.9 se muestran las características del molino utilizado en el grupo de producción La Laja. Con estos datos se puede calcular la característica básica que define el desempeño del molino y con esta información definir si el molino tiene la capacidad necesaria de procesar la cantidad de caña por hora que se requiere moler.

Tabla 4.9. Especificaciones Técnicas del Molino R-2

Capacidad Kg Caña / Hora	Fuerza Motriz Necesaria			Polea Molino	Reducción Velocidad	
	Diesel	Eléctrico	Gasolina			
500	5 a 6	5	8	39"	20.5 a 1	
Dimensiones de mazas (pulgadas)					RPM	
Superior		Quebradora		Exprimidora		Recomendada Maza Superior
Largo	Diámetro	Largo	Diámetro	Largo	Diámetro	
5	5 1/2	5	4 1/2	5	5 3/8	15 a 16

Se calcula la capacidad del molino, utilizando la ecuación 2.1, y teniendo en cuenta los valores de la Tabla 4.8, donde $N = 3$, $n = 16$ r.p.m, $D = 0.2$ m, $L = 1.5 * D = 0.21$ m.

Se reemplaza estos valores en la ecuación 2.1, y se toma como porcentaje de fibra de caña $f = 12.65\%$ (tabla 2.3) como un promedio, para cualquier variedad de caña, se puede calcular la capacidad de molienda del molino como:

$$Cap = \frac{0.55 * 16 * 0.21 * 0.1397^2 * \sqrt{3}}{0.1265} = 0.494 \approx 0.5 \text{ TCH}$$



Figura 4.23. Molino Panelero R-2

La cantidad de caña que se procesa en la actualidad es de 400 kg hora, por lo que se puede concluir que el molino tiene la capacidad de molienda necesaria que requiere el proceso.

4.2.3.2. Etapa de Limpieza

La pre-limpieza de los jugos de la caña se realiza inmediatamente después de la extracción de estos, y consiste en hacer pasar los jugos por una lona que permite cernirlos, en la lona quedan depositados los residuos más grandes como restos de bagazo, hojas, raíces entre otros y deja pasar más limpios los jugos, para continuar con la etapa de limpieza. En la Tabla 4.10 se presentan los datos obtenidos de la pre-limpieza.

Tabla 4.10. Datos obtenidos de las variables de interés de la etapa de pre-limpieza

Parámetro de Interés	Valor
Tiempo que toma la pre-limpieza	6 minutos
Temperatura ambiente	24 °C
Peso de los residuos después de pasar los jugos por el cernidor	0.5 Kg
°Brix de los jugos	20 , 19, 19 Promedio: 19.33
pH de los jugos	5.45, 5.40, 5.41 Promedio: 5.42

El peso de los residuos contenidos en el jugo fue de solo 0.5 kg, la primera limpieza no alcanza a retirar todas las impurezas presentes en los jugos, por lo que se hace necesario seguir con el proceso de limpieza.

Después de la pre-limpieza, los jugos se conducen a tres fondos inoxidables dispuestos en la hornilla, 2 fondos de 40 litros y uno de 28 litros, a esta paila se le conoce como clarificadora o descachazadora y aquí se lleva a cabo el proceso de limpieza o clarificación. El jugo extraído de la molienda lleva consigo una serie de impurezas que no pueden ser retiradas de manera manual por eso es importante realizar la limpieza, el proceso de clarificación o limpieza se lleva a cabo gracias a la acción combinada del calor proporcionado por la hornilla, el tiempo y el poder coagulante de los polímeros celulósicos contenidos en la corteza del cadillo que se adicionan cuando los jugos alcanzan temperaturas entre los 85-90°C generando un sobrenadante conocido como "cachaza" el cual se retira fácilmente con la ayuda del remellón. Cuando se alcanza una temperatura de 60 °C se forma una cachaza poca densa que debe ser retirada, en la tabla 4.11 se muestran los datos obtenidos de la primera descachazada.

Tabla 4.11. Datos obtenidos de la primera descachazada de los jugos de caña

Variables medidas para la primera descachazada de los jugos de caña					
Paila 1		Paila 2		Paila 3	
Tiempo transcurrido	19 minutos	Tiempo Transcurrido	33 minutos	Tiempo transcurrido	55 minutos
Temperatura	90 °C	Temperatura	89 °C	Temperatura	89 °C

Para continuar con el proceso de limpieza del jugo se prepara en un recipiente una mezcla de agua y cadillo, se agita hasta obtener una sustancia densa, que se adicionará al jugo.

La mezcla de agua y cadillo utilizada para la limpieza de 200 Kg de jugo de caña, fue de 3 Kg, 0.15 Kg de cadillo y 2.85 Kg de agua, la cantidad de mucílago se dividió en dos o tres cantidades para conseguir una buena limpieza de los jugos se adiciona el cadillo, en cada una de las pailas una vez los jugos alcanzan temperaturas cercanas a los 90 °C se retira la segunda cachaza que se ha formado "cachaza negra" y se adiciona más mucílago con el fin de retirar la tercera cachaza "cachaza blanca", poco antes de que los jugos alcancen la ebullición a 94°C. En la siguiente tabla se muestran las variables de interés y sus valores en esta etapa.

Tabla 4.12. Datos obtenidos de los parámetros a la hora de adicionar el cadillo a los jugos

Datos obtenidos de los parámetros de interés en la adición del cadillo					
Paila 1		Paila 2		Paila 3	
Tiempo de calentamiento de los jugos	19 minutos	Tiempo de calentamiento de los jugos	35 minutos	Tiempo de calentamiento de los jugos	55 minutos
Temperatura	92 °C	Temperatura	91.3 °C	Temperatura	91 °C
°Brix jugos	24	°Brix jugos	23	°Brix jugos	23
pH jugos	5.32	pH jugos	5.23	pH jugos	5.11

Los datos reportados en la tabla 4.12 muestran que las condiciones de temperatura, pH y °Brix de los jugos al adicionar al cadillo deben ser las mismas para obtener una mejor limpieza.

4.2.3.3. Etapa de Evaporación y Concentración de los jugos

En la etapa de evaporación y concentración, la temperatura debe ser lo más constante posible y el tiempo de concentración del jugo no debe ser superior a dos o tres horas (dependiendo de la cantidad de jugo), si éste se sobrepasa, la panela puede presentar cambios en su color. En este caso los parámetros que se midieron se muestran en la Tabla 4.13 y Tabla 4.14.

Tabla 4.13. Parámetros considerados en la etapa de concentración

Tiempo transcurrido en la etapa	135 minutos
Temperatura ambiente	24 °C

Tabla 4.14. Datos de las variables de interés en la etapa de concentración de los jugos

Tiempo Min	Ph			°Brix			Temperatura °C		
	Paila 1	Paila 2	Paila 3	Paila 1	Paila 2	Paila 3	Paila 1	Paila 2	Paila 3
0 min	5.49	5.35	5.31	21	20	18	40	33.5	31.3
10 min	5.49	5.35	5.31	21	20	18	60	45	40
30 min	5.32	5.36	5.46	24	20	18	94.5	71.6	55.8
45 min	5.30	5.29	5.26	25	20	20	95	93.5	74.3
60 min	5.27	5.20	5.27	36	24	24	95.6	94.3	87.4
80 min	5.21	5.23	5.15	44	23	22	96.1	94.3	89.8
100 min	5.13	5.17	5.11	69	30	23	98.6	94.5	93.1
105 min	5.13	5.17	5.15	74	33	25	100.6	95.1	94
110 min	5.15	5.15	5.16	85	42	30	104.0	100	98

De las tablas se observa que el pH medido en las tres pailas durante toda la etapa de evaporación es menor a 5.8 lo que favorece la inversión de la sacarosa incidiendo en la dureza y color de la panela, es necesario que el campesino haga un control permanente de los jugos para mantener un pH cercano a 5.8.

La paila 3 alcanza una mayor temperatura más rápido que las otras, es por eso que durante este proceso los jugos de las otras dos pailas después de ser descachazados se pasan a la paila 3 para que se termine de evaporar el agua y concentrar los azúcares.

4.2.3.4. Etapa de punteo de la panela

En la fase final del proceso los jugos de la paila 2 y 3 se recogen en la paila 1 para llegar al punto de miel, las mieles alcanzan temperaturas superiores a los 100 °C y se realiza en la paila concentradora o "punteadora" ; en la etapa se emplean los agentes antiespumante y antiadherente para evitar que los jugos durante la ebullición rebosen la altura de la falca de la paila, la segunda función como antiadherente, a fin de formar una película protectora sobre las paredes de la paila que evite la adhesión de la miel a las paredes, su caramelización y quemado, para tal propósito se utilizó cera de laurel. Como se mencionó anteriormente, la inversión de la sacarosa es función de la temperatura, el pH y el tiempo de residencia de los jugos en la hornilla; a partir de 100 °C se acelera notablemente.

Cuando se elabora panela se requiere realizar esta etapa en el menor tiempo posible y con un pH cercano a 5.8 y una buena velocidad de calentamiento en la hornilla esto permite una rápida concentración de los jugos sin quemar el producto. Por esta razón se deben controlar estos parámetros. En esta etapa se obtienen las mieles del producto final, se deben cuantificar los grados Brix de la miel teniendo en cuenta que una concentración de grados Brix por encima de lo normal hace difícil el moldeo de la panela y por debajo del ideal (90 - 94 °Brix), origina panela que no solidifica. A continuación se muestran los datos obtenidos de esta etapa.

Tabla 4.15. Datos de tiempo y temperatura para la etapa de punteo

Tiempo (s)	T (°C)
6:23	100.5
6:30	102.1
6:37	106.0
6:45	113.1
6:50 Punto de panela en cuadro	118.0
6:55	123.6
6:58	125.6
7:00	127.3
7:02	127.0
7:05 Punto de panela pulverizada	128.0

La panela puede tener dos presentaciones en cuadro o pulverizada, el proceso para obtener algunas de las dos es el mismo lo único que se debe tener en cuenta es el punto de miel, para panela en cuadro se alcanza más rápido y a una temperatura entre 110 °C y 118°C, el punto de miel para pulverizada se encuentra a una temperatura entre 119°C y 128°C.

El tiempo empleado para que el jugo llegue a punto de miel ha sido de 50 minutos, ese dato es de vital importancia para compararlo con el tiempo empleado en esa misma etapa por el otro método.

Tabla 4.16. Parámetros de interés en la etapa de punteo de los jugos de caña

Parámetros de interés en la etapa final de la elaboración de la panela	
Tiempo de permanencia de los jugos	50 minutos
Peso de la panela obtenida	18 Kg
Combustible utilizado en la hornilla	Bagazo y caña brava
Peso del bagazo utilizado en la hornilla	25 Kg
Peso de la caña brava utilizado en la hornilla	45 Kg
Peso de cenizas del combustible	3.5 Kg
Peso de la cachaza retirada de los jugos	2 Kg

El punto final de la panela se alcanza cuando la concentración de sólidos solubles está entre 90 y 94 °Brix el campesino panelero suele determinar el punto final al "ojo" basándose en métodos empíricos como la velocidad de escurrimiento de las mieles sobre la falca o el remellón.

Un método certero para determinar el punto final de la panela se logra mediante la medición de la temperatura de ebullición de la miel que depende de la presión atmosférica del lugar, del ° Brix y de la pureza de las mieles.

Una vez se alcanza el punto de panela se sacan las mieles de la hornilla y se conducen a un fondo de acero inoxidable, donde se someten a una acción de agitado intensivo e intermitente operación que demora entre 10 a 15 minutos. Después de un período de agitación inicial de unos tres a cuatro minutos, las mieles se dejan en reposo y comienzan a crecer en la batea hasta casi desbordarse, siendo necesario reiniciar la agitación. Este proceso se repite dos o tres veces. El propósito del batido ha sido modificar la estructura y la textura de las mieles, y reducir su capacidad de adherencia. Al incorporar aire a las mieles durante el batido, los cristales de sacarosa crecen y adquieren porosidad, de forma que cuando la panela se enfría, asume su característica de sólido compacto. Posteriormente, se deposita en las gaveras de madera o se hace pasar por una zaranda para sacar la panela en polvo y se deja en reposo por un periodo de una hora para luego ser empacada.

El proceso de producción de panela inicio con una cantidad de 100 kg de jugo, durante el proceso se evaporo un gran porcentaje de agua contenida en los jugos hasta obtener 18 kg de panela, dando un rendimiento de solo 18 %.

4.3. Diagnóstico Energético del Proceso Productivo Tradicional de Panela

A continuación se presentan los resultados del balance de masas del proceso de producción de panela por el método tradicional, partiendo de los datos de la tabla 4.8 (valores medidos en la producción de panela en el grupo de producción La Laja) estos resultados permitirán realizar una comparación de los valores de las variables obtenidas por el otro método para determinar cuál es el más eficiente energéticamente.

4.3.1. Balance de masas

Teniendo en cuenta el modelo de balance de masas de la ecuación 2.9, se realiza el análisis de balance de masas para el proceso de fabricación de panela, tradicional.

Inicialmente se presentan las consideraciones y cálculos para la etapa de combustión en la hornilla y luego para la etapa de producción, estableciendo valores que permitirán diagnosticar el gasto energético en el proceso de producción.

4.3.1.1. Etapa de combustión

A continuación se realizaran los calculados de los flujos másicos correspondientes a el balance de masas para la etapa de combustión, entre ellos el flujo de bagazo seco ($\dot{m}_{b.s.}$), agua en el bagazo ($\dot{m}_{a.b.}$), aire seco ($\dot{m}_{a.s.}$), agua en el aire ($\dot{m}_{a.a.}$), gases de combustión secos ($\dot{m}_{g.s.}$), agua en los gases ($\dot{m}_{a.t.}$) y residuos (\dot{m}_r), respectivamente.

Flujo de bagazo seco

Para el caso del trapiche de La Laja se obtuvo que para 200 Kg de caña panelera procesada, se genera una cantidad de bagazo húmedo de 87.5 Kg, todo esto en un tiempo de 30 minutos (1/2 hora), que fue el tiempo que demoró la molienda. De estos datos se puede establecer el flujo de caña $\dot{m}_{caña}$, el flujo de bagazo húmedo $\dot{m}_{b.h}$ y el de bagazo seco $\dot{m}_{b.s.}$

De esta forma, el flujo másico de caña panelera, viene dado por la siguiente relación:

$$\dot{m}_{caña} = \frac{200 \text{ Kg}}{30 \text{ min}} = 400 \text{ Kg/h}$$

Igualmente el flujo másico de bagazo húmedo es:

$$\dot{m}_{b.h.} = \frac{87.5 \text{ Kg}}{30 \text{ min}} = 175 \text{ Kg/h}$$

Y luego, de la ecuación 2.10 se tiene el flujo másico de bagazo seco es:

$$\dot{m}_{b.s} = 0.5 \dot{m}_{b.h.} = 87.5 \text{ Kg/h}$$

Flujo de aire seco

Tomando la ecuación 2.12 se puede estimar un flujo de aire seco en los gases de combustión asumiendo que todo el nitrógeno presente en los gases de combustión es el que está en el aire atmosférico (79% N_2 y 21% O_2). Considerando que 1 mol de nitrógeno ($N_2=28$ g), entonces 1 kmol/h de N_2 sería igual a 28 Kg/h, entonces sustituyendo este valor en la ecuación 2.12 se tiene:

$$(O_2)_{aire} = 28 \text{Kg/h} * \frac{0.21}{0.79} = 7.44 \text{ Kg/h}$$

Y reemplazando en la fórmula 2.13 se tiene el flujo másico de aire seco:

$$\dot{m}_{a.s.} = \dot{m}_{O_2} + \dot{m}_{N_2} = \frac{(7.44 + 28) \text{Kg}}{h} = 35.44 \text{Kg/h}$$

Flujo másico de agua en el aire

Teniendo en cuenta que la humedad relativa promedio de la zona de trabajo es de $\omega = 68\%$, (promedio de datos meteorológicos de humedad relativa en La Laja-La Vega-Cauca), reemplazando los valores en la ecuación 2.16, se tiene el flujo másico del agua en el aire:

$$\dot{m}_{a.a.} = \omega \cdot \dot{m}_{a.s} = 0.68 * 35.44 \text{Kg/h} = 24.1 \text{Kg/h}$$

Flujo de residuos

El flujo másico de los residuos, \dot{m}_r , representa la cantidad de cenizas en la combustión del bagazo. En ese caso el flujo de residuos será el porcentaje de cenizas presente en el bagazo seco usado en la combustión, según la ecuación 2.17.

$$\dot{m}_r = 2.5\% * \dot{m}_{b.s.} = 0.025 * 87.5Kg/h = 2.19 Kg/h$$

Flujo másico de agua en los gases de combustión

El flujo másico de agua en los gases de combustión es calculado a partir de la ecuación 2.18, donde se hace necesario calcular el flujo másico de agua generada, el flujo de masa de agua en el bagazo y tomar el valor del flujo de agua en el aire calculado anteriormente.

El flujo de agua en el bagazo puede ser calculado de la ecuación 2.10, teniendo en cuenta que el agua en el bagazo es el 50% del bagazo húmedo

$$\dot{m}_{a.b.} = 87.5 Kg/h * 0.5 = 43.75Kg/h$$

El flujo de agua generada es calculado a partir de la ecuación 2.20, teniendo en cuenta el flujo de bagazo seco usado en la hornilla calculado anteriormente.

$$\dot{m}_{a.generada.} = 9 * 6.5\% * \dot{m}_{b.s.} = 9 * 0.065 * 87.5Kg/h = 51.18 Kg/h$$

Luego reemplazando los valores correspondientes en la ecuación 2.18, el flujo másico de agua en los gases de combustión está dado por:

$$\dot{m}_{a.t.} = (43.75Kg/h) + 51.4Kg/h + 51.18 Kg/h = 146.33 Kg/h$$

Flujo de gases secos

El flujo de gases secos generados en la cámara de combustión, se determina a partir de la ecuación de balance de masa descrita para el proceso de combustión en la producción de panela, despejando $\dot{m}_{g.s.}$ de la ecuación (2.21):

$$\dot{m}_{g.s.} = \dot{m}_{b.s.} + \dot{m}_{a.b.} + \dot{m}_{a.s.} + \dot{m}_{a.a.} - (\dot{m}_r + \dot{m}_{a.t.})$$

$$\dot{m}_{g.s.} = 87.5Kg/h + (87.5Kg/h * 0.5) + 35.44Kg/h + 51.4Kmol/h - (2.19Kmol/h + 146.33 Kg/h)$$

$$\dot{m}_{g.s.} = 69.57 \text{ Kg/h}$$

A continuación se presenta una tabla resumen con los parámetros involucrados en el balance de masas de la etapa de combustión para el proceso de producción de panela procesando los jugos de caña extraídos mediante la molienda de la caña panelera con un molino tradicional de mazas.

Tabla 4.17. Cálculos del balance de masas en la etapa de combustión del proceso de producción de panela

PARÁMETRO	VALOR
Flujo másico de caña procesada $\dot{m}_{caña.}$	$\frac{200 \text{ Kg}}{30 \text{ min}} = 400 \text{ Kg/h}$
Flujo másico de bagazo húmedo $\dot{m}_{b.h.}$	$\frac{87.5 \text{ Kg}}{30 \text{ min}} = 175 \text{ Kg/h}$
Flujo másico de bagazo seco $\dot{m}_{b.s.}$	$0.5 \dot{m}_{b.h.} = 87.5 \text{ Kg/h}$
Flujo másico de aire seco $\dot{m}_{a.s.} = \dot{m}_{O_2} + \dot{m}_{N_2}$	35.44 Kg/h
Flujo másico de agua en el aire $\dot{m}_{a.a.} = \omega \cdot \dot{m}_{a.s.}$	24.1 Kg/h
Flujo másico de residuos $\dot{m}_r = 2.5\% * \dot{m}_{b.s.}$	2.19 Kg/h
Flujo másico de agua en los gases de combustión $\dot{m}_{a.t.} = \dot{m}_{a.b.} + \dot{m}_{a.a.} + \dot{m}_{a.generada.}$	146.33 Kg/h
Flujo de gases secos $\dot{m}_{g.s.} = \dot{m}_{b.s.} + \dot{m}_{a.b.} + \dot{m}_{a.s.} + \dot{m}_{a.a.} - (\dot{m}_r + \dot{m}_{a.t.})$	69.57 Kg/h

4.3.1.2. Etapa de producción

En la etapa de producción se considera que entra jugo clarificado y sale panela. El flujo másico de jugo clarificado puede ser estimado de acuerdo a la ecuación 2.2, teniendo en cuenta que el porcentaje de extracción del molino de $EM = 50\%$ y considerando una producción de cachaza de $CH = 3\%$. Reemplazando los valores correspondientes se tiene que:

$$\dot{m}_{j.c.} = \frac{\dot{m}_{caña}(EM - CH)}{100} = \frac{400Kg/h(50 - 3)}{100}$$

$$\dot{m}_{j.c.} = 188Kg/h$$

Y del mismo modo, el flujo de panela producida se calcula mediante la ecuación 2.22, teniendo en cuenta que una densidad del jugo medida de $^{\circ}B_{j.c} = 19.33$ °Brix y de la panela de $^{\circ}B_p = 85$ °Brix y reemplazando en la ecuación mencionada, se obtiene:

$$\dot{m}_p = \frac{\dot{m}_{j.c.}^{\circ}B_{j.c.}}{^{\circ}B_p} = \frac{188 Kg/h * 19.33}{85}$$

$$\dot{m}_p = 42.75 Kg/h$$

El valor obtenido de \dot{m}_p es mayor al medido, esto se debe a que hay pérdidas del producto en el proceso, la miel que queda pegada en la paila punteadora y la panela que queda en la paila de batido.

A continuación se presenta una tabla resumen con los parámetros involucrados en el balance de masas de la etapa de producción de panela al procesar los jugos extraídos mediante molienda tradicional de mizas.

Tabla 4.18. Cálculos del balance de masas en la etapa de producción del proceso de producción de panela

PARÁMETRO	VALOR
Flujo másico de jugo extraído $\dot{m}_{j.c.} = \frac{\dot{m}_{caña}(EM - CH)}{100}$	188 Kg/h
Flujo másico de panela producida $\dot{m}_p = \frac{\dot{m}_{j.c.} \cdot \text{°}B_{j.c.}}{\text{°}B_p}$ $\text{°}B_{j.c.} = 19.33 \text{ y } \text{°}B_p = 85$	40.76 Kg/h

4.3.2. Balance de energía

Es muy importante determinar que parámetros intervienen en el gasto energético del trapiche para estimar sus efectos en la producción panelera. A continuación se calculan los flujos de energía de entrada en el proceso que son, los asociados al bagazo (\dot{E}_b) y al aire seco ($\dot{E}_{a.s.}$) y flujos energéticos de salida que son los asociados a los gases en la chimenea ($\dot{E}_{g.ch.}$), el flujo debido a los residuos (\dot{E}_r), el flujo energético aprovechado ($\dot{E}_{e.a.}$), y las pérdidas energéticas ($\dot{E}_{p.e.}$)

Flujo energético asociado al bagazo

De acuerdo a la ecuación 2.25, la relación para encontrar el flujo energético asociado al bagazo está dada por:

$$\dot{E}_b = \dot{m}_{b.s.} PCI + \dot{m}_{a.b.} \cdot h_f$$

Según la tabla 2.6. Para un bagazo con humedad del 50%, se tiene que el poder calorífico inferior del bagazo es PCI=2001.60 Kcal/Kg. Como una kilocaloría (kcal) es exactamente 4.1868 kilojulios (kJ), entonces PCI=8380.3 KJ/Kg.

La entalpia h_f del agua que se aproxima como la del líquido saturado a temperatura ambiente, es obtenida de las tablas termodinámicas del agua, tabla A1 (ANEXO A), obteniéndose un valor de $h_f = 104.89 \text{ KJ/Kg}$ para una temperatura ambiente de $T=24$ °C, que es la temperatura promedio de la zona de La Laja- La Vega (Cauca).

Reemplazando estos valores en la ecuación 2.25 mencionada se encuentra que el flujo energético asociado al bagazo es:

$$\dot{E}_b = (87.5 \text{ Kg/h} * 8380.3 \text{ KJ/Kg}) + ((87.5 \text{ Kg/h} * 0.5) * 104.89 \text{ KJ/Kg})$$

$$\dot{E}_b = 737865.2 \text{ KJ/h}$$

Flujo de Energía Asociado al Aire de Combustión

De acuerdo a la ecuación 2.27, se puede estimar el flujo de energía asociado al aire de combustión, considerando para ello los datos utilizados para calcular el flujo másico de aire seco consignado en la tabla 4.16. y los datos de las propiedades de los gases se obtiene:

$$\dot{E}_{a.s} = \dot{m}_{N_2} h_{N_2} + \dot{m}_{O_2} h_{O_2} + \dot{m}_{a.a} h_{a.a}$$

$$\dot{E}_{a.s} = (28 \text{ Kg/h} * 397.9 \text{ KJ/Kg}) + (7.44 \text{ Kg/h} * 213.11 \text{ kJ/Kg}) + (51.4 \text{ Kg/h} * 2547.2 \text{ KJ/Kg})$$

$$\dot{E}_{a.s} = 143652.81 \text{ KJ/h}$$

Flujo de Energía Asociado a los Gases en la Chimenea

De acuerdo a las temperaturas de la chimenea y el porcentaje de perdidas, tabla 2.7 puede ser estimado el flujo asociado a los gases en la chimenea mediante la ecuación 2.29. Tomando como referencia que la temperatura de salida de los gases medida fue de aproximadamente 390° C (valor tomado con la termocupla J) el porcentaje de pérdidas (ver tabla 2.7) será del 7.7 % de los flujos de energía asociados al bagazo y al aire de combustión, por lo que se tendría:

$$\dot{E}_{g.ch} = 7.7\% * (\dot{E}_{a.s} + \dot{E}_b) = 67876.89 \text{ KJ/h}$$

Flujo de Energía Aprovechado

El flujo energético aprovechado en el proceso se calcula de acuerdo a la ecuación 2.30.

$$\dot{E}_{e.a} = \dot{m}_p C_{p,p} \Delta T_p + \dot{m}_{CH} C_{p,CH} \Delta T_{CH} + \dot{m}_{a.e.} \cdot h_{fg}$$

Tomando los datos de la Tabla A.3, anexo A, y teniendo en cuenta para la cachaza una densidad de 10 °Brix y para la panela de 80 °Brix, el valor específico para la panela y para la cachaza es de 2.2 KJ/KgK y de 2 KJ/KgK respectivamente.

Por otro lado, el flujo másico de agua evaporada se calcula como la diferencia entre el flujo inicial del jugo y el flujo de la panela obtenida es decir:

$$\dot{m}_{a.e.} = 200 \text{ Kg/h} - 36 \text{ Kg/h} = 164 \text{ Kg/h}$$

Las diferencias de temperatura, es decir, el incremento de temperatura al cual son sometidos los jugos se toman como de 90°C = 363 K para el descachazado y 118°C = 391K, como el punto de la panela a cuadro, de acuerdo a los resultados de la tabla 4.10 y de la tabla 4.14, respectivamente. También se considera que el flujo de cachaza es el 3% de la producción de panela obteniendo:

$$\dot{m}_{CH} = 3\% * \dot{m}_p = 1.28 \text{ Kg/h.}$$

La entalpia de vaporización del agua $h_{fg} = 2276,86 \text{ KJ/h}$, se calculó tomando los datos del anexo A, teniendo en cuenta las condiciones de la zona de trabajo. Reemplazando los valores anteriormente calculados en la ecuación 2.30 se tiene:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{e.a} &= (40.76 * 2.2 * 391) + (1.28 * 2 * 363) + (164 * 2276,86) \text{ KJ/h} \\ \dot{E}_{e.a} &= 409396.07 \text{ KJ/h} \end{aligned}$$

Flujo de Energía Asociado a Pérdidas

Las pérdidas por transferencia de calor a través de las paredes no se calculan directamente, sino que se obtienen a partir del balance de energía mediante la ecuación 2.31.

$$\dot{E}_{p.e} = \dot{E}_b + \dot{E}_{a.s} - (\dot{E}_{g.ch} + \dot{E}_{e.a})$$

Reemplazando cada uno de los valores calculados anteriormente se obtiene:

$$\dot{E}_{p.e} = (737865.2 \text{ KJ/h} + 143652.81 \text{ KJ/h}) - (67876.89 \text{ KJ/h} + 409396.07 \text{ KJ/h})$$

$$\dot{E}_{p.e} = 404245.05 \text{ KJ/h}$$

A continuación se presenta una tabla resumen de los parámetros involucrados en el balance de energía para la producción de panela procesando los jugos extraídos por el método de molienda tradicional de mazas.

Tabla 4.19. Cálculos del balance de energía en el proceso de producción de panela

PARÁMETRO	VALOR	% TOTAL DE ENERGIA
Flujo energético asociado al bagazo $\dot{E}_b = \dot{m}_{b.s}.PCI + \dot{m}_{a.b.}.h_f$	737865.2 KJ/h	Suministrada 100%
Flujo de Energía Asociado al Aire de Combustión $\dot{E}_{a.s} = \dot{m}_{N_2} h_{N_2} + \dot{m}_{O_2} h_{O_2} + \dot{m}_{a.a} h_{a.a}$	143652.81 KJ/h	
Flujo de energía aprovechado $\dot{E}_{e.a} = \dot{m}_p C_{p,p} \Delta T_p + \dot{m}_{CH} C_{p,CH} \Delta T_{CH} + \dot{m}_{a.e.} h_{fg}$	409396.07 KJ/h	Aprovechada 46.4 %
Flujo de Energía Asociado a los Gases en la Chimenea $\dot{E}_{g.ch} = 7.7\% * (\dot{E}_{a.s} + \dot{E}_b)$	67876.89 KJ/h	Perdida con los gases 7.7 %
Flujo de energía asociado a pérdidas $\dot{E}_{p.e} = \dot{E}_b + \dot{E}_{a.s} - (\dot{E}_{g.ch} + \dot{E}_{e.a})$	404245.05 KJ/h	Destruída 45.9 %

4.3.3. Cálculo de consumos energéticos en el proceso de fabricación de la panela

Para calcular las necesidades energéticas del proceso de producción de panela es necesario primero conocer algunos valores de ciertas variables y luego reemplazarlos en las formulas.

Masas de agua y de miel

Las masas de agua y de miel se han calculado a partir del análisis de cantidad de sólidos disueltos de los jugos (°Brix del jugo de caña panelera), donde se considera que la masa de miel corresponde a la fracción total de sólidos disueltos y el valor restante corresponde a la masa de agua (la cual se quiere evaporar).

De la tabla 4.8 se tiene que la masa de agua es el 80.33% del jugo y la masa de la miel es 19.67% del jugo, que corresponde a la medida de la concentración de sólidos solubles (°Brix) del jugo.

Temperatura de saturación del agua T_s a presión atmosférica

La diferencia de temperatura que se utiliza para calcular el calor a consumir durante el calentamiento del jugo de caña, es la existente entre la temperatura de evaporación del agua a la presión atmosférica y la temperatura ambiente. La primera se calcula mientras que la segunda se mide directamente.

La temperatura de saturación del agua T_s a la presión atmosférica es calculada utilizando las tablas de propiedades termodinámicas del agua saturada (ver anexo A). Primero se mide la presión atmosférica del lugar donde está ubicado el trapiche panelero, se toman los valores de presión de la tabla, que por ser relativamente cercanos se puede interpolar el valor de la temperatura.

Para la zona donde se realizó el trabajo se puede calcular la presión atmosférica en función de la altitud con la siguiente expresión matemática y utilizando los datos de la Tabla D1 (Ver anexo D):

$$P = \frac{101325}{e^{\left(\frac{Z}{8430.15 - Z * 0.09514}\right)}} \quad pa$$

De acuerdo con la ubicación del trapiche, en la Vereda Santa Juana (Municipio de la Vega – Cauca) este se encuentra aproximadamente a $Z= 1400$ metros sobre el nivel del mar, en este caso la presión sería $P = 85592.4 \text{ pa}$ o de $P = 0.86 \text{ bar}$.

Haciendo una interpolación en los datos de la tabla de propiedades termodinámicas del agua, (Anexo A) para valores entre 0.8 e 0.9 bar se obtuvieron las relaciones para la temperatura de saturación del agua como función de la presión atmosférica y la entalpia de vaporización del agua como función de esa misma presión P .

$$T_{s\text{agua}} = 36.1 * P + 67.82$$

$$\Delta h_{\text{vaporizacion}_{\text{agua}}} = 2341.3 - 84 * P$$

Usando estas relaciones se obtuvieron los datos de la tabla 4.20.

Tabla 4.20. Variables calculadas a partir de los datos de tablas termodinámicas

Altura del lugar de trabajo (Z)	1400 m
Presión atmosférica del lugar (P)	0.86 bar
Temperatura de saturación del agua (T_s)	98.9 °C
Entalpia de vaporización del agua (Δh_s)	2269.1 KJ/Kg

Donde el calor específico del agua C_{pa} se toma como 4.198 KJ/Kg.K, que corresponde al promedio para temperaturas entre 280 y 373 K [18], correspondientes al rango en el que se llevan a cabo los procesos térmicos para el proceso de producción de panela en la vereda

Santa Juana (Municipio de la Vega-Cauca). Los valores fueron tomados de las tablas de propiedades termodinámicas del agua [19]. (Ver Anexo A)

Se toma el promedio de concentración de los jugos $^{\circ}\text{Brix} = 19.33$, tabla 4.10, y teniendo en cuenta que para valores cercanos, se puede considerar un comportamiento lineal entre la concentración de la solución y su calor específico. De esta forma se puede interpolar (regresión lineal) entre los datos entre 10 y 20 $^{\circ}\text{Brix}$ de la tabla de Propiedades termodinámicas de una mezcla agua-miel (Anexo A.3) y así establecer una relación para conocer el calor específico de la miel C_{pm} , en función de los grados brix. El resultado fue el siguiente:

$$C_{pm} = 1.8806 + 0.01957 * ^{\circ}\text{Brix}$$

Para una concentración de los jugos de 19.33 $^{\circ}\text{Brix}$ (tabla 4.10) se obtuvo:

$$C_{pm} = 2.25 \text{ KJ/KgK}$$

Ahora, teniendo en cuenta que $\Delta T_m = \Delta T_a = T_s - T$, es un incremento de temperatura que sufren los jugos, donde T_s es la temperatura de saturación del agua y T es la temperatura del jugo al entrar al calentador 24 $^{\circ}\text{C}$ (temperatura ambiente de la vereda Santa Juana)

$$\Delta T_m = \Delta T_a = 98.9 \text{ }^{\circ}\text{C} - T$$

$$\Delta T_m = \Delta T_a = 74.9 \text{ }^{\circ}\text{C} = 347.9 \text{ K}$$

Reemplazando en las ecuaciones para el cálculo de las necesidades energéticas y teniendo en cuenta el procesamiento de 100 Kg de jugo con una densidad de 19.33 $^{\circ}\text{Brix}$ (es decir con masas de agua y de miel de $M_a=80.67\%$ y $M_m = 19.33\%$ respectivamente), el calor de calentamiento requerido para el agua será:

$$Q_a = M_a * C_{pa} * \Delta T_a$$

$$Q_a = 80.67Kg * 4.198 \text{ KJ/Kg.K} * 347.9 \text{ K} = 117820 \text{ KJ}$$

Del mismo modo el calor de calentamiento requerido para la miel es:

$$Q_m = M_m * C_{pm} * \Delta T_m$$

$$Q_m = 19.33Kg * 2.25 \text{ KJ/KgK} * 347.9 \text{ K} = 15191 \text{ KJ}$$

Finalmente el calor de calentamiento requerido para el jugo de caña va a ser:

$$Q_0 = Q_a + Q_m = 133010 \text{ KJ}$$

Calores de concentración y de punteo

Experimentalmente se encontró que la densidad inicial promedio del jugo después de la extracción del jugo de la caña es de $b_3 = 19.33$ °Brix. (Tabla 4.10)

Para efectos de cálculo se toma como referencia la densidad del jugo en el punto 4, figura 2.14, asignándole un valor de $b_4 = 69$ °Brix, Tabla 4.14. Para representar la salida de los jugos de la etapa de concentración (a los 100 minutos) y la entrada a la etapa de punteo.

Ahora, la densidad final de la mezcla agua-miel estará definida por la humedad esperada en la panela, que según la legislación alimentaria debe ser de mínimo 8% (8 gramos de agua y 92 gramos de azúcar, es decir 92 grados Brix) y máximo 12% (12 gramos de agua y 88 gramos de azúcar, es decir 88 grados Brix), es decir, las mieles en ese instante deben tener una densidad final entre 88 y 92 grados Brix. Se encontró que $b_5=85$ °Brix, de la tabla 4.13.

Entonces, tomando los datos anteriormente mencionados y reemplazándolos en las ecuaciones 2.48, 2.49, se obtienen las masas evaporadas tanto en la concentración como en el punteo

El agua evaporada en la concentración será:

$$a_c = 100 - \frac{100 * b3}{b4} = 71.9855 \text{ Kg}$$

Y el agua evaporada en el punteo será:

$$a_p = 100 - a_c - \left(\frac{(100 - a_c) * b4}{b5} \right) = 5.2733 \text{ Kg}$$

Posteriormente se calculó el calor requerido para la concentración y el punteo respectivamente, tomando las ecuaciones y 2.58, 2.61 con $\Delta h_s = 2269.1 \text{ KJ/Kg}$ (valor de la entalpia de evaporación del agua a la presión atmosférica, de la tabla A1 (anexo A))

El calor requerido para la concentración de los jugos es de:

$$Q_1 = a_c * \Delta h_s = 163340 \text{ KJ}$$

Del mismo modo, el calor requerido para el punteo de los jugos es de:

$$Q_2 = a_p * \Delta h_s = 11966 \text{ KJ}$$

Finalmente, se puede calcular el calor total requerido en el proceso de producción de la panela cuando son procesados los jugos de caña extraídos por el método tradicional de mazas, teniendo en cuenta que están siendo considerados procesos de gasto energético conjuntamente los siguientes procesos: el calentamiento, el clarificado, la concentración y el punteo de los jugos. El cálculo del calor total es la suma de los requerimientos calóricos para el calentamiento, concentración y en el punteo de los jugos.

$$Q_T = Q_0 + Q_1 + Q_2 = 308320 \text{ KJ}$$

Este último valor representa la necesidad energética del trapiche para procesar 100 Kg de jugo extraído por el método tradicional usando un molino de mizas.

A continuación se presenta la Tabla 4.21, resumiendo los parámetros involucrados en el cálculo de las necesidades energéticas del proceso de producción de panela cuando son procesados los jugos de caña obtenidos por el método de molienda tradicional de mizas.

Tabla 4.21. Cálculos de las necesidades energéticas en el proceso de producción por cada 100 Kg de jugo procesado, extraído por molienda tradicional.

PARÁMETRO	VALOR
Presión atmosférica (bar)	0.86
Temperatura ambiente (°C)	24
Densidad del jugo a la salida del molino (°Brix)	19.33
Masa de agua (Kg)	80.67
Masa de miel (Kg)	19.33
Densidad del jugo a la entrada del concentrador (°Brix)	69
Densidad del jugo final (°Brix)	85
CÁLCULOS	
Calor específico de la miel (C_{pm}) (KJ)/KgK	2.25
CALOR REQUERIDO EN EL CALENTAMIENTO	
Para el agua Q_a (KJ)	117820
Para la miel Q_m (KJ)	15191
Total requerido $Q_0 = Q_a + Q_m$ (KJ)	133010
CALOR REQUERIDO EN LA CONCENTRACIÓN	
Masa de agua evaporada en la concentración a_c (Kg)	71.9855
Total requerido Q_1 (KJ)	163340
CALOR REQUERIDO EN EL PUNTEO	
Masa de agua evaporada en el punteo a_p (Kg)	5.2733
Total requerido Q_2 (KJ)	11966
CALOR TOTAL REQUERIDO	
$Q_T = Q_0 + Q_1 + Q_2$ (KJ)	308320
Panela producida estimada por cada 100 Kg de jugo procesado	
$100 - a_c - a_p$ (Kg)	22.7412

Adicionalmente, en el anexo C se presenta el código del *Programa Computacional para hacer el Cálculo del Calor de Calentamiento*, la secuencia de programación que fue

implementada en Matlab, sirve para calcular los consumos teóricos de calor en los procesos de calentamiento, concentración y punteo durante la producción de panela partiendo de datos experimentales y del modelamiento y la descripción matemática desarrollada en la sección 2.9.

4.3.4. Índices de diagnóstico del proceso tradicional de fabricación de panela

De acuerdo a los resultados obtenidos en el ítem 4.3.1 ,4.3.2 y 4.3.3 se pueden obtener índices importantes de desempeño del trapiche a partir de las siguientes relaciones:

Primer Índice

Es un primer indicador de productividad del cultivo de caña panelera, donde se caracterizan las cualidades de la materia prima y que puede ser traducido a costos.

$$I_1 = \frac{\dot{m}_{panela}}{\dot{m}_{caña}} = \frac{42.75 \text{ Kg/h}}{400 \text{ Kg/h}} = 0.11$$

Este parámetro tradicionalmente ha tenido un valor de 0.1 (10%). para la mayoría de los cultivos de caña en Colombia según los estudios de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, CORPOICA. El aumento en la productividad del cultivo puede darse al incentivar el uso de abonos orgánicos.

Segundo índice

Aquí se estima si el uso del bagazo como combustible es suficiente para suministrar la energía que el proceso de producción requiere, es decir el autoabastecimiento energético del proceso mediante solo el uso del bagazo como combustible.

Teniendo en cuenta que el bagazo demora en secar, y tomando los datos de la tabla 4.15, el consumo de combustible total fue de 70 kg en 50 minutos, (45 kg de caña brava y 25 de

bagazo), esto es 84 Kg/h; en este caso se supone que todo el combustible será bagazo para establecer el autoabastecimiento. De este modo reemplazando en la ecuación.

$$I_2 = \left(\frac{\dot{m}_{b.s,producido} - \dot{m}_{b.s,consumido}}{\dot{m}_{b.s,producido}} \right) * 100\%$$

$$I_2 = 100 \left(\frac{87.5 \text{ Kg/h} - 84 \text{ Kg/h}}{87.5 \text{ Kg/h}} \right) \% = 4\%$$

Este índice evidencia que la hornilla tiene un autoabastecimiento energético muy bajo, del 4%, es por eso que surge la necesidad de usar combustibles adicionales, como en este caso, la caña brava para garantizar las necesidades energéticas del proceso de producción panelero.

Tercer índice

El tercer índice es de suma importancia para diagnosticar el funcionamiento de los trapiches en cuanto a su eficiencia energética, que se define como el cociente entre la energía aprovechada en el proceso de producción de panela y la energía suministrada por el bagazo.

$$I_3 = \eta = \frac{\dot{E}_{a.e.}}{\dot{m}_{b.s.PCI} + \dot{m}_{a.b.} h_f} * 100\% = \frac{409396.07 \text{ KJ/h}}{737865.2 \text{ KJ/h}} = 55\%$$

La eficiencia de la hornilla ha sido del 55%, valor característico de las hornillas construidas de forma artesanal pero que son capaces de cumplir con el suministro de las necesidades energéticas en el proceso de fabricación de panela.

Cuarto índice

Este índice revela las falencias en la planta física de la hornilla panelera en cuanto a la forma en que se distribuye el flujo energético de los gases de combustión y el flujo energético de los gases de la chimenea con respecto a la energía suministrada.

$$I_4 = \frac{\dot{E}_{gases}}{\dot{E}_{suministrada}} * 100\% = \frac{67876.89 \text{ KJ/h} + 143652.81 \text{ KJ/h}}{737865.2 \text{ KJ/h}} * 100\%$$

$$I_4 = 28.66\%$$

Son excesivas las pérdidas energéticas con los gases de combustión pues sobrepasan más de la cuarta parte de la energía total, esto muy posiblemente se puede deber problemas de diseño en la cámara de combustión que es construida en su mayoría enterrada y a que la zona de transferencia de calor de las hornillas tiene puntos donde los gases no fluyen adecuadamente. A nivel técnico, estas pérdidas serían inapropiadas para cualquier proceso industrial, y representan pérdida económica.

Quinto índice

En este índice se revelan las pérdidas de energía suministrada a través de las paredes de la hornilla y tiene mucho que ver con su forma de construcción artesanal. Reemplazando los valores correspondientes se tiene que:

$$I_5 = \frac{\dot{E}_{pérdidas}}{\dot{E}_{suministrada}} = \frac{404245.05 \text{ KJ/h}}{737865.2 \text{ KJ/h}} * 100\%$$

$$I_5 = 54.78\%$$

Este índice pone en evidencia porque es tan inestable el gradiente de temperatura en cada una de las pailas, pues existe una distribución no homogénea de la energía suministrada a lo largo de la hornilla haciendo posible que las paredes absorban mucha energía o que haya fugas de gases por fallas de construcción normalmente halladas en trapiches artesanales.

Sexto índice

Finalmente, se puede estimar el rendimiento energético global del proceso productivo, mediante la siguiente relación:

$$I_6 = \frac{\dot{m}_{b.s.consumido}}{\dot{m}_p} = \frac{84 \text{ Kg/h}}{42.75 \text{ Kg/h}} = 1.96$$

Este índice tiene fuerte dependencia con el éxito en la extracción de jugos, en el secado del bagazo (en caso de que se realice), en el proceso de combustión, y en el aprovechamiento de la energía en el proceso productivo. Es por eso que representa un índice global de rendimiento.

Según la relación, entre más bajo sea este índice mejor será el rendimiento global (energético y productivo) del trapiche. En este caso este valor es 1.96 y se considera como alto debido a la baja eficiencia energética y altos índices de pérdidas del trapiche artesanal tradicional, también se le puede atribuir a la falta de organización en el proceso de secado del bagazo y particularmente al diseño de la hornilla panelera artesanal en la cual es inevitable que las pérdidas de energía por las paredes y por la chimenea se reduzcan.

A continuación se presenta una tabla resumen de los índices de diagnóstico energético para el proceso de fabricación de panela al procesar los jugos de caña extraídos por el método de molienda tradicional de mazas.

Tabla 4.22. Índices de diagnóstico del proceso de fabricación de panela con los jugos extraídos por el método de molienda tradicional de mazas.

INDICE	VALOR	DESCRIPCIÓN
$I_1 = \frac{\dot{m}_{panela}}{\dot{m}_{caña}}$	$I_1 = 0.11$	Rendimiento del cultivo
$I_2 = \left(\frac{\dot{m}_{b.s,producido} - \dot{m}_{b.s,consumido}}{\dot{m}_{b.s,producido}} \right) * 100\%$	$I_2 = 4\%$	Autoabastecimiento de combustible
$I_3 = \eta = \frac{\dot{E}_{a.e.} + \dot{E}_{ch} + \dot{E}_p}{\dot{m}_{b.e.PCI} + \dot{m}_{a.b.}h_f}$	$I_3 = 55\%$	Eficiencia energética de la hornilla
$I_4 = \frac{\dot{E}_{gases}}{\dot{E}_{suministrada}}$	$I_4 = 28.66\%$	Porcentaje de la energía que se pierde en los gases de combustión.
$I_5 = \frac{\dot{E}_{pérdidas}}{\dot{E}_{suministrada}}$	$I_5 = 54.78\%$	Porcentaje de la energía que se pierde por las paredes de la hornilla
$I_6 = \frac{\dot{m}_{b.s,consumido}}{\dot{m}_p}$	$I_5 = 1.96$	Rendimiento global (energético y productivo)

4.4. Proceso de Fabricación de la Panela Usando el Método Disolución-Extrusión para la Extracción de los Jugos de la Caña Panelera

Tomando como única referencia al Ingeniero Agroindustrial Francisco Montaña el proceso disolución-extrusión, consiste básicamente en tres etapas; en la primera se realiza un proceso de reducción de tamaño el cual se hace con ayuda de cuchillas, convirtiendo el vástago de caña en astillas de menor tamaño. La segunda etapa consiste en introducir los vástagos de caña en agua caliente donde empieza el proceso de extracción de los azúcares y otras sustancias hidrosolubles. En la tercera etapa se pasa la caña en medio de dos cilindros

de acero inoxidable el cual mecánicamente termina de extraer los azúcares y retira un gran porcentaje de agua contenida en la caña, teniendo como resultado agua - miel el cual pasa al proceso de reducción (evaporar el agua para obtener la panela) y bagazo de caña el cual se utiliza como combustible en la hornilla para generar el calor que se necesita en el proceso de elaboración de panela.

Se supone el método tiene como principal objetivo aumentar el porcentaje de extracción de los jugos no clarificados de la caña panelera y garantizar la inocuidad en el proceso. La información sobre este método específicamente no se encuentra en ninguna parte aun en la propuesta presentada por el ingeniero Montaña no se encuentran detalles de la dinámica del método, es por esto que fruto del desarrollo del estudio se empezó a buscar aquellos conceptos que dieran explicación al mismo.

Dentro del proceso se dan diferentes fenómenos tanto físicos como biológicos que es necesario conocer a fondo para entender el proceso general sin embargo en el desarrollo de este trabajo se encontró que los principios de funcionamiento de este método son similares a los que se llevan a cabo en los ingenios azucareros cuando utilizan los difusores. Se empieza con la descripción de cada uno de estos conceptos desde el nivel celular de la caña.

4.4.1. El Tallo de la Caña de Azúcar y los Fenómenos Involucrados a Nivel Celular

El tallo también se llama "caña triturable". De este tallo nacen los tallos secundarios, llamados "retoños", que se forman de las yemas subterráneas del tallo primario. Sucesivamente, nuevos retoños pueden formarse de las yemas subterráneas de los tallos secundarios. El tallo está formado por segmentos llamados nudos.

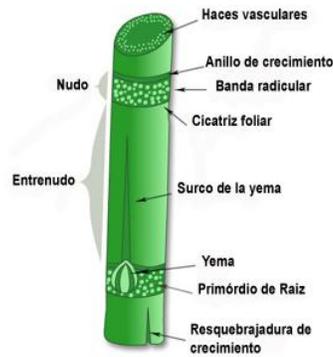


Figura 4.24. Partes del Tallo de la Caña

El nudo es la parte por la cual la hoja se conecta al tallo y donde están las yemas y los primordios radiculares. Las células de la corteza tienen paredes gruesas y lignificadas. Estas células ayudan a reforzar el tallo. Más hacia el centro, el tejido de relleno está compuesto por los haces vasculares del xilema y del floema.

El Xilema se trata de un tejido leñoso de los vegetales superiores que conduce agua y sales inorgánicas en forma ascendente por toda la planta y proporciona también soporte mecánico. El floema es un tejido vascular que conduce azúcares y otros nutrientes sintetizados desde los órganos que los producen hacia aquéllos en que se consumen y almacenan (en forma ascendente y descendente). La composición interna de la caña antes descrita es la responsable de su membrana impermeable y la que evita que los azúcares contenidos en ella salgan.

El mecanismo de almacenamiento de la sacarosa en los entrenudos maduros de la caña de azúcar se debe a una enzima llamada invertasa o sacarasa, la cual se responsabiliza por transformar la sacarosa en fructosa y glucosa.

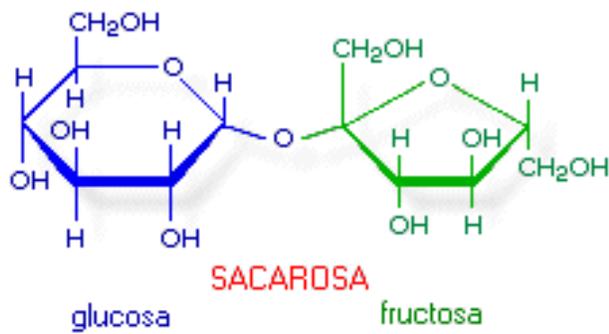


Figura 4.25. Molécula de Sacarosa

La sacarosa es un producto intermedio principal de la fotosíntesis y constituye la forma principal de transporte de azúcar desde las hojas a otras partes de la planta. Es importante conocer la composición interna de la caña para entender lo que sucede al someterla en agua a una temperatura determinada.

4.4.2. Ósmosis

El fenómeno de la Ósmosis está basado en la búsqueda del equilibrio. Cuando se ponen en contacto dos fluidos con diferentes concentraciones de sólidos disueltos se mezclarán hasta que la concentración sea uniforme, tal como se observa en la Figura 4.26.

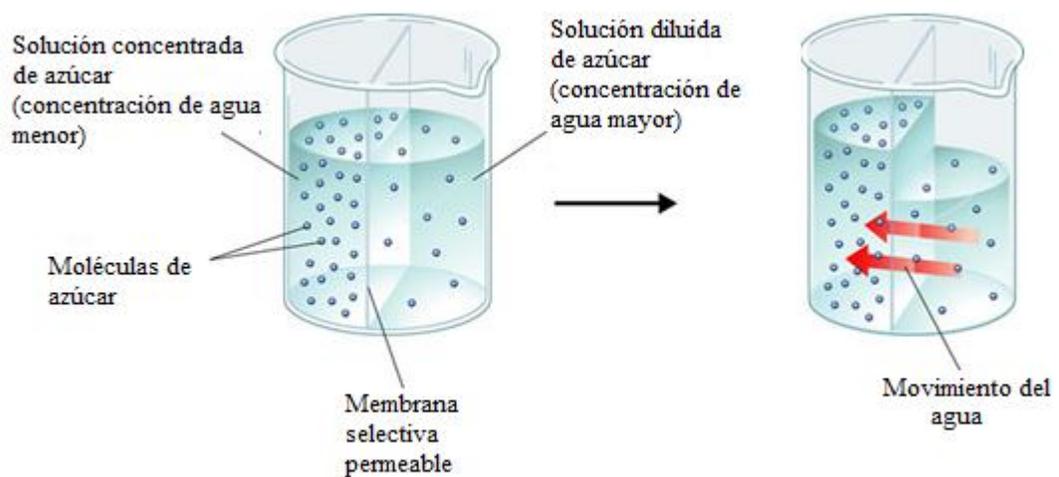


Figura 4.26. Esquema del Proceso de Ósmosis

Si estos fluidos están separados por una membrana permeable (la cual permite el paso a través de uno de los fluidos), el fluido que se moverá a través de la membrana será el de menor concentración de tal forma que pasa al fluido de mayor concentración. Al cabo de un tiempo el contenido en agua será mayor en uno de los lados de la membrana. La diferencia de altura entre ambos fluidos se conoce como Presión Osmótica.

Si se utiliza una presión superior a la presión osmótica, se produce el efecto contrario. Los fluidos se presionan a través de la membrana, mientras que los sólidos disueltos quedan atrás. Es lo que se conoce como Ósmosis Inversa, este fenómeno es el responsable de la extracción de los azúcares contenidos en la caña, después de someter los vástagos de caña en agua caliente. En este proceso de difusión las moléculas del soluto y de disolvente emigran libremente. Por el contrario, si la disolución está limitada por una membrana sólo permeable para las moléculas del disolvente, entonces tiene lugar el fenómeno conocido como ósmosis, y a la barrera que sólo permite el paso de uno de los componentes se la llama *membrana semipermeable*.

Una membrana semipermeable es aquella que contiene poros de tamaño molecular. El tamaño de los poros es minúsculo, por lo que dejan pasar las moléculas pequeñas pero no las grandes. Si una de estas membranas separa un líquido en dos particiones, por ejemplo una de agua pura y otra de agua con azúcar, suceden distintos fenómenos que son explicados con los conceptos de potencial electroquímico y difusión simple. Cuando se somete la caña a cierta temperatura lo que se busca es q su membrana inicialmente impermeable se comporte como semipermeable.

Los potenciales químicos de los componentes de una solución son menores que la suma del potencial de dichos componentes cuando no están ligados en la solución. Este desequilibrio hace que se produzca un flujo de partículas solventes hacia la zona de menor potencial al cabo de un tiempo el contenido en agua será mayor en uno de los lados de la membrana. El solvente fluirá hacia el soluto hasta equilibrar dicho potencial o hasta que la presión hidrostática equilibre la presión osmótica [20].

Como resultado final, el agua pasa de la zona de baja concentración a la de alta concentración y viceversa, con un flujo neto mayor de moléculas de agua que pasan desde la zona de baja concentración a la de alta.

La membrana semipermeable permite el paso preferencial de ciertas sustancias presentes en una disolución frente a otras Figura 4.27. Este hecho las hace importantes tanto en sistemas biológicos vivos como en aplicaciones tecnológicas. El índice del paso depende de la presión, la concentración y la temperatura de las moléculas o de los solutos en cualquier lado, así como la permeabilidad de la membrana para cada soluto. Dependiendo de la membrana y del soluto, la permeabilidad puede depender del tamaño del soluto, de características de la solubilidad, o de la química.

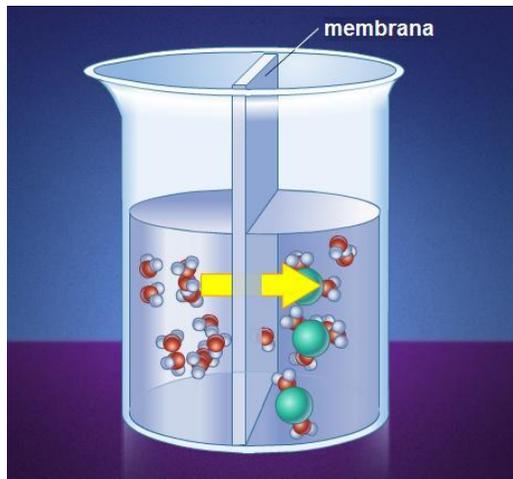


Figura 4.27. Membrana Semipermeable

4.4.3. Disolución

Cuando se quiere extraer la sacarosa de las células basta con debilitar su membrana celular (plasmalema) e inducir el flujo de las sustancias hidrosolubles al exterior. Uno de los métodos para extraer la mayor cantidad de sacarosa de las células de la caña de azúcar es con el proceso de disolución.

El proceso de disolución propiamente dicho ocurre por el hecho que en condiciones normales, las paredes de las células no son permeables al jugo que ellas contienen. La célula vegetal almacena en su interior (citoplasma y vacuola), la sacarosa (azúcar sencillo de 6 carbonos) producido en las hojas de la planta, gracias al proceso de la fotosíntesis.

La célula vegetal en su interior está rodeada por una membrana semipermeable (*plasmalema*). Su carácter semipermeable indica que deja pasar el agua, más no los solutos que aparecen disueltos en ella. El paso de los solutos, a través de esta membrana en doble vía (es decir, del interior de la célula hacia el exterior o del exterior hacia el interior) se da en favor de un gradiente de concentración, ya sea químico o hídrico. La gran importancia biológica que desempeña esta membrana celular es el control que ejerce sobre el paso de sustancias desde o hacia el interior de la célula.

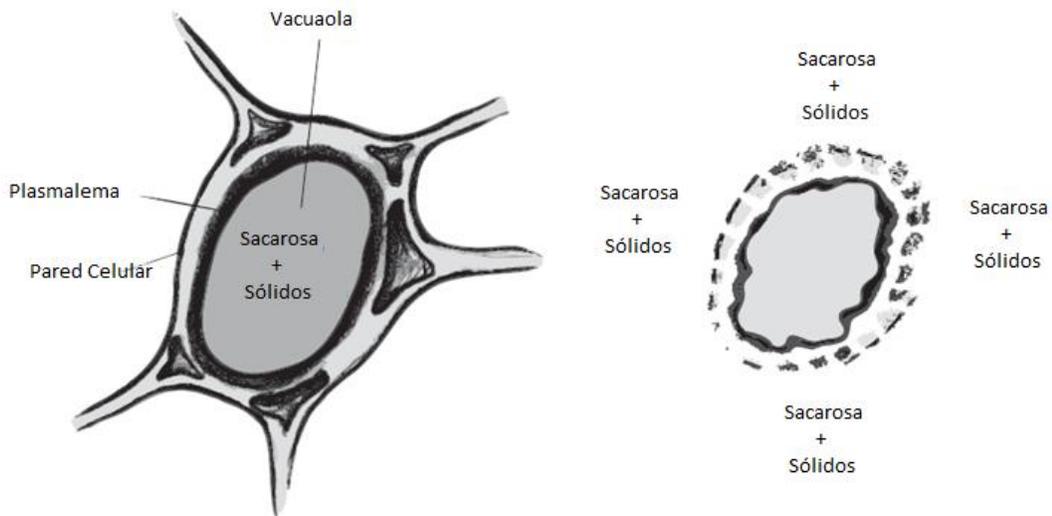


Figura 4.28. Célula Vegetal del tallo de caña de azúcar y el efecto de la temperatura en su membrana.

Con base en lo anterior, en un proceso de extracción de azúcares presentes en la caña panelera buscando eficiencia, se requiere afectar negativamente la permeabilidad del *plasmalema*, lo que facilitaría la salida de azúcares del interior de la célula. Este efecto negativo se consigue con la inmersión de la caña en agua caliente, ya que la membrana celular está constituida por capas de proteínas y lípidos (Figura 4.28).

Generalmente, temperaturas superiores, aumenta la energía cinética de las moléculas con lo que se desorganiza la envoltura acuosa de las proteínas, y se desnaturalizan las proteínas con lo que se afecta negativamente la permeabilidad del plasmalema; un aumento de la temperatura destruye las interacciones débiles y desorganiza la estructura de la proteína, de forma que el interior hidrófobo interacciona con el medio acuoso y se produce la agregación y precipitación de la proteína desnaturalizada en consecuencia, se permite la salida “libre” de solutos del interior de la célula (zona de mayor concentración de solutos), hacia el exterior de la misma (zona de menor concentración de solutos). Por la diferencia de concentración entre el jugo en la célula y el agua, mediante la membrana semipermeable, hay una presión de adentro para afuera de la célula, liberando así el jugo (agua + azúcares) hidrosoluble. La inmersión en agua caliente hace que el agua se enriquezca en azúcares, de ahí que se le denomine “agua - miel”.

La extracción sólido - líquido, es una operación de la ingeniería química que se usa en numerosos procesos industriales. Técnicamente, es una operación de transferencia de masa, donde un disolvente o mezcla de éstos, extraen selectivamente uno o varios solutos que se hallan dentro de una matriz sólida.

Al igual que en la destilación, existen una serie de parámetros físico - químicos, tales como la viscosidad del disolvente, los coeficientes de solubilidad de los solutos, los coeficientes de difusión, las temperaturas de ebullición, etc. que son de importancia fundamental para el diseño del equipo y el éxito del proceso de extracción.

4.4.4. Lixiviación

La lixiviación es un proceso por el cual se extrae uno o varios solutos de un sólido, mediante la utilización de un disolvente líquido. Ambas fases entran en contacto íntimo y el soluto o los solutos pueden difundirse desde el sólido a la fase líquida, lo que produce una separación de los componentes originales del sólido.

El flujo de azúcares del interior de la célula hacia el agua caliente se suspende en el momento en que la concentración de azúcares en el agua – miel se hace igual a la concentración de azúcares en el interior de la célula. Ello obliga a que los trozos de caña requieran ser sometidos a varias lavadas con aguas con contenidos de azúcar inferior al contenido de azúcares de la caña (proceso conocido como lixiviaciones). Se efectúan diferentes lavadas de modo que la caña sea sometida a contenido de sacarosa siempre inferiores al contenido en el jugo de la caña, Esto es hecho sucesivamente hasta que el líquido (agua) tenga 0% de sacarosa. Como la caña está saturada en líquidos, el exceso de éste (conteniendo el azúcar extraído) es separado de la masa de la caña por gravedad.

La mayor parte de los sólidos solubles se obtiene por lavado simple (lixiviación). Para que este lavado sea posible se hace necesario que las células conteniendo el jugo con sacarosa estén rotas, para que el líquido de imbibición tenga acceso a él. Por eso, es necesaria una buena preparación de la caña. Esta preparación debe ser hecha con un desfibrador que rompa la mayor cantidad de células posibles.

4.4.5. Extrusión

La extrusión es la última fase que se describe en el Método Disolución - Extrusión para la extracción total del agua-miel aun presente en la caña después de haberla sometido a la disolución. Dentro de la propuesta presentada por el Ingeniero Francisco él describe esta etapa como: “Posteriormente se pasa la caña en medio de dos cilindros en acero el cual mecánicamente termina de extraer los azúcares y retira el un gran porcentaje el agua, teniendo como resultado agua miel el cual pasa al proceso de reducción (evaporar el agua para obtener la panela) y bagazo de caña”.

En la literatura se encuentra la definición de extrusión como: el proceso de extrusión hace referencia a cualquier operación de transformación en la que un material fundido es forzado a atravesar una boquilla para producir un artículo de sección transversal constante y en principio longitud indefinida. Además de los plásticos, muchos materiales se procesan mediante extrusión, como los metales, cerámicas o alimentos [34].

La extrusión de alimentos es un proceso en el que un material (grano, harina o subproducto) es forzado a fluir, bajo una o más de una variedad de condiciones de mezclado, calentamiento y cizallamiento, a través de una placa/boquilla diseñada para dar forma o expandir los ingredientes. Según esta definición el término extrusión no tiene que ver con la técnica que se describe en la fase tres del Método Disolución – Extrusión que por el contrario hace referencia es a una compresión que se hace sobre los vástagos de caña para terminar de extraer los jugos aun presentes en el.

Por lo que se concluye que el término extrusión no es el más apropiado para describir la última fase del Método Disolución – Extrusión. Y se propone utilizar la palabra compresión que se ajusta más a la realidad y técnica del proceso.

4.4.6. Parámetros de Interés en el Proceso de Fabricación de Panela utilizando el Método Disolución – Extrusión en la Etapa de Extracción de Jugo de Caña

La propuesta de implementar una técnica alternativa en la etapa de extracción de los azúcares de la caña panelera conocida como el Método Disolución – Extrusión fue una respuesta a la necesidad que tienen pequeños grupos paneleros de garantizar la inocuidad del proceso de extracción de los azúcares y obtener mayores rendimientos de jugo por caña procesada, presentada por el Ingeniero Agroindustrial Francisco José Montaña Fuentes al Proceso Campesino y Popular del Municipio de la Vega (Cauca).

La técnica sin mayores descripciones presentada por el Ingeniero Agroindustrial Francisco Montaña se desarrolla en tres etapas fundamentales; en la primera se realiza un proceso de reducción de tamaño el cual se hace con ayuda de cuchillas, convirtiendo el vástago de caña en astillas de menor tamaño. La segunda etapa consiste en introducir los vástagos de caña en agua caliente donde empieza el proceso de extracción de los azúcares y otras sustancias hidrosolubles. En la tercera etapa se pasa la caña en medio de dos cilindros de acero inoxidable el cual mecánicamente termina de extraer los azúcares y retira un gran porcentaje de agua contenida en la caña, teniendo como resultado agua - miel el cual pasa

al proceso de reducción (evaporar el agua para obtener la panela) y bagazo de caña el cual se utiliza como combustible en la hornilla para generar el calor que se necesita en el proceso de elaboración de panela.

La etapa de extracción de los azúcares de la caña por el método tradicional se lleva a cabo utilizando el molino horizontal de tres mazas, al cambiar la forma de extraer los jugos presentes en la caña utilizando los principios de la técnica del Método Disolución – Extrusión se hizo necesario hacer un montaje experimental dentro de la planta procesadora de panela que permita caracterizar el método teniendo en cuenta los parámetros y variables de mayor impacto que inciden en la calidad de la panela; en el ítem 3.5. se describe con detalle el montaje experimental y este se realizó con la ayuda de los miembros del grupo de producción.

Aunque esta técnica utiliza otros principios para la extracción de los jugos de la caña, el proceso general de producción de panela sigue teniendo cuatro etapas de interés; la extracción, la limpieza, la evaporación y concentración de los jugos y el punteo de la miel. Es importante analizar cada una de ellas para identificar los cambios de las variables que se ven afectadas por la implementación del nuevo método.

Para tomar medidas de los parámetros de interés en la extracción de jugo de caña implementando este método fue necesario primero realizar algunas pruebas que permita determinar a través de la experimentación los valores de algunas variables para constatar con las descritas en la propuesta del Ingeniero Francisco, entre ellas se tienen en cuenta parámetros tan importantes como la temperatura del agua de imbibición (solvente), el tiempo de permeabilización de las paredes de la caña, el número de lixiviaciones, tiempo que toma la lixiviación, cantidad de agua utilizada para llevar a cabo la lixiviación, definición del corte y tamaño de los vástagos de caña y la cantidad de solución azucarada extraída al final del proceso. Es importante aclarar que la producción de panela utilizando el método disolución-extrusión se llevó a cabo durante las moliendas que se realizaron en un mes de trabajo esto nos da la oportunidad de medir parámetros y sacar promedios de 16 moliendas utilizando este método.

Para determinar los valores de cada una de estas variables se realizaron diferentes pruebas experimentales para obtener los rangos de efectividad. Además de los parámetros ya antes mencionados se deben tener en cuenta durante todas las etapas del proceso de producción de panela el pH de los jugos, temperatura (°C) de los jugos, y porcentaje de sólidos solubles °Brix, estos parámetros deben ser controlados durante todo el proceso para determinar que etapas se alteran y pueden influir en la homogeneidad y calidad del producto final. También se determinó el grado de madurez de la caña procesada en la elaboración de la panela, peso de la caña (Kg), peso del jugo de caña (Kg), peso del bagazo (Kg), cantidad de panela (Kg), y peso de los residuos (Kg) para realizar los cálculos del diagnóstico energético del trapiche panelero utilizando la técnica del Método Disolución – Extrusión.

A continuación se describe las pruebas experimentales que se llevaron a cabo y se presentan los resultados de estas. Para calcular el tiempo promedio en el cual se logra una completa y óptima permeabilización de las paredes de la caña, se realizó el experimento o simulación con un aparato de extracción Soxhlet y con un trozo de caña, para conocer el tiempo de permeabilización necesario y luego extrapolar el resultado para cantidades de caña mayores bajo las mismas condiciones de temperatura del agua de imbibición esto se realizó 10 veces, para obtener valores confiables de las variables de interés.

La metodología utilizada para este proyecto fue la investigación experimental, puesto que pretendemos evaluar o examinar los efectos “**del proceso de extracción del jugo de caña por medio de las implementación del proceso de disolución-extrusión**”, y como se manifiestan en variables dependientes, en la que es posible manipular deliberadamente una o más variables independientes para observar los cambios en la variables dependientes, es decir, se trata de probar una relación causal, en una situación o contexto estrictamente controlado por el investigador.

Se llevaron a cabo varios experimentos para determinar los rangos de las diferentes variables de interés y de esta manera poder determinar la efectividad del Método Disolución-Extrusión. Para desarrollar el proceso experimental se utilizó el montaje Soxhlet para la extracción de sólido – líquido, en las pruebas se experimentó manipulando

las siguientes variables: tamaños diferentes de la caña, vástagos de caña y caña desfibrada, cantidad de agua de imbibición, reemplazando caña por bagazo, utilizando como solvente solo agua en algunas pruebas y en otras adicionándole jugo de caña para ver la reacción; bajo estas condiciones se realizaron múltiples experimentos, a continuación se mostraran los resultados para vástagos de caña de diferente tamaño utilizando como solvente agua pura, la misma cantidad de agua (300 cm³) y el mismo tiempo de exposición del vástago de caña (1 hora), bajo estas condiciones se repitió el experimento 10 veces en la Tabla 4.23 se muestran los promedios de estos resultados.

Tabla 4.23. Promedio de la variación de los grados brix dependiendo del tamaño de la caña

Temperatura del solvente °C	Diferentes Tamaños del vástago de caña utilizados				
	20 cm	15 cm	10 cm	5 m	2 cm
	°Brix	°Brix	°Brix	°Brix	°Brix
24.6	1	1	1	1	1
55.0	1	1	1	1	1
74.5	1	1	1	1	1
76.8	1	1	1	1	1
78.6	1	1	1	1	2
83.0	1	1	1	2	2
83.3	1	1	1	2	3
86.2	1	1	1	2	3
86.8	1	1	1	2	3
91.1	1	2	2	3	4

De los datos experimentales obtenidos en esta prueba se puede ver que entre más pequeño sea el vástago de caña más azúcares contenidos en la caña, se van a poder extraer. Con los rangos ya establecidos de las variables de interés se caracteriza el método disolución-extrusión. Ahora se repite el procedimiento 10 veces manteniendo las mismas condiciones, pero no para pedazos enteros de caña si no con vástagos de caña previamente desfibrados, se quiere ver si aumenta la extracción de los azúcares cuando se expone más el área de contacto. Los °Brix del bagazo utilizado fue de 14.

Tabla 4.24. Promedio de la variación de los grados brix con caña desfibrada

Temperatura del solvente °C	Diferentes Tamaños del vástago de caña utilizados				
	20 cm	15 cm	10 cm	5 m	2 cm
	°Brix	°Brix	°Brix	°Brix	°Brix
24.6	1	1	1	1	1
55.0	1	1	1	1	1
74.5	1	1	1	1	2
76.8	1	1	1	1	2
78.6	1	1	2	2	2
83.0	2	2	2	2	3
83.3	2	2	2	2	3
86.2	2	2	2	3	3
86.8	2	2	2	3	4
91.1	2	2	2	3	4

Tabla 4.25. Datos promedio del tamaño de caña desfibrada de 5 cm con diferentes volúmenes de agua

Temperatura del solvente °C	Diferente Volumen de agua utilizada para caña desfibrada de 2 cm				
	100 cm ³	200 cm ³	300 cm ³	400 cm ³	500 cm ³
	°Brix	°Brix	°Brix	°Brix	°Brix
24.6	1	1	1	1	1
55.0	1	1	1	1	1
74.5	1	1	1	1	2
76.8	1	1	1	1	2
78.6	1	1	2	2	2
83.0	1	1	2	3	3
83.3	1	2	2	3	3
86.2	1	2	2	3	4
86.8	1	2	3	3	4
91.1	1	2	3	3	4

Tabla 4.26. Promedio de los valores para los °Brix en disolvente agua – jugo.

°Brix del agua de imbibición	Temperatura del agua de imbibición °C
4	24.2
4	40.3
4	52.1
4	58.5
5	63.0
5	67.0
6	77.3
6	76.0
9	79.4
11	88.3
13	89.0
14	90.0
15	90.5
18	91.0
20	92.0
22	89.5
22	90.0
25	91.0
27	91.0
28	91.0
30	90.0
32	90.0
35	90.5
40	89.8
44	91.3
45	90.6
53	90.5
56	90.8
70	91

De las tablas 4.23 y 4.24 se puede determinar ciertas condiciones de tamaño y forma para una buena extracción de los azúcares, tamaños menores a 5 cm y trabajar con caña desfibrada favorecen considerablemente la extracción de los azúcares. Con estos datos ya establecidos se seguirá experimentando para encontrar los rangos de las otras variables. Ahora se trabajará con diferentes volúmenes de agua (solvente) y las otras variables se mantendrán constantes.

Al someter los vástagos de caña a volúmenes de agua mayor se extraen más azúcares, la cantidad de agua permite mayor tiempo de exposición de la caña y llevar a cabo un proceso más completo. Teniendo en cuenta los parámetros de tamaño, forma y cantidad de agua más adecuados para lograr una mejor extracción se realiza un último experimento pero adicionando jugo de caña al solvente. El jugo obtuvo 14 °Brix, la mezcla agua – jugo 4 °Brix y la caña desfibrada 4 °Brix.

Las condiciones sobre las cuales se llevaron a cabo el último experimento facilitan la extracción de los azúcares de la caña. A continuación se analizará cada una de las etapas de la elaboración de panela para terminar los parámetros de interés que nos brindan la información total del proceso, necesaria para el desarrollo de este trabajo.

4.4.6.1. Etapa de Extracción

Para el desarrollo de esta investigación fue contundente realizar un análisis exhaustivo de esta etapa del proceso, ya que es esta etapa la que más cambios tiene dentro del proceso al estudiar el método disolución-extrusión. La extracción del jugo de la caña panelera, se ejecutó mediante la implementación de las tres fases descritas anteriormente sobre el Método Disolución – Extrusión, más adelante se describe cada una y los resultados obtenidos en estas.

El primer factor a tener en cuenta es el grado de madurez de la caña pues es determinante en la calidad de la panela sin importar el método que se utilice para la extracción de los azúcares de la caña. Para esto se tomaron muestras representativas del cultivo de caña con el que se va a

realizar la producción de panela (20 cañas al azar) por molienda esto se repitió 16 veces el trabajo de molienda de un mes de trabajo; el criterio de selección del tamaño de la muestra es el mismo que se utilizó para el método tradicional de mazas, a las muestras se les realizó una lectura de la concentración de sólidos solubles en los jugos del sexto o séptimo entrenudo del tercio superior (A) y otra del tercio inferior (B), estos datos están consignados en la Tabla 4.27; con estas dos lecturas se hace el promedio y se determina el estado de madurez como el resultado de la división de A/B, de acuerdo con los promedios de los datos de índices de madurez mostrados en el Tabla 4.28.

Tabla 4.27. Promedio de los datos obtenidos (16 veces) de la medición de los °Brix de 20 muestras de caña del cultivo para un día de molienda

Muestra	Parte terminal (A) °Brix	Parte Basal (B) °Brix
1	22	20
2	22	22
3	22	22
4	25	24
5	22	20
6	24	23
7	23	23
8	21	20
9	23	22
10	23	17
11	23	24
12	18	20
13	20	20
14	20	21
15	22	23
16	22	23
17	23	25
18	23	23
19	23	21
20	19	22
Promedio	22	21.75

$$Madurez = \frac{A}{B} = \frac{22}{21.75} = 1.01$$

Tabla 4.28. Estado de madurez de la caña de acuerdo con el índice de madurez.

Índice de Madurez (A/B)	Estado de Madurez
0.95 – 1.0	Caña Madura
>1.0	Caña sobremadura
<0.95	Caña inmadura

El resultado obtenido del índice de la madurez de las cañas utilizadas para la molienda es de 1.01 este valor corresponde a cañas maduras, y garantizan el estado ideal para su corte y molienda pues tienen la cantidad de sacarosa ideal para la buena calidad del producto. Después de verificar el grado de madurez de la caña se procede a la extracción de los azúcares contenidos en la caña; la primera fase consiste en la reducción del tamaño del vástago de caña para mayor efecto también se abrió a la mitad, los promedios de las variables de interés en esta parte del proceso se muestran en la Tabla 4.29.

Tabla 4.29. Datos Obtenidos de la Primera Fase de la Extracción de los Azúcares

Parámetros de interés en la fase de reducción de tamaño de la caña	
Temperatura Ambiente	24 °C
Tiempo empleado para la fase 1	27 minutos
Peso de la caña utilizada	50 Kg
Tamaño promedio de las astillas de caña	25 – 30 cm

Terminada la etapa de reducción de tamaño se procede a la segunda fase; para el desarrollo de esta fase los pedazos de caña fueron puestos en un fondo de acero inoxidable y se adicionó agua hasta apenas cubrirla, a continuación se pasó a la hornilla para llevar el agua y la caña a una temperatura determinada y poder extraer los azúcares de la caña; los promedios de los parámetros más importantes de esta fase dos se consignaron en la Tabla 4.30 y Tabla 4.31.

Tabla 4.30. Promedio de los Datos Obtenidos de la Segunda Fase de la Extracción de los Azucares

Parámetros de interés de la fase 2	
Tiempo que transcurrió en colocar en el fondo el agua y los pedazos de caña	13 minutos
Peso de agua adicionada	81.3 Kg
Tiempo que transcurrió en la extracción de los azucares	82 minutos
Combustible utilizado	Bagazo seco y caña brava
Peso del bagazo seco	9.5 Kg
Peso de la caña brava	23.3 Kg
Temperatura Ambiente	24 °C

Tabla 4.31. Promedio de los Datos Obtenidos de los parámetros de interés de los jugos en la fase dos

Tiempo (min)	Temperatura de los jugo °C	°Brix de los jugos	pH de los jugos
0	23.1	0	6.8
5	32.8	0	6.8
10	39	0	6.8
15	42.3	0	6.69
20	49.8	0	6.67
25	55.6	0	6.36
30	61.0	0	6.36
35	68.6	0	6.56
40	74.8	0	7.20
45	79.6	0	7.15
50	84	1	7.10
55	89.8	1	6.96
60	93.2	2	6.93
65	93.3	2	7.24
70	94	2	7.26
75	94.3	2	7.27
80	94.3	2	7.26

Después de someter los pedazos de la caña a una temperatura de 94 °C por un periodo de tiempo de 80 minutos y no observar ningún incremento en los grados Brix se procedió a retirar los vástagos de caña para pasarlos por un sistema mecánico de molinos que

aplicándole presión termina de extraer los líquidos contenidos en la caña, esta fase se conoce como la fase tres del Método Disolución – Extrusión.

El agua – miel resultado de la extracción de los azúcares por disolución se distribuye en los tres fondos, después de terminar de extraer de los pedazos de caña los azúcares, estos se mezclan con el agua miel de los fondos y se continua con el proceso de evaporización y concentración del agua – miel. Los datos obtenidos de las variables de interés en esta fase se consignaron en la Tabla 4.32.

Tabla 4.32. Promedio de los Datos Obtenidos de la Tercera Fase de la Extracción de los Azúcares

Parámetros de interés en la fase tres	
Tiempo transcurrido en pasar los vástagos de caña a los molinos	20 minutos
Tiempo empleado para la extracción de los azúcares de los vástagos de caña en los molinos	19 minutos
Peso del jugo obtenido de la extracción en los molinos	20 Kg
°Brix de los jugos	7 °Brix
Temperatura de los jugos	38.1 °C
pH de los jugos	5.19
Peso del bagazo obtenido	28.5 Kg
Peso del agua resultante de la fase 2	80 Kg

Con la información consignada en las tablas anteriores y la ecuación 2.8 se puede calcular la eficiencia de extracción de jugo de caña mediante el Método Disolución – Extrusión de la siguiente manera;

$$E = \frac{P_j + (P_a - v)}{P_c + P_a} * 100$$

donde E es el porcentaje de extracción en peso, P_j es el peso del jugo, P_c es el peso de la caña, P_a es el peso del agua adicionada inicialmente y v son las pérdidas de agua por

evaporación, así que tomando los valores de las tablas 4.29 a 4.30, se presentan los siguientes datos:

Tabla 4.33. Datos en la eficiencia de extracción del Método Disolución-Extrusión

P_C	50 Kg
P_j	20 Kg
P_a	81.3 Kg
$P_{agua\ resultante}$	80 Kg
$v = P_a - P_{agua\ resultante}$	1.3 Kg

Reemplazando los datos en la ecuación 4.6, se tiene que:

$$E = \frac{(20\ Kg) + (81.3 - 1.3Kg)}{50Kg + 81.3\ kg} * 100 = 76.16\ \%$$

El porcentaje de extracción de los jugos de caña por el método de disolución-extrusión fue mayor al porcentaje de la extracción del jugo utilizando el método de molienda de la caña tradicional de tres mazas.

4.4.6.2. Etapa de Limpieza

La pre-limpieza de los jugos de la caña se realiza inmediatamente después de la extracción de estos, y consiste en hacer pasar los jugos por una lona que permite cernirlos, en la lona quedan depositados los residuos más grandes como restos de bagazo, hojas, raíces entre otros y pasan jugos más limpios, para continuar con la etapa de limpieza. En la Tabla 4.34 se presentan los promedios de los datos obtenidos de la primera limpieza.

Tabla 4.34. Promedio de los Datos obtenidos de las variables de interés de la etapa de pre-limpieza

Parámetro de Interés	Valor
Tiempo que toma la pre-limpieza	6 minutos
Temperatura ambiente	24 °C
Peso de los residuos después de pasar los jugos por el cernidor	0.4 Kg
°Brix de los jugos	7 °Brix
pH de los jugos	5.19

Después de la pre-limpieza, los jugos se distribuyen en los tres fondos que ya contienen agua –miel, para calentar los jugos entre los 90 – 93 °C la primera cachaza formada se retira manualmente, esta es la primera fase de la limpieza.

Tabla 4.35. Datos obtenidos de la primera descachazada de los jugos de caña

Variables medidas para la primera descachazada de los jugos de caña					
Paila 1		Paila 2		Paila 3	
Tiempo transcurrido	6 minutos	Tiempo Transcurrido	15 minutos	Tiempo transcurrido	26 minutos
Temperatura	92 °C	Temperatura	91 °C	Temperatura	91 °C

Para continuar con el proceso de limpieza del jugo se prepara en un recipiente una mezcla de agua y mucilago vegetal, se agita hasta obtener una sustancia densa, que será adicionada al jugo. Por acción coagulante del cadillo y el calor se forma la cachaza y así proceder a la limpieza o clarificación de los jugos.

Tabla 4.36. Datos obtenidos de los parámetros a la hora de adicionar el cadillo a los jugos

Datos obtenidos de los parámetros de interés en la adición del cadillo					
Paila 1		Paila 2		Paila 3	
Tiempo de calentamiento de los jugos	33 minutos	Tiempo de calentamiento de los jugos	39 minutos	Tiempo de calentamiento de los jugos	58 minutos
Temperatura	93.3 °C	Temperatura	89 °C	Temperatura	93.2 °C
°Brix jugos	17	°Brix jugos	8	°Brix jugos	10
pH jugos	5.20	pH jugos	5.23	pH jugos	5.27

La mezcla de cadillo utilizada para 100 Kg de agua - miel, fue de 1 Kg, 0.15 Kg de cadillo y 0.85 Kg de agua, la cantidad de mezcla se dividió en dos o tres cantidades para conseguir una buena limpieza de los jugos; se adiciona el cadillo, en cada una de las pailas una vez los jugos alcanzan temperaturas cercanas a los 93 °C se retira la segunda cachaza que se ha formado "cachaza negra" y se adiciona más mucílago con el fin de retirar la tercera cachaza "cachaza blanca" poco antes de que los jugos alcancen la ebullición a 94°C. En la tabla 4.36 se muestran las variables de interés y sus valores en esta etapa.

La limpieza de los jugos utilizando este método se hizo más difícil, la caña al estar en presencia de tanta agua resta los efectos aglutinantes del cadillo debido a esto no se forma una cachaza densa y es difícil retirar las impurezas.

4.4.6.3. Etapa de Evaporación y Concentración de los jugos

La etapa de evaporización y concentración de los jugos del proceso de producción de panela se vio afectada por las condiciones en las que se extrajo el jugo contenido en la caña, ya que al incrementar cerca de 80 Kg de agua a los jugos de la caña el tiempo de exposición de estos en la hornilla para lograr la evaporización se incrementó notablemente; el tiempo de concentración del jugo que no debe ser superior a dos o tres horas (dependiendo de la cantidad de jugo), si éste se sobrepasa, la panela puede presentar cambios en su color.

Los datos obtenidos de cada paila se muestran en tablas separadas (Tabla 4.37, Tabla 4.38 y Tabla 4.39). Los parámetros finales se muestran en la Tabla 4.40

Tabla 4.37. Parámetros considerados en la etapa de concentración

Parámetros de interés en la etapa de concentración de los jugos	
Tiempo transcurrido en la etapa	136 minutos
Temperatura ambiente	24 °C

El jugo sometido a evaporación y concentración demora mucho más tiempo para alcanzar los °Brix de punto de miel, lo que implica un mayor gasto de combustible al tener durante más tiempo las pailas en la hornilla.

Tabla 4.38. Promedio de los Datos de las variables en la etapa de concentración de los jugos de la paila 1

Tiempo transcurrido (s)	Temperatura de los jugos (°C)	°Brix de los jugos
1:26	93	2
1:30	94	2
1:34	94	2
1:40	94	3
1:45	94	3
1:55	90	9
1:59	94.3	17
2:08	94.2	9
2:14	94	8
2:20	94.7	10
2:25	94.4	11
2:31	94.8	12
2:42	94.8	14
2:49	94.3	16
2:56	94.7	22
3:04	94.6	22
3:10 Adición cera de laurel	95	27
3:17	95.4	37
3:24	95	32
3:29	95.6	44
3:36 Punto de miel	97.8	67

Tabla 4.39. Promedio de los Datos de las variables en la etapa de concentración de los jugos de la paila 2

Tiempo transcurrido (s)	Temperatura de los jugos (°C)	°Brix de los jugos
2:10	92	7
2:15	94.1	7
2:21	94	8
2:26	93	8
2:33	94.3	10
2:44	94.3	10
2:50	94.1	11
2:58	93.9	17
3:05	94	17
3:12 se reciben los jugos de la paila 3 para continuar con la evaporización		
3:19	94.5	22
3:25	94.8	26
3:30	94.6	32
3:37	95	38

Tabla 4.40. Promedio de los Datos de las variables en la etapa de concentración de los jugos de la paila 3

Tiempo transcurrido (s)	Temperatura de los jugos (°C)	°Brix de los jugos
2:11	87.3	7
2:16	92	7
2:22	93.3	8
2:27	93.2	8
2:39	98.2	10
2:44	92.6	10
2:51	93.3	11
3:00	92.6	12
3:07	93.1	13
3:14	92.6	16
3:18 Se pasaron los jugos a la paila 2		

4.4.6.4. Etapa de punteo de la panela

En esta fase final del proceso los jugos se recogen en la paila 1 y se sigue el proceso para llegar al punto de miel, las mieles alcanzan temperaturas superiores a los 100 °C. Cuando se elabora panela se requiere realizar esta etapa en el menor tiempo posible y con un pH cercano a 5.8 y una buena velocidad de calentamiento en la hornilla permite una rápida concentración de los jugos sin quemar el producto. Es por esta razón que se deben controlar estos parámetros. Para determinar el "punto de miel" los campesinos utilizan métodos empíricos, ya que si los jugos o mieles se sacan de las pailas evaporadoras hacia la paila punteadora a muy alta temperatura, se presentará una caramelización de los azúcares con el consecuente oscurecimiento de la panela; en caso contrario se hace difícil la solidificación. A continuación se muestran los promedios de los datos obtenidos de esta etapa.

Tabla 4.41. Datos de tiempo y temperatura para la etapa de punteo

Tiempo (s)	Temperatura de los jugos (°C)	°Brix de los jugos
3:36	95	69
3:41	96.8	72
3:47	103.5	78
3:49	112.3	92
3:55	115.0	93
3:58	118.2	94
4:00	119.3 Punto panela pulverizada	94

Punteo, batido y moldeo de la panela. El punto final de la panela se alcanza cuando la concentración de sólidos solubles está entre 90 y 94 °Brix.

Una vez se alcanza el punto de panela se sacan las mieles de la hornilla y se llevan a un fondo de acero inoxidable, donde son sometidas a una acción de agitado intenso e intermitente operación que demora en total entre 10 y 15 minutos. Después de un período de agitación inicial de unos tres a cuatro minutos, las mieles se dejan en reposo y a merced del aire incorporado, comienzan a crecer en la batea hasta casi desbordarse, siendo necesario reiniciar la agitación. Este proceso se repite dos o tres veces.

El propósito del batido es modificar la estructura y la textura de las mieles, y reducir su capacidad de adherencia. Al incorporar aire a las mieles durante el batido, los cristales de sacarosa crecen y adquieren porosidad, de forma que cuando la panela se enfría, asume su característica de sólido compacto. La panela obtenida por este método es mucho más oscura que la obtenida por el método tradicional, esto es debido a las dificultades al remover las impurezas.

Posteriormente, se deposita en las gaveras de madera o se hace pasar por una zaranda para sacar la panela en polvo y se deja en reposo por un periodo de una hora para luego ser empacada.

Tabla 4.42. Parámetros de interés en la etapa de punteo de los jugos de caña
Parámetros de interés en la etapa final de la elaboración de la panela

Tiempo de permanencia de los jugos	24 minutos
Peso de la panela obtenida	5 Kg
Combustible utilizado en la hornilla	Bagazo y caña brava
Peso del bagazo utilizado en la hornilla	22.7 Kg
Peso de la caña brava utilizado en la hornilla	36.1 Kg
Peso de cenizas del combustible	5 Kg
Peso de la cachaza retirada de los jugos	0.8 Kg
Temperatura de moldeo	119.3 °C

Finalmente se presenta el diagrama de bloques del proceso completo de producción de panela mediante la implementación del método Disolución-Extrusión para la extracción de los jugos de caña panelera. Este diagrama contiene las tres etapas más importantes en el proceso de extracción de los jugos de caña, que comienza con el suministro de caña panelera, punto 1, y termina con el suministro de jugo extraído, punto 2.

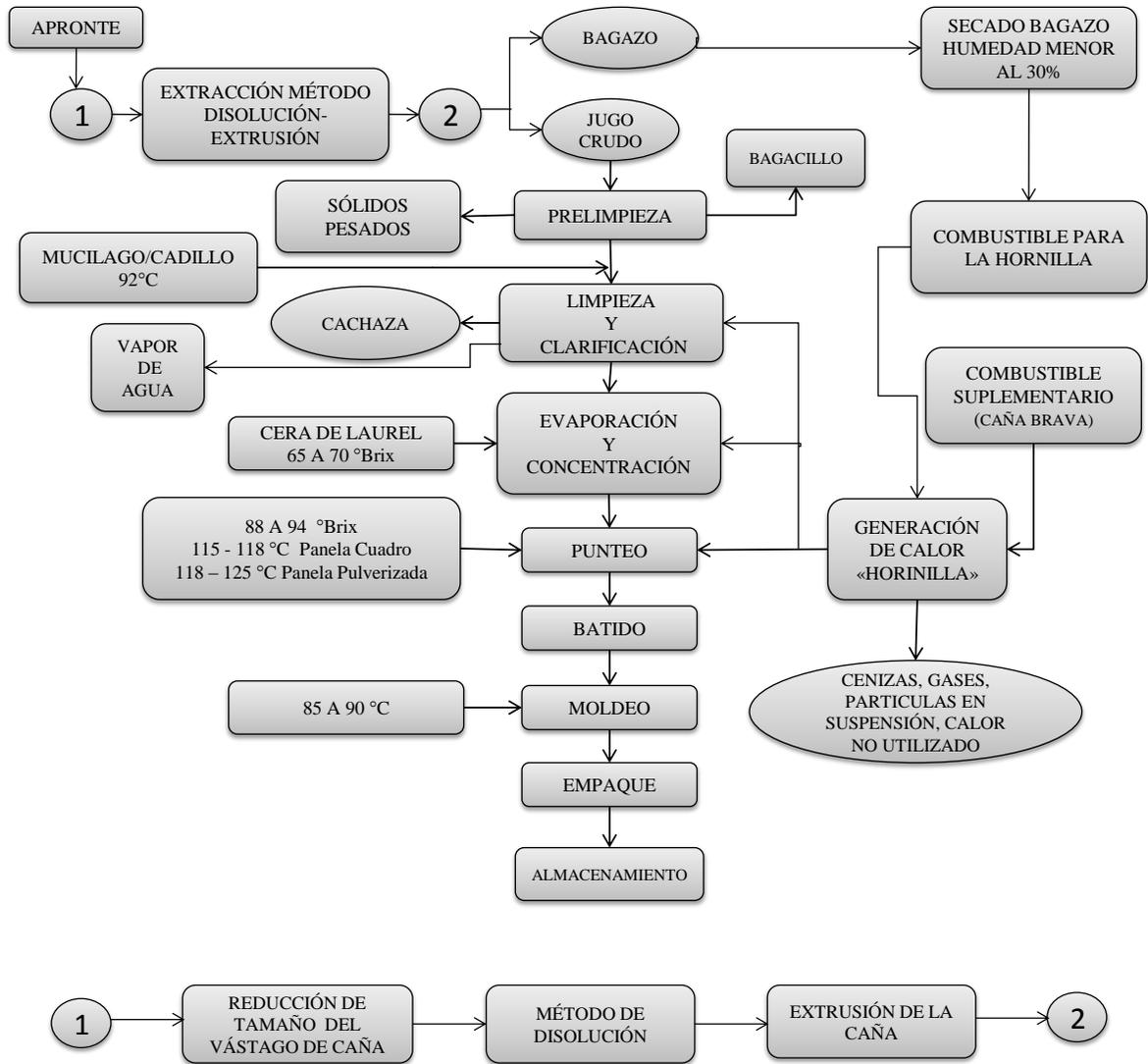


Figura 4.30. Diagrama de bloques del proceso de fabricación de panela utilizando el Método Disolución – Extrusión

4.5. Diagnóstico Energético del proceso productivo de panela implementando el método Disolución-Extrusión.

A continuación se presentan los resultados del balance de masas del proceso de producción de panela aplicando el método disolución-extrusión para este análisis se utilizaron las mismas ecuaciones planteadas para el método tradicional de mazas, partiendo de los datos de la tabla 4.30 fueron hechos los cálculos correspondientes.

4.5.1. Balance de masas

Para desarrollar los cálculos del gasto energético del trapiche panelero utilizando el método de Disolución – Extrusión se tienen en cuenta los valores de las variables medidas experimentalmente, y se sigue un procedimiento similar al realizado en el diagnóstico energético para el proceso de producción de panela tradicional, usando las mismas ecuaciones para el balance de masas, teniendo en cuenta las etapas de combustión y de producción como se presenta a continuación.

Etapas de combustión

Para este método se trabajó con un promedio de 50 Kg de caña panelera procesada, donde se produjo una cantidad de bagazo húmedo de 28.5 Kg y el tiempo que demoró el proceso de extracción de los jugos fue de 27 minutos. De estos datos se puede calcular el flujo de caña, el flujo de bagazo húmedo y el de bagazo seco, de la siguiente forma:

$$\dot{m}_{caña.} = \frac{50 \text{ Kg}}{27 \text{ min}} = 111 \text{ Kg/h}$$

$$\dot{m}_{b.h.} = \frac{28.5 \text{ Kg}}{27 \text{ min}} = 63.3 \text{ Kg/h}$$

Y luego de la ecuación 2.10, el flujo de bagazo seco, que representa la cantidad de bagazo utilizado en la hornilla en el proceso de combustión viene dado por:

$$\dot{m}_{b,s} = 0.5 \dot{m}_{b,h} = 31.6 \text{ Kg/h}$$

Ahora se calculan los otros parámetros involucrados en el proceso de combustión, como son el Flujo másico de aire seco, flujo másico de agua en el aire, flujo másico de residuos, flujo másico de agua en los gases de combustión y flujo másico de gases secos.

Flujo másico de aire seco

Tomando la ecuación 2.12 se puede estimar un flujo de aire seco en los gases de combustión asumiendo que todo el nitrógeno presente en los gases de combustión es el que está en el aire atmosférico (79% N_2 y 21% O_2); se puede considerar que 1 mol de $N_2=28$ g, entonces 1 kmol/h de $N_2 = 28$ Kg/h. Reemplazando los valores en la ecuación 2.12 tenemos:

$$(O_2)_{aire} = 28 \text{ Kg/h} * \frac{0.21}{0.79} = 7.44 \text{ Kg/h}$$

De ahí

$$\dot{m}_{a.s.} = \dot{m}_{O_2} + \dot{m}_{N_2} = \frac{(7.44 + 28) \text{ Kg}}{h} = 35.44 \text{ Kg/h}$$

Flujo másico de agua en el aire

Considerando que la humedad relativa promedio de la zona de trabajo es de $\omega = 68\%$, (promedio de datos meteorológicos de humedad relativa en la zona de procesamiento de la panela), y reemplazando los valores en la ecuación 2.16, se tiene el flujo del agua en el aire:

$$\dot{m}_{a.a.} = \omega \cdot \dot{m}_{a.s} = 0.68 * 35.44 \text{ Kg/h} = 24.1 \text{ Kg/h}$$

Flujo de residuos

El flujo másico de los residuos, \dot{m}_r , representa la cantidad de cenizas resultado de la combustión del bagazo. Como observación general se nota que el nivel de no quemados presentes en la mayoría de los trapiches es muy bajo, es decir que todo el bagazo es consumido, y en algunos casos se puede despreciar. En ese caso el flujo de residuos será el

porcentaje de cenizas presente en el bagazo seco usado en la combustión, según la ecuación 2.17.

$$\dot{m}_r = 2.5\% * \dot{m}_{b.s.} = 0.025 * 31.6 \text{ Kg/h} = 0.8 \text{ Kg/h}$$

Flujo másico de agua en los gases de combustión

El flujo másico de agua en los gases de combustión es calculado, a partir de la ecuación 2.18, donde es calculado el flujo másico de agua generada, el flujo de masa de agua en el bagazo y tomando el valor del flujo de agua en el aire calculado anteriormente, como se muestra a continuación. El flujo de agua generada es calculado a partir de la ecuación 2.20, teniendo en cuenta el flujo de bagazo seco usado en la hornilla.

$$\dot{m}_{a.generada.} = 9 * 6.5\% * \dot{m}_{b.s.} = 9 * 0.065 * 31.6 \text{ Kg/h} = 18.48 \text{ Kg/h}$$

Y el flujo de agua en el bagazo de la ecuación 2.10.

$$\dot{m}_{a.b.} = 63.3 \text{ Kg/h} * 0.5 = 31.6 \text{ Kg/h}$$

Finalmente tomando los valores correspondientes y reemplazando en la ecuación 2.18, se obtiene el valor del flujo másico de agua en los gases de combustión:

$$\dot{m}_{a.t.} = \dot{m}_{a.b.} + \dot{m}_{a.a.} + \dot{m}_{a.generada.} = 70.18 \text{ Kg/h}$$

Flujo Másico de Gases Secos

El flujo de gases secos generados en la cámara de combustión, se determina a partir de la ecuación de balance de masa descrita para el proceso de combustión en la producción de panela, despejando $\dot{m}_{g.s.}$ de la ecuación (2.8) y reemplazando los valores de las variables anteriormente calculadas se tiene que:

$$\dot{m}_{g.s.} = \dot{m}_{b.s.} + \dot{m}_{a.b.} + \dot{m}_{a.s.} + \dot{m}_{a.a.} - (\dot{m}_r + \dot{m}_{a.t.}) = 51.76 \text{ Kg/h}$$

A continuación se presenta una tabla resumen de los parámetros involucrados en la etapa de combustión en el balance de masas.

Tabla 4.43. Cálculos del balance de masas en la etapa de combustión del proceso de producción de panela por el método disolución-extrusión

PARÁMETRO	VALOR
Flujo másico de caña procesada $\dot{m}_{caña.}$	$\frac{50 \text{ Kg}}{27 \text{ min}} = 111 \text{ Kg/h}$
Flujo másico de bagazo húmedo $\dot{m}_{b.h.}$	$\frac{28.5 \text{ Kg}}{27 \text{ min}} = 63.3 \text{ Kg/h}$
Flujo másico de bagazo seco $\dot{m}_{b.s.}$	$0.5 \dot{m}_{b.h.} = 31.6 \text{ Kg/h}$
Flujo másico de aire seco $\dot{m}_{a.s.} = \dot{m}_{O_2} + \dot{m}_{N_2}$	35.44 Kg/h
Flujo másico de agua en el aire $\dot{m}_{a.a.} = \omega \cdot \dot{m}_{a.s.}$	24.1 Kg/h
Flujo másico de residuos $\dot{m}_r = 2.5\% * \dot{m}_{b.s.}$	0.8 Kg/h
Flujo másico de agua en los gases de combustión $\dot{m}_{a.t.} = \dot{m}_{a.b.} + \dot{m}_{a.a.} + \dot{m}_{a.generada.}$	70.18 Kg/h
Flujo de gases secos $\dot{m}_{g.s.} = \dot{m}_{b.s.} + \dot{m}_{a.b.} + \dot{m}_{a.s.} + \dot{m}_{a.a.} - (\dot{m}_r + \dot{m}_{a.t.})$	51.76 Kg/h

Etapa de producción

En la etapa de producción de la panela, se tiene en cuenta como entrada el jugo de caña extraído y como salida la cantidad e panela procesada. Para realizar estos cálculos se utilizaron las ecuaciones 2.22 y 2.23

Flujo másico de jugo extraído

El flujo másico de jugo de caña $\dot{m}_{j.c.}$ se calculó teniendo en cuenta la ecuación 2.22, modificando para nuestro análisis el valor E por el de la ecuación 2.8 y considerando de la literatura un porcentaje de cachaza CH de 3% se tiene.

$$\dot{m}_{j.c.} = \frac{\dot{m}_{caña}(E - CH)}{100} = \frac{111 \text{ Kg/h}(76.16 - 3)}{100} = 81.2 \text{ Kg/h}$$

Flujo másico de panela producida

Así mismo, usando la ecuación 2.23, el flujo másico de panela obtenida es estimado como:

$$\dot{m}_p = \frac{\dot{m}_{j.c.} \cdot \text{°}B_{j.c.}}{\text{°}B_p} = 6.04 \text{ Kg/h}$$

Con $\text{°}B_{j.c.} = 7 \text{ °Brix}$ y $\text{°}B_p = 94$ (De las tablas 4.40 y 4.41), donde $\text{°}B_{j.c.}$ son los grados Brix del jugo clarificado y $\text{°}B_p$ son los grados Brix de la panela (1 **°Brix** = 1 g de sacarosa en 99 g de agua). A continuación se presentan los resultados en una tabla resumen de los parámetros involucrados en la etapa de producción de panela.

Tabla 4.44. Cálculos del balance de masas en la etapa de producción de panela por el método disolución-extrusión

PARÁMETRO	VALOR
$E = \frac{P_j + (P_a - v)}{P_c + P_a} * 100\%$	76.16%
Flujo másico de jugo extraído $\dot{m}_{j.c.} = \frac{\dot{m}_{caña}(E - CH)}{100}$	81.2 Kg/h
Flujo másico de panela producida $\dot{m}_p = \frac{\dot{m}_{j.c.} \cdot \text{°}B_{j.c.}}{\text{°}B_p}$ $\text{°}B_{j.c.} = 7 \text{ y } \text{°}B_p = 94$	6.04 Kg/h

4.5.2. Balance de energía

Es muy importante determinar que parámetros intervienen en el gasto energético del trapiche para estimar sus efectos en la producción panelera. A continuación se calculan los flujos de energía de entrada en el proceso que son, los asociados al bagazo (\dot{E}_b) y al aire seco ($\dot{E}_{a.s}$) y flujos energéticos de salida que son los asociados a los gases en la chimenea ($\dot{E}_{g.ch}$), el flujo debido a los residuos (\dot{E}_r), el flujo energético aprovechado ($\dot{E}_{e.a}$), y las pérdidas energéticas ($\dot{E}_{p.e}$):

Flujo energético asociado al bagazo

De acuerdo a la ecuación 2.25, el flujo energético asociado al bagazo está dado por:

$$\dot{E}_b = \dot{m}_{b.s}.PCI + \dot{m}_{a.b} \cdot h_f$$

Según la tabla 2.6. Para un bagazo con humedad del 50%, tenemos que el poder calórico inferior del bagazo es de $PCI=2001.60$ Kcal/Kg. Como una kilocaloría (kcal) es exactamente 4,1868 kilojulios (kJ), tenemos $PCI=8380.3$ KJ/Kg. La entalpia h_f del agua que se aproxima como la del líquido saturado a temperatura ambiente, es obtenida de las tablas termodinámicas del agua, tabla A1 (ANEXO A), obteniendo un valor de $h_f = 104.89$ KJ/Kg para una temperatura ambiente de $T=24$ °C, que es la temperatura promedio de la zona de La Laja- La Vega (Cauca). Reemplazando estos valores en la ecuación 2.25. con $\dot{m}_{b.s} = 31.6$ Kg/h y $\dot{m}_{a.b} = 31.6$ Kg/h

$$\dot{E}_b = 268132 \text{ KJ/h}$$

Flujo de Energía Asociado al Aire de Combustión

Este parámetro se calculó de igual forma que para el método de producción tradicional teniendo en cuenta la ecuación 2.27.

$$\dot{E}_{a.s} = \dot{m}_{N_2} h_{N_2} + \dot{m}_{O_2} h_{O_2} + \dot{m}_{a.a} h_{a.a}$$

$$\dot{E}_{a.s} = (28 \text{ Kg/h} * 397.9 \text{ KJ/Kg}) + (7.44 \text{ Kg/h} * 213.11 \text{ kJ/Kg}) + (24.14 \text{ Kg/h} * 2547.2 \text{ KJ/Kg})$$

$$\dot{E}_{a.s} = 74114.3 \text{ KJ/h}$$

Flujo de Energía Asociado a los Gases en la Chimenea

Se puede estimar de acuerdo a las temperaturas de la chimenea y el porcentaje de pérdidas, tabla 2.7, el flujo asociado a los gases en la chimenea. Tomando como referencia una temperatura de salida de los gases medida de 390° C el porcentaje de pérdidas será del 7.7 % de los flujos de energía asociados al bagazo y al aire de combustión. Reemplazando los valores correspondientes se obtiene:

$$\dot{E}_{g.ch} = 7.7\% * (\dot{E}_{a.s} + \dot{E}_b) = 26352.9 \text{ KJ/h}$$

Flujo de Energía Aprovechado

El flujo energético aprovechado en el proceso se calcula como:

$$\dot{E}_{e.a} = \dot{m}_p C_{p,p} \Delta T_p + \dot{m}_{CH} C_{p,CH} \Delta T_{CH} + \dot{m}_{a.e.} \cdot h_{fg}$$

De acuerdo con los datos de la Tabla A.3, anexo A, se toma un valor específico para la panela como para la cachaza de 1.9 KJ/KgK y de 2 KJ/KgK respectivamente, teniendo en cuenta para la cachaza una concentración de 10 °Brix y para la panela de 90 °Brix.

Continuando con los cálculos, la masa de agua evaporada $\dot{m}_{a.e.}$ se estima como la diferencia entre el peso inicial del jugo y el peso de la panela obtenida es decir:

$$\dot{m}_{a.e.} = 200 \text{ Kg/h} - 36 \text{ Kg/h} = 63.9 \text{ Kg/h}$$

Las diferencias de temperatura se toman de la tabla 4.24 como 91°C = 364 K para el descachazado y 118°C = 391K, como el punto de la panela a cuadro, de acuerdo a los datos de la Tabla 4.9 y Tabla 4.13. También se estima que el flujo de cachaza es el 3% de la producción de panela

$$\dot{m}_{CH} = 3\% * \dot{m}_p = 0.52 \text{ Kg/h.}$$

La entalpia de vaporización del agua es la misma utilizada anteriormente, para las condiciones de la zona, tomando los datos del anexo A. Finalmente, reemplazando los valores

$$\dot{E}_{e.a} = (17.3 * 1.9 * 391) + (0.52 * 2 * 364) + (63.9 * 2276.86) \text{KJ/h}$$

$$\dot{E}_{e.a} = 158722 \text{ KJ/h}$$

Flujo de Energía Asociado a Pérdidas

Las pérdidas por transferencia de calor a través de las paredes no se calculan directamente, sino que se obtienen a partir del balance de energía:

$$\dot{E}_{p.e} = \dot{E}_b + \dot{E}_{a.s} - (\dot{E}_{g.ch} + \dot{E}_{e.a}) = 157171.3 \text{ KJ/h}$$

A continuación se presenta una tabla resumen de los parámetros involucrados en el balance de energía para la producción de panela procesando los jugos extraídos por el método de disolución-Extrusión.

Tabla 4.45. Cálculos del balance de energía en el proceso de producción de panela por el método disolución-extrusión

PARÁMETRO	VALOR	% TOTAL ENERGIA
Flujo energético asociado al bagazo $\dot{E}_b = \dot{m}_{b.s} PCI + \dot{m}_{a.b} h_f$	268132 KJ/h	Suministrada 100%
Flujo de Energía Asociado al Aire de Combustión $\dot{E}_{a.s} = \dot{m}_{N_2} h_{N_2} + \dot{m}_{O_2} h_{O_2} + \dot{m}_{a.a} h_{a.a}$	74114.3 KJ/h	
Flujo de energía aprovechado $\dot{E}_{e.a} = \dot{m}_p C_{p,p} \Delta T_p + \dot{m}_{CH} C_{p,CH} \Delta T_{CH} + \dot{m}_{a.e} h_{fg}$	158722 KJ/h	Aprovechada 46.4%
Flujo de Energía Asociado a los Gases en la Chimenea $\dot{E}_{g.ch} = 7.7\% * (\dot{E}_{a.s} + \dot{E}_b)$	26352.9 KJ/h	Perdida con los gases 7.7 %
Flujo de energía asociado a pérdidas $\dot{E}_{p.e} = \dot{E}_b + \dot{E}_{a.s} - (\dot{E}_{g.ch} + \dot{E}_{e.a})$	157171.3 KJ/h	Destruida 45.9 %

4.5.3. Cálculo de consumos energéticos

Para realizar estos cálculos fueron utilizadas las ecuaciones de la sección 2.9.3, teniendo en cuenta que $\Delta T_m = \Delta T_a = T_s - T$, representa el incremento de temperatura al cual son expuestos los jugos de caña extraídos, donde T_s es la temperatura de saturación del agua y T es la temperatura del jugo al entrar al calentador. Tomando $T = 24^\circ\text{C}$ (temperatura ambiente de la vereda Santa Juana), el incremento de temperatura será:

$$\begin{aligned}\Delta T_m &= \Delta T_a = 98.9^\circ\text{C} - T \\ \Delta T_m &= \Delta T_a = 74.9^\circ\text{C} = 347.9\text{ K}\end{aligned}$$

Experimentalmente se encontró que la densidad inicial promedio del jugo después de la extracción del jugo de la caña es de 7°Brix . (Tabla 4.39), el calor específico de acuerdo con la tabla A.3 del anexo A. $C_{pm} = 2.01\text{ KJ/KgK}$. Reemplazando en las ecuaciones para el cálculo de las necesidades energéticas y teniendo en cuenta el procesamiento de 100 Kg de jugo de caña con una concentración de sólidos solubles medido de 7°Brix ($M_a=93\%$ y $M_m = 7\%$), el calor para el agua será de:

$$\begin{aligned}Q_a &= M_a * C_{pa} * \Delta T_a \\ Q_a &= 93\text{ Kg} * 4.198\text{ KJ/Kg. K} * 347.9\text{ K} = 135830\text{ KJ}\end{aligned}$$

Del mismo modo el calor de la miel es:

$$\begin{aligned}Q_m &= M_m * C_{pm} * \Delta T_m \\ Q_m &= 7\text{ Kg} * 2.27\text{ KJ/KgK} * 347.9\text{ K} = 4895\text{ KJ}\end{aligned}$$

Finalmente el calor requerido para el calentamiento de los jugos es de:

$$Q_0 = Q_a + Q_m = 140720\text{ KJ}$$

Calores de concentración y de punteo

Para efectos de cálculo se toma como referencia la densidad del jugo $b_3=7^\circ\text{Brix}$, y la densidad del jugo en el punto 4, ver figura 2.14, asignándole un valor de $b_4 = 67^\circ\text{Brix}$,

según los datos de la tabla 4.37, por representar la salida de los jugos de la etapa de concentración y la entrada a la etapa de punteo. Adicionalmente se toma la densidad final de la panela como $b_5=94$ °Brix, de la tabla 4.41.

Entonces, tomando los datos anteriormente mencionados y reemplazándolos en las ecuaciones 2.48, 2.49, y 2.58, 2.61, se obtienen las masas evaporadas tanto en la concentración como en el punteo. Posteriormente se calculó el calor requerido para la concentración y el punteo respectivamente.

El agua evaporada en la concentración será:

$$a_c = 100 - \frac{100 * b_3}{b_4} = 89.6 \text{ Kg}$$

Y el agua evaporada en el punteo será:

$$a_p = 100 - a_c - \left(\frac{(100 - a_c) * b_4}{b_5} \right) = 3 \text{ Kg}$$

Ahora, se pueden estimar los consumos energéticos requeridos tanto para la concentración como para el punteo, usando las ecuaciones 2.48 y 2.49, con $\Delta h_s = 2269.1$ KJ/Kg, valor de la entalpia de evaporación del agua a la presión atmosférica del lugar de trabajo, extraída de la tabla A1 (anexo A): El calor requerido para la concentración será:

$$Q_1 = a_c * \Delta h_s = 203200 \text{ KJ}$$

Del mismo modo, el calor requerido para el punteo será:

$$Q_2 = a_p * \Delta h_s = 6809.5 \text{ KJ}$$

Finalmente, se puede calcular el calor total estimado en el proceso de producción de la panela teniendo en cuenta que están siendo considerados procesos de gasto energético: el calentamiento, el clarificado, la concentración y el punteo de los jugos. En este caso el cálculo sería la suma de los requerimientos calóricos para el calentamiento, concentración y en el punteo de los jugos.

$$Q_T = Q_0 + Q_1 + Q_2 = 350730 \text{ KJ}$$

A continuación se presenta una tabla resumen con los datos relacionados al cálculo de los consumos energéticos en el proceso de producción del panela, procesando los jugos de caña extraídos por el método de disolución-extrusión.

Tabla 4.46. Cálculos de las necesidades energéticas en el proceso de producción de panela por cada 100 Kg de jugo procesado por el método disolución-extrusión.

PARÁMETRO	VALOR
Presión atmosférica (bar)	0.86
Temperatura ambiente (°C)	24
Densidad del jugo mezclado extraído (°Brix)	7
Masa de agua (%)	93
Masa de miel (%)	7
Densidad del jugo a la entrada del concentrador (°Brix)	67
Densidad final (°Brix)	94
CÁLCULOS	
Calor específico de la miel (C_{pm}) (KJ)/KgK	2.01
CALOR REQUERIDO EN EL CALENTAMIENTO	
Para el agua Q_a (KJ)	135830
Para la miel Q_m (KJ)	4985
Total requerido $Q_0 = Q_a + Q_m$ (KJ)	140720
CALOR REQUERIDO EN LA CONCENTRACIÓN	
Masa de agua evaporada en la concentración a_c (Kg)	89.6
Total requerido Q_1 (KJ)	203200
CALOR REQUERIDO EN EL PUNTEO	
Masa de agua evaporada en el punteo a_p (Kg)	3
Total requerido Q_2 (KJ)	6809.5
CALOR TOTAL REQUERIDO	
$Q_T = Q_0 + Q_1 + Q_2$ (KJ)	350730
Panela producida estimada por cada 100 Kg de jugo mezclado procesado (Kg)	
$100 - a_c - a_p + \text{Peso jugo}$ $\text{Peso jugo} = 20 \text{ Kg}$	27.44

4.5.4. Índices de diagnóstico del proceso de fabricación de panela

A continuación se muestran los cálculos de los índices para el diagnóstico general del proceso de producción de panela. Se definieron seis índices importantes que tienen en cuenta las condiciones de la materia prima (caña panelera), las condiciones del trapiche y el rendimiento global del proceso de producción de panela.

Primer índice

Es un indicador del rendimiento del cultivo y se define como el cociente entre la panela producida y la caña procesada.

$$I_1 = \frac{\dot{m}_{panela}}{\dot{m}_{caña}} = \frac{6.04}{111} = 0.1$$

Este valor muestra un índice de productividad bueno, teniendo en cuenta que normalmente este valor es de alrededor de 0.1 (~10%) para la mayoría de los cultivos de caña, según los estudios de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, CORPOICA. Y puede ser atribuido a las cantidades de abono orgánico utilizado en los cultivos de caña como lo son la cáscara de café, la gallinaza entre otros subproductos de la labor agrícola campesina.

Segundo índice

El autoabastecimiento energético de la hornilla del trapiche es fundamental para determinar el rendimiento del proceso de producción de panela. Aquí se estima si el uso del bagazo como combustible es suficiente para suministrar la energía que el proceso de producción requiere.

En este caso se asume teóricamente que el bagazo debe suministrar toda energía requerida en el proceso. En ese sentido la cantidad de bagazo consumido que teóricamente abastecería energéticamente el proceso sería la suma de la cantidad real de combustible usado, es decir la cantidad de bagazo seco usado más la cantidad de combustible extra utilizado.

$$\dot{m}_{b,s,consumido} = 22.7 \text{ bagazo} + 36.1 \text{ caña brava} = 58.8 \text{ Kg/h}$$

Y reemplazando los valores en la ecuación se tiene:

$$I_2 = \left(\frac{\dot{m}_{b,s,producido} - \dot{m}_{b,s,consumido}}{\dot{m}_{b,s,producido}} \right) * 100\% = \frac{31.6 - 58.8}{31.6} = -86\%$$

Este resultado revela una falencia grande en el autoabastecimiento energético del proceso y está relacionado con las características del jugo de caña extraído mediante el método de Disolución-Extrusión, pues además de evaporar el agua de los jugos de caña se debe evaporar también el agua de imbibición que está implícita en el proceso de extracción del jugo de la caña, requiriendo mayor tiempo y por tanto más energía suministrada a los jugos. De este modo, este índice negativo y de valor grande (-86%), evidencia que el bagazo utilizado no es suficiente para cumplir con las necesidades energéticas del proceso. Por esta razón es necesario el uso de otros combustibles, en mayor proporción, como la caña brava en este caso.

Tercer índice

Dentro de los índices que reflejan las condiciones del proceso este índice particularmente es muy importante, pues determina de forma global la eficiencia energética del proceso de producción, y es determinada relacionando la energía aprovechada entre la energía suministrada, de la siguiente forma:

$$I_3 = \eta = \frac{\dot{E}_{a.e.}}{\dot{m}_{b.e.}PCI + \dot{m}_{a.b.}h_f} = 59\%$$

El valor de este índice es mayor al 50%, y es garantía de que las necesidades energéticas en el trapiche pueden ser entregadas al procesamiento de los jugos de caña.

Cuarto índice

Este índice revela las falencias en la planta física de la hornilla panelera en cuanto al flujo energético de los gases de combustión y flujo energético de los gases de la chimenea con respecto a la energía suministrada.

$$I_4 = \frac{\dot{E}_{gases}}{\dot{E}_{suministrada}} = \frac{\dot{E}_{gases\ combustion} + \dot{E}_{gases\ chimenea}}{\dot{E}_{suministrada}} * 100 = 37.5 \%$$

Generalmente el diseño de la chimenea de la hornilla tiene mucho que ver con índices altos en pérdida de gases de combustión, en este caso es de 37.5%, que revela una marcada fuga de gases que no son aprovechados. Este valor puede ser atribuido, entre otros factores, a la altura de la chimenea que no permite la correcta circulación y aprovechamiento de aquellos gases.

Quinto índice

En este índice se revelan las pérdidas de energía suministrada a través de las paredes de la hornilla y tiene mucho que ver con su forma de construcción artesanal. Reemplazando los valores correspondientes se tiene que:

$$I_5 = \frac{\dot{E}_{pérdidas}}{\dot{E}_{suministrada}} = 58.6\%$$

Este valor evidencia la energía está siendo transferida con mayor intensidad a las paredes de la hornilla que a las pailas, y como las hornillas son construidas con la cámara de combustión bajo tierra y su cuerpo de ladrillo y arcilla, la energía es distribuida de una forma no muy homogénea dando lugar a gradientes de temperatura, que generalmente son aceptables para lograr un correcto procesamiento de los jugos de caña y producir la panela.

Sexto índice

En este índice se resume el rendimiento global del proceso productivo, pues tiene en cuenta el éxito en la extracción del jugo de caña, el secado del bagazo (en caso de que se realice), el proceso de combustión, y en el aprovechamiento de la energía en el proceso productivo.

$$I_6 = \frac{\dot{m}_{b.s.consumido}}{\dot{m}_{panela}} = \frac{22.7Kg/h}{6.04Kg/h} = 3.7$$

El valor de este índice es alto como consecuencia de la deficiencia de autoabastecimiento energético con solo bagazo. A continuación se presenta una tabla resumen de los índices de diagnóstico energético para el proceso de fabricación de panela al procesar los jugos de caña extraídos por el método Disolución-Extrusión.

Tabla 4.47. Índices de diagnóstico del proceso de fabricación de panela con los jugos extraídos por el método de Disolución-Extrusión.

INDICE	VALOR	DESCRIPCIÓN
$I_1 = \frac{\dot{m}_{panela}}{\dot{m}_{caña}}$	$I_1 = 0.1$	Rendimiento del cultivo
$I_2 = \left(\frac{\dot{m}_{b.s.producido} - \dot{m}_{b.s.consumido}}{\dot{m}_{b.s.producido}} \right) * 100\%$	$I_2 = -86\%$	Autoabastecimiento de combustible
$I_3 = \eta = \frac{\dot{E}_{a.e.} + \dot{E}_{ch} + \dot{E}_p}{\dot{m}_{b.e.}PCI + \dot{m}_{a.b.}h_f}$	$I_3 = 59\%$	Eficiencia energética de la hornilla
$I_4 = \frac{\dot{E}_{gases}}{\dot{E}_{suministrada}}$	$I_4 = 37.5\%$	Porcentaje de la energía que se pierde en los gases de combustión.
$I_5 = \frac{\dot{E}_{pérdidas}}{\dot{E}_{suministrada}}$	$I_5 = 58.6\%$	Porcentaje de la energía que se pierde por las paredes de la hornilla
$I_6 = \frac{\dot{m}_{b.s.consumido}}{\dot{m}_p}$	$I_5 = 3.7$	Rendimiento global (energético y productivo)

4.6. Estudio de factibilidad del método disolución-extrusión para la etapa de extracción de los azúcares de la caña comparado con el método tradicional de mazas.

En este análisis se ha centrado especial atención a la etapa de extracción del jugo de caña en el proceso de producción de panela, con el fin de evaluar las potencialidades del método de disolución-extrusión en la extracción de jugo de caña en comparación con el método de molienda tradicional y su influencia en el desempeño energético de producción de panela, por medio de tres evaluaciones generales.

La primera evaluación consiste en determinar el efecto que tienen las características del jugo de caña extraído por el método disolución-extrusión, en el desempeño energético del trapiche. Esta evaluación se realizó comparando los resultados obtenidos en el balance de masas y energía cuando fueron procesados tanto los jugos extraídos por molienda tradicional como los extraídos con el método disolución-extrusión.

Inicialmente el hecho de aumentar el porcentaje de extracción de jugo de caña por el método de disolución-extrusión, de 50% a 76.16%, representa un aumento de 26.16% en todos los aspectos del proceso de producción empezando por la capacidad insuficiente de las pailas de la hornilla para procesar el jugo, un aumento del combustible utilizado para suministrar la energía necesaria del proceso y el aumento del tiempo de la producción.

En cuanto a la capacidad de la hornilla cuando fue implementado el método de disolución-extrusión, se utilizó la cuarta parte de la caña procesada normalmente ($200 \text{ Kg}/4=50\text{Kg}$), debido a que el agua de imbibición y el jugo extraído alcanzan la capacidad máxima de las pailas de la hornilla. Sin embargo este aspecto genera un desbalance en el desabastecimiento del bagazo como combustible en el proceso de combustión de la hornilla, requiriéndose de combustible extra para garantizar el procesamiento de los jugos.

Por otro lado, al analizar y comparar el balance energético del trapiche cuando se procesan los jugos extraídos por molienda tradicional (tabla 4.19) y los jugos extraídos por el método disolución-extrusión (tabla 4.45) se observa que de la energía suministrada a la hornilla se

aprovecha el 46.4 %, se pierden por gases en la chimenea el 7.7% y es desperdiciada el 45.9 %. Estos valores son esperados en los trapiches artesanales tradicionales, en los cuales se obtienen diferentes gradientes de temperaturas a lo largo de las pailas, demandando de una constante supervisión e impidiendo del suministro regulado del calor a las pailas para el óptimo procesamiento de los jugos de caña.

Del mismo modo, se compararon los cálculos de las necesidades energéticas requeridas para procesar los jugos de caña extraídos por molienda tradicional (tabla 4.21) y los extraídos por el método disolución-extrusión (tabla 4.46). Aquí se observó que la densidad inicial de los jugos extraídos tiene una gran influencia en los calores requeridos para el procesamiento de la panela.

Particularmente los jugos extraídos por el método disolución-extrusión, presentaron una densidad inicial de 7 °Brix, que en realidad representa la cantidad de sólidos solubles en el jugo mezclado con el agua de imbibición. Este último aspecto significó un incremento sustancial de las demandas de energía para el calentamiento de 140720 KJ, para la concentración de 203200 KJ y para el punteo de los jugos de 6809.5 KJ, es decir un total de 350730 KJ de energía necesaria para el procesamiento del jugo mezclado, en comparación con las calculadas para el procesamiento de los jugos extraídos por molienda tradicional de 19.33 °Brix, que fueron de 133010 KJ para el calentamiento, de 163340 KJ para la concentración y de 11966 KJ para el punteo, para un total de 308320 KJ.

Una característica importante en el proceso productivo que presuntamente se deba a las propiedades del jugo mezclado obtenido por la extracción mediante el método disolución-extrusión, es que se requiere menos energía en la etapa de punteo (6809.5 KJ) en comparación con los 11966 KJ requeridos para puntear los jugos extraídos por molienda tradicional, viabilizando un ahorro energético en la etapa de punteo donde normalmente son requeridas las mayores inversiones de energía.

La segunda evaluación consiste en la comparación de los índices de diagnóstico energético de la hornilla cuando se procesan los jugos extraídos por molienda tradicional (tabla 4.22) y los extraídos por el método disolución-extrusión (tabla 4.47). Donde I_1 es el índice de

rendimiento del cultivo, I2 es el índice de autoabastecimiento de combustible del proceso, I3 es la eficiencia de la hornilla, I4 es el porcentaje de energía perdida en los gases de combustión, I5 es el porcentaje de energía perdida por las paredes de la hornilla y I6 es el rendimiento energético-productivo.

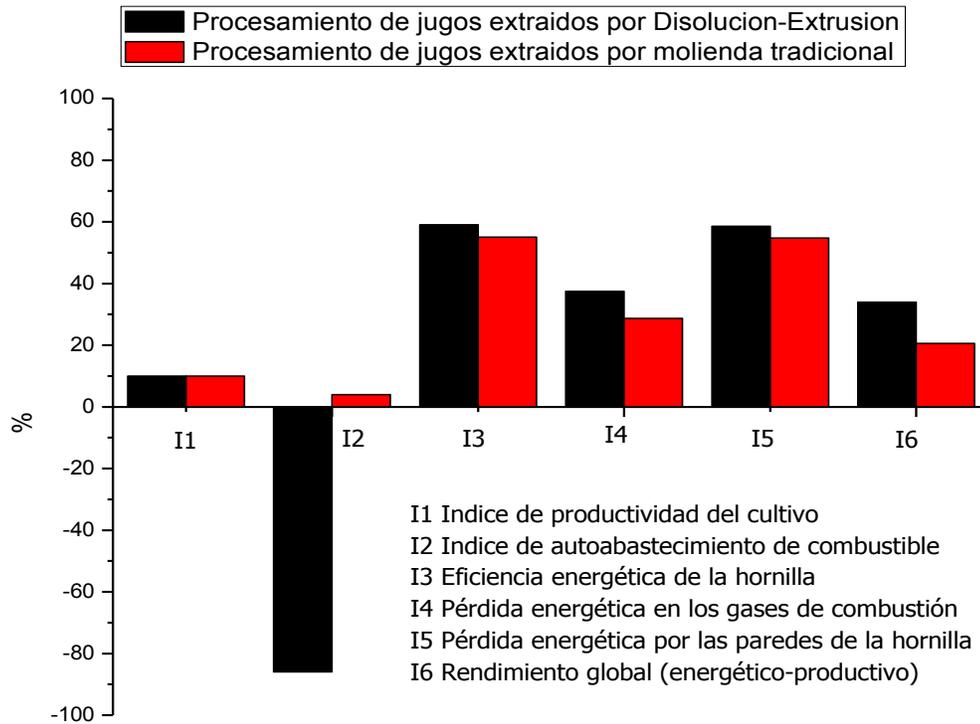


Figura 4.31. Diagrama comparativo de índices energéticos del proceso de producción de panela

Los índices I1 son iguales para ambos casos pues se parte de la caña cultivada en el mismo lugar, ya los índices I2 tiene que ver con el método de extracción del jugo, donde se observa un valor negativo de autoabastecimiento de combustible dentro del proceso de extracción de disolución-extrusión, ya que al procesar menor cantidad de caña debido al aumento en la extracción de jugo mezclado, no se genera la cantidad necesaria de bagazo para satisfacer las necesidades energéticas del proceso.

Por otro lado, los índices I4 e I5 muestran como la energía suministrada es utilizada y distribuida en la hornilla, y particularmente se observa una eficiencia de la hornilla levemente mayor en el uso de la energía suministrada cuando se procesan los jugos

extraídos por el método disolución-extrusión, aunque se generen pérdidas por las paredes que están relacionadas a la construcción propiamente dicha de la hornilla.

Finalmente, se observa un mejor rendimiento global cuando se procesan los jugos extraídos por molienda tradicional, sin embargo este hecho está solo está profundamente relacionado con el pobre abastecimiento de bagazo cuando se implementa el proceso de extracción de los jugos de la caña mediante el método de disolución-extrusión.

La tercera evaluación consiste en estudiar la factibilidad de implementar el método disolución – extrusión en la etapa de extracción de los azúcares de la caña en la elaboración de panela, en el grupo de producción La Laja, del Municipio de La Vega (Cauca). A continuación se relacionan algunos aspectos importantes de discusión.

La construcción artesanal de la hornilla utilizada en el grupo de producción La Laja no permite alcanzar ni mantener las altas temperaturas requeridas para llevar a cabo el proceso de extracción de los azúcares de la caña por el método disolución – extrusión.

La hornilla utilizada actualmente no tiene la capacidad para llevar a cabo el proceso de elaboración de panela implementando el método de disolución-extrusión con la misma cantidad Kg caña procesada por un día molienda, ya que al agregar el agua de imbibición, la cantidad de agua-miel aumenta considerablemente sobrepasando la capacidad de las pailas.

Al incrementar en un 200% el agua de imbibición sobre la cual los vástagos de caña reposan para llevar a cabo la lixiviación, se incrementa el tiempo en la etapa de evaporización dentro del proceso, lo que implica un gasto mayor de combustible y el posible favorecimiento de la inversión de los azúcares del jugo en fructosa y glucosa, afectando la calidad de la panela en su color y dureza.

El tiempo empleado para la extracción del jugo de la caña utilizando molienda tradicional cuando se procesan 200 Kg de caña fue de 30 min y el tiempo empleado para la extracción

del jugo mezclado procesando 50 Kg de caña implementando el método de disolución extrusión es de 1 hora y 21 minutos.

Pensando en la adquisición de un difusor de caña como alternativa global para la extracción de los azúcares de la caña, la producción de caña en la zona de estudio no suministraría la cantidad de caña necesaria para abastecimiento del difusor.

Los resultados energéticos del trapiche panelero muestran deficiencias energéticas en las etapas de procesamiento de los jugos y en el funcionamiento de la hornilla.

En la literatura no se encuentra específicamente información sobre el método disolución-extrusión, pero lo que sí es cierto es que los principios físicos y biológicos de esta técnica es la misma utilizada en los difusores de los grandes ingenios azucareros, el trabajo de grado tiene como objetivo estudiar la posibilidad de optimizar la etapa de extracción de jugo de caña panelera ya existente utilizando el método disolución-extrusión.

Después de realizar el análisis del gasto energético de los dos métodos empleados para la extracción de los azúcares de la caña, el tradicional de mazas y el método disolución extrusión en el trapiche panelero de la vereda La Laja (Vega - Cauca), se llega a la conclusión, que implementar este método tal como lo proponía el Ingeniero Agroindustrial Montaña no da solución a la problemática por la que están pasando los campesinos que se dedican a la producción de panela pues no se garantiza la inocuidad del proceso y aunque se encuentra una mejora sobre la cantidad de panela producida por caña procesada el gasto energético es superior al empleado por el método tradicional de mazas.

Bajo condiciones de pequeña escala es difícil e inoperable este método, por lo que se sugiere la adquisición de un nuevo molino que cumpla con los requerimientos de sanidad, sin necesidad de cambiar la técnica de extracción. La producción de panela en la Vereda La Laja (Vega-Cauca) se realiza a pequeña escala, las familias paneleras de la región no alcanzan a tener una hectárea completa del cultivo de caña panelera y el proceso de producción de panela se hace en gran parte de manera artesanal.

En la actualidad el Ministerio de la Protección Social a través de la resolución 000779 de 2006 establece el reglamento técnico sobre los requisitos sanitarios que se deben cumplir en la producción y comercialización de la panela para consumo humano, esto implica llevar a cabo un procedimiento que garantice la inocuidad del proceso y tenga como resultado un producto sano y de buena calidad, bajo las condiciones actuales de producción campesina de panela no se lograría cumplir con todos los requerimientos que exige la ley, por lo que los socios de la Fundación Despertar han venido trabajando en el proyecto comunitario de la construcción de una planta procesadora de panela, el Ingeniero Montaña les presentó una propuesta en la que se incluye aplicar una nueva técnica conocida como método disolución-extrusión en la etapa de extracción de los azúcares de la caña.

Este trabajo de grado en modalidad de pasantía, se encargó de hacer un estudio de factibilidad del nuevo método comparando las características del jugo extraído y su influencia en los resultados del gasto energético calculados para el método de molienda tradicional de extracción y el de la nueva técnica, los resultados de este estudio arrojaron que bajo condiciones de pequeña escala es imposible la implementación de este método por cuestiones de costo, logística y capacidad de producción de caña.

El objetivo por parte de la Fundación Despertar es mantener la producción de panela en manos de los campesinos pero para ello necesita garantizar ciertas condiciones de buenas prácticas de manufactura, en las que pueda demostrar la inocuidad del proceso, por lo que fruto de este estudio se les presenta una propuesta que considera la posibilidad de mantener el proceso de producción de panela tal como se lleva a cabo pero adquiriendo un nuevo molino de mejor capacidad y con un sistema de lubricación aislado para evitar contaminar el jugo, este cambio permitiría obtener un jugo libre de aceites y grasas; en el anexo F se presenta el desarrollo de la propuesta de la planta procesadora de panela.

4.7. Caracterización de la panela producida en el trapiche

4.7.1. Panela obtenida mediante el procesamiento de los jugos obtenidos por el método tradicional.

A continuación se presentaran los resultados del análisis organoléptico de las tres muestras de panela, dos muestras obtenidas por el método tradicional en diferente presentación (en cuadro y polvo)

4.7.1.1. Análisis organoléptico de la panela

Panela obtenida por el método tradicional presentación en cuadro

Textura: La panela en cuadro presenta una textura dura sin ser difícil de fragmentar, no es melcochuda ni blanda.

Color: está en la gama de las tonalidades cafés, sin llegar al anaranjado fuerte ni al chocolate oscuro

Sabor: Dulce, libre de sabores fermentados, ácidos metálicos o ajenos a la naturaleza del producto.

Apariencia: Limpia, translúcida, no turbia ni opaca y libre de residuos sólidos como bagazo o insectos.

Integridad: está completa no presenta faltantes, desportilladuras ni fragmentos. tiene una buena presentación.

En presentación líquida: El producto en solución, es translúcido, sin grasa en la superficie y con algunos sedimentos en el fondo.

Panela obtenida por el método tradicional presentación en polvo

Textura: la presentación es en polvo, con una textura suave, no es melcochuda ni blanda.

Color: está en la gama de las tonalidades cafés, sin llegar al anaranjado fuerte ni al chocolate oscuro

Sabor: Dulce, libre de sabores fermentados, ácidos metálicos o ajenos a la naturaleza del producto.

Apariencia: Limpia, no turbia ni opaca y libre de residuos sólidos como bagazo o insectos.

Integridad: Tiene una buena presentación.

En presentación líquida: El producto en solución, es translúcido, sin grasa en la superficie y con algunos sedimentos en el fondo.

4.7.2. Panela obtenida mediante el procesamiento de los jugos obtenidos por el método Disolución-Extrusión.

A continuación se presentaran los resultados del análisis organoléptico de una muestra en polvo de la panela obtenida por el Método de Disolución – Extrusión.

4.7.2.1. Análisis organoléptico de la panela

Panela obtenida por el método Disolución – Extrusión presentación en polvo

Textura: la presentación es en polvo, el tamaño del grano es más grande que la obtenida por el método tradicional, no es melcochuda ni blanda.

Color: está en la gama de las tonalidades cafés, pero más oscura que la obtenida por el Método tradicional, sin llegar al anaranjado fuerte ni al chocolate oscuro

Sabor: Es dulce, pero endulza menos que la panela el polvo obtenida por el método tradicional, libre de sabores fermentados, ácidos metálicos o ajenos a la naturaleza del producto.

Apariencia: Limpia, no turbia ni opaca y libre de residuos sólidos como bagazo o insectos.

Integridad: Tiene una buena presentación.

En presentación líquida: El producto en solución, es opaco, sin grasa en la superficie y con algunos sedimentos en el fondo.

4.7.3. Análisis Físicoquímico de la Panela

Para determinar la factibilidad del Método disolución-extrusión fue indispensable realizar análisis físicoquímicos (Ver anexo H) a tres muestras de panela, dos de ellas obtenidas por el método tradicional de mazas en sus dos presentaciones en cuadro y pulverizada, y una muestra obtenida a través del método disolución-extrusión en presentación de polvo, para determinar a través de los resultados de estos análisis, si el método utilizado afecta las propiedades físicoquímicas de la panela, los análisis se realizaron en el laboratorio de Unidad de Análisis Industriales de la Universidad del Cauca.

La muestra en bloque de panela obtenida por el método tradicional de mazas tiene los porcentajes más altos de azúcares totales, y humedad, el porcentaje de materia extraña es el menor reportado de las tres muestras y los porcentajes de azúcares reductores son muy cercanos al porcentaje de la muestra en polvo obtenida por el método tradicional. El porcentaje de humedad de las dos muestras en presentación polvo tienen el menor grado de humedad haciéndolas alimentos más duraderos, la muestra obtenida por el método disolución-extrusión presenta un mayor porcentaje de azúcares reductores. De los resultados se puede ver que las tres muestras cumplen con los rangos de los requisitos establecidos en la resolución 000779 de 2006 capítulo III Artículo 5.

Los resultados de los análisis dieron positivo a colorantes y blanqueadores en las tres muestras, esto resulto extraño ya que el proceso que se llevó a cabo para la toma de las muestras estuvo libre de colorantes y blanqueadores; una posible explicación para el positivo en colorantes, es que los mucilagos utilizados en la etapa de clarificación estén adicionando colorante a los jugos de caña y estos se manifiestan en el producto final, se propone recurrir a un proceso cromatográfico o a reacciones individuales de caracterización para determinar en sí que colorante o sustancia son las responsables de que la prueba se mantenga como positiva. En cuanto a los blanqueadores el proceso de producción de panela es pasado por diferentes fuentes de contaminación que pueden alterar la muestra, es necesario realizar otro análisis que identifique la existencia o no de sulfitos.

CAPITULO V

5. CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados, su análisis y las discusiones anteriormente presentadas, a continuación se exponen las conclusiones acerca del estudio de factibilidad de implementación del método de disolución-extrusión como método de extracción de los jugos de caña y su influencia en el proceso de producción de la panela.

- En la propuesta presentada por el ingeniero agroindustrial Francisco Montaña se hace mención a la implementación de dos herramientas para llevar a cabo el proceso de disolución-extrusión entre estas unas cuchillas cortadoras que permitan la reducción de tamaño de la caña. Experimentalmente se comprobó que no es suficiente convertir la caña en pequeños pedazos, es necesario desfibrarla para exponer la mayor cantidad de área de contacto y así lograr extraer los jugos contenidos en la caña.
- Al implementar el método Disolución – Extrusión para la extracción de los azúcares de la caña panelera se hace más difícil la limpieza de los jugos, pues al estar los jugos en medio de tanta agua y al adicionar el cadillo en la etapa de limpieza no se aglutinan las impurezas y no se forma la cachaza, por lo que la panela obtenida por este método tiene una coloración mucho más oscura que la obtenida por el método tradicional y esto tiene incidencia sobre la presentación y calidad del producto final.
- Para llevar a cabo el método disolución-extrusión de una manera óptima, se hace necesario la implementación de un difusor de caña, normalmente usado en los ingenios azucareros, con el fin de tener mayor control sobre las variables de interés (presión, agua de imbibición, temperatura) garantizando la buena extracción de los azúcares contenidos en la caña. Por lo tanto se determina que la implementación del Método Disolución – Extrusión a pequeña escala propuesto por el Ingeniero Montaña no da los resultados esperados ya que se necesita de la implementación de varios elementos entre

ellos el desfibrador de caña, el difusor y los molinos de pistón que encarecerían el proceso de producción de panela.

- La técnica utilizada para la extracción de los azúcares de la caña panelera por el método de moliendo tradicional requiere un gasto de energía menor que la utilizada por el método disolución – extrusión, ya que este último requiere el gasto energético inicial para la transformación de la caña en fibra, un segundo gasto energético relacionado con el calentamiento del agua en el cual se realiza el proceso de disolución, y un tercer gasto energético en la utilización de una energía adicional para mover los molinos de embolo que finalizan el proceso de extracción del agua-miel contenida en los vástagos de caña.
- En la segunda etapa de evaporización y concentración del agua-miel del proceso de producción de panela el nuevo método requiere mucho más combustible (bagazo) y requiere más tiempo que el método tradicional puesto que el agua a evaporar hasta llegar al punto de miel es mucho mayor.
- El porcentaje de obtención de panela por Kg de caña procesada por el método tradicional es del 22% y el porcentaje de panela obtenida por el método disolución – extrusión es del 27% aunque hay una mejora en la producción de panela por Kg de caña procesada del 5% esto no compensa los gastos energéticos y de tiempo invertido en el proceso de producción de panela.
- Comparando los dos métodos de extracción estudiados, dentro del proceso de fabricación de la panela, el método de Disolución-Extrusión parece tener un buen desempeño en cuanto a eficiencia de extracción, pues se obtuvo un porcentaje de extracción de alrededor del 76% frente al 50 % que se obtiene en la molienda tradicional. Sin embargo las características de este jugo extraído, tales como la cantidad de agua adicional, perturbaron el desempeño energético de la hornilla presentando índices negativos de autoabastecimiento y de pérdidas energéticas grandes (65-82%) como respuesta tanto a un mayor tiempo de concentración y evaporación requerido en las mieles como al diseño de la planta física de la hornilla.

- La inversión de capital para pequeños productores de panela para la posible implementación del método disolución – extrusión es bastante excesivo, ya que se requiere una instalación compleja y robusta que solo pueden subsidiarse los grandes ingenios azucareros que si pueden costear difusores para la etapa de extracción de los azúcares contenidos en la caña. Lastimosamente no existe en la actualidad la forma de simular el proceso que hace el difusor a pequeña escala, además el acondicionamiento de la planta procesadora de panela al implementar un difusor incrementaría los costos y se haría necesario nuevos espacios que hacen incosteable el proyecto.
- Uno de los aspectos a que apuntaba el proyecto era garantizar la inocuidad del proceso es decir la fabricación de panela libre de impurezas y residuos nocivos para la salud del ser humano, tal como lo exige la resolución 000779 de 2006. El método disolución-extrusión a pequeña escala no resuelve este problema ya que durante el proceso de extracción es necesario manipular la materia prima por todos los estados de transformación y así se aumenta notablemente la relación con las fuentes de contaminación.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Corporación colombiana de investigación agropecuaria. Artículos técnicos sobre el cultivo de la caña y la elaboración de panela. Santander: CORPOICA, 2000. 22 p.
- [2] Manual de caña de azúcar para la producción de panela. Palmira: Fedepanela, 2000. 24p
- [3] Henao, Carlos. La panela, una agroindustria que se consolida. Bogotá: Fondo Nacional de Fomento Panelero Ministerio de Agricultura, 1999. 30 p.
- [4] Rodríguez Gonzalo Borray. La Agroindustria Rural De La Panela En Colombia
- [5] La panela. [Artículo en internet]. <http://www.quassab.com/Es/LaPanela/Default.asp>
[consulta: 15 marzo de 2010]
- [6] La producción panelera en el Cauca. Diario del Sur. <http://www.diariodelsur.com.co/>
[consulta: Febrero 3 de 2008]
- [7] Faucohnier, R. Técnicas Agrícolas y Producciones Tropicales pp 365
- [8] Guillermo Osorio Cadavid. BPM Y BPA en la producción de caña y panela
- [9] Hugot, E. Manual para ingenios azucareros. 5 ed. México: Continental, 1974. 803 p.
- [10] Instituto colombiano agropecuario (ICA). Curso de caña y elaboración de la panela. Santander: CIMPA, 1986. p. 156.
- [11] Francisco Montaña, Construcción del trapiche panelero comunitario en el corregimiento de Santa Juana. Fundación Despertar. Cauca.
- [12] Velásquez, .H.I, Chejne F. Agudelo, A. F. Diagnóstico energético de los procesos productivos de la panela en colombia. Rev.Fac.Nal.Agr.Medellín, Dic 2004, vol.57, no.2, p.2453-2466. ISSN 0304-2847.
- [13] A Textbook of Quantitative Inorganic Analysis: Arthur I Vogel, 1961
- [14] Wark K. & Richards D. (2001). Termodinámica. 6 Ed. Madrid: McGraw-Hill

- [15] ChejneJanna, Farid. Termodinámica básica. Medellín: Universidad Pontificia Bolivariana. 2000. 333 p.
- [16] Rodriguez Pedro, Manual de cálculo rápido para la industria azucarera, ministerio de economía y planificación. Inspección estatal energética. Cuba. 1997
- [17] Martinez. I Termodinámica básica y aplicada. Ed. Dossat.España.1992
- [18] Velásquez Fernando. Desarrollo de modelos para análisis de consmos energéticos en el proceso de producción panelera. Revista Scientia Et Technica N.9. Abril 1999. Pp 65-75.
- [19] Yunus A. Çengel, Michael A. Boles Termodinámica. Editorial Mc-Graw Hill.
- [20] Binnie, C., Kimber, M. and Smethurst, G. 2002. Basic water treatment. Thomas Telford Publishing, London England
- [21] Castellanos. L, Análisis de la eficiencia en los molinos. Trabajo de Diploma. UCLV. 1996.
- [22] González M.J. "Mejoras de equipos de procesos de la industria azucarera en Cuba." Rev. memorias de la XX Conferencia anual del A.T.A.C. – 1946
- [23] González Maíz, J. C. "Problemas de la planta moledora". Memorias del IV Congreso Nacional de Químicos Azucareros.
- [24] Heiko Kuhn. New Developments to Increase the Efficiency and to Decrease the Energy Consumption in Sugar cane processing. 47 Congreso de la ATAC. La Habana. Cuba. 1997.
- [25] Hernández L. "Evaluación de la eficiencia en el Tandem". Manual de operaciones de la Planta Moledora". MINAZ. La Habana. 1996
- [26] Herrera, E. "Potencia consumida en los Molinos". IX Encuentro de Jefes de Maquinarias. Matanzas. 1995

- [27] Jais P. Ch. Difusión en el Brasil. Revista Tecnología/Pesquisa. Brasil. Sep.-Oct. 94.
- [28] Maxwell, F. Modern Milling of Sugar Cane. Norman Rodger. London. 1932
- [29] MINAZ. "Tablas de aberturas máximas y mínimas del molino". Villa Clara 1975.
- [30] Perry, J. D. " Influencia de la preparación y la alimentación de la caña en la extracción del jugo. Proceeding XXVIII Congress Q.S.S.C.T. Australia. 1981
- [31] Rein P. W. Una reseña sobre la difusión de caña en ingenios de Sudáfrica. Revista International Sugar Journal. Nov. 99.
- [32] Tromp L.A. "Machinery and equipment of the cane sugar factory" Editorial Normand Rodger. London England 1936.
- [33] Interfacing sensors to the IBM PC, W. J. Topkins and J. G. Webster, Prentice Hall, N.J. (1988).
- [34] C. Rauwendal, Understanding Extrusion, Hanser Publishers, Munich, 1998.
- [35] Baloh, Tone; Wittwer, Enrique. Energy manual for sugar factories. vol. 2, 1995

ANEXO A

A1. TABLA DE PROPIEDADES TERMODINAMICAS DEL AGUA SATURADA

Tabla A.1. Propiedades termodinámicas del agua saturada

Presión (bar)	Temperatura de saturación (°C)	Entalpia especifica de vaporización (KJ/Kg)
0.04	28.96	2432.9
0.06	36.16	2415.9
0.08	41.51	2403.1
0.1	45.81	2392.8
0.2	60.06	2358.3
0.3	69.1	2336.1
0.4	75.87	2319.2
0.5	81.33	2305.4
0.6	85.94	2293.6
0.7	89.95	2283.3
0.8	93.5	2274.1
0.9	96.71	2265.7
1	99.63	2258
1.5	111.4	2226.5
2	120.2	2201.9

A2. TABLA DE PROPIEDADES TERMODINAMICAS DEL AGUA

Tabla A.2. Propiedades termodinámicas del agua

Estado	C_p KJ / Kg K
1 atm. 273 K	4.217
1 atm. 280 K	4.198
1 atm. 300 K	4.179
1 atm. 320 K	4.180
1 atm. 340 K	4.188
1 atm. 360 K	4.203
1 atm. 373 K	4.218

Tablas extraídas del texto de termodinámica de Cengel & Boles

A3. PROPIEDADES TERMODINAMICAS DE UNA MEZCLA AGUA-MIEL

Tabla A.3. Propiedades termodinámicas de una mezcla agua-miel con pureza entre el 86 y 94.6 %

Grados Brix	Δh_t	ΔT	$\Delta h_t / \Delta T$	C_{pm}
0	292	70	4.17	N.D
10	278	70	3.97	2.0763
20	266	70	3.80	2.2720
30	250	70	3.57	2.1468
40	238	70	3.40	2.2270
50	224	70	3.20	2.2180
60	210	70	3.00	2.2120
70	195	70	2.79	2.1873
80	186	70	2.66	2.2759
90	149	70	2.13	1.9004
100	101	70	1.44	1.4429
			Promedio	2.0959

Tabla extraída del manual de energía para fábricas de azúcar (Tone Baloh y Enrique Wittwer 1995)

ANEXO B

CÁLCULO DE PRESIÓN ATMOSFÉRICA DE LA ZONA

$$P = P_0 e^{-(Zgm/RT_m)}$$

P = Presión a una altitud de Z metros (en Hpa)

P_0 = Presión en superficie (en Hpa)

Z = altitud del nivel de presión P (en metros)

gm = peso de una columna de aire estándar = 9.80617 Kg m/s²

R = Constante de los gases = 287.04 J K⁻¹

T_m = Temperatura media entre los niveles de presión P y P_0 . Con $T_m = (T_0 + T_0 - (\beta * Z))/2$

=> $T_m = T_0 - \beta * Z/2$.

Donde, T_0 es la temperatura en superficie (en °K), β es el gradiente térmico vertical y Z es la altitud. Si tenemos en cuenta una atmósfera estándar

$P_0 = 1013,25$ Hpa = 101325 pa = 1 bar = 1 atm

$T_0 = 15^\circ\text{C} = 288^\circ\text{K}$ y $\beta = 0.65^\circ\text{C}/100$ m

Reemplazando en la fórmula original, la fórmula para una atmósfera estándar es:

$$P = \frac{101325}{e^{[Z/(8430.15 - Z * 0.09514)]}} \text{ pa}$$

Tabla B.1 - Presión en función de la altitud (en Hpa)

Altitud (m)	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900
0	1013	1001	990	978	967	955	944	933	921	901
1000	899	888	877	867	856	845	835	825	816	805
2000	795	785	776	766	757	747	738	729	719	710
3000	701	693	684	676	667	658	650	641	633	624
4000	616	608	600	593	585	577	570	562	555	547
5000	540	533	526	519	512	505	498	492	485	479

ANEXO C

PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA HACER EL CÁLCULO CALORES DE CALENTAMIENTO

```
%% PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA HACER EL CÁLCULO CALORES DE CALENTAMIENTO
clc

disp('PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA HACER EL CÁLCULO CALORES DE
CALENTAMIENTO');
disp('Introducir las tablas de propiedades termodinámicas del agua ');
P=input('Presión atmosférica local, en bar P=');
T=input('Temperatura atmosférica del lugar T(Kelvin)=');
TS=input('Introduzca la temperatura de saturación del agua Ts(Kelvin)=');
deltaT=input('Introduzca la diferencia de temperatura entre TS e T
deltaT(Kelvin)=');%deltaT=347.9;
HS=input('Introduzca la Entalpia de vaporización del agua (KJ/KgK) hs=');
%HS=2269.1 ; % KJ/Kg
b1=input('Densidad inicial del jugo b1(°Brix)=');

if (b1>=10) & (b1<=20) cpm=1.8806+(0.01957*b1);
else cpm=input('Calor especifico de la miel, de acuerdo al anexo A.3
Cpm=');% de la tabla de propiedades de una mezcla agua y miel
end

b4=input('Densidad del jugo a la entrada del concentrador(65-70°Brix)
b4(°Brix)='); %b4= 65 a 70 °Brix condiciones óptimas.
b5=input('Densidad final (85-94°Brix) b5(°Brix)=');% (entre 88-94 °Brix)
(no azúcar invertidos o reducidos)

%BRIX DE LOS JUGOS EN CADA ETAPA
b1=b1/100;
b4=b4/100;
b5=b5/100;
b2=b1;
b3=b2;

%CALCULO DE LAS MASAS DE AGUA EVAPORADAS
ac=100-(100*(b3/b4));%masa de agua evaporada en la concentración
ap=(100-ac)-((100-ac)*(b4/b5));%masa de agua evaporada en el punteo

% PORCENTAJE TOTAL DE AGUA EVAPORADA %
ae=ac+ap;

%CALCULO DE LOS CALORES TEORICOS (no se contemplan perdidas ni calor
necesario para mantener la temperatura)
Ma=100*(1-b1); % masa de agua
Mm=100*b1; % masa de miel
qa=(100*(1-b1)*4.198*(deltaT)); % Calor para el agua
qm=(100*b1*cpm*(deltaT)); % Calor para la miel
q=(100*(1-b1)*4.198*(deltaT)) + (100*b1*cpm*(deltaT)); %calor para el
calentamiento
```

```

q1=ac*HS; % calor para la concentración
q2=ap*HS; % calor para el punteo

%CALOR TOTAL NECESARIO EN EL PROCESO DE PRODUCCION

qt= q+q1+q2;

%CALCULO ESTIMADO DE PANELA PRODUCIDA POR CADA 100 Kg DE JUGO

Panela=100-(ac+ap);

% PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

disp('CALCULOS')
disp('MASA DE AGUA (Kg)');disp(Ma);
disp('MASA DE MIEL (Kg)');disp(Mm);
disp('DENSIDAD DEL JUGO (Brix)');disp(b1*100);
disp('DENSIDAD DEL JUGO A LA ENTRADA AL CONCENTRADOR
(Brix)');disp(b4*100);
disp('DENSIDAD FINAL (Brix)');disp(b5*100);
disp('CALOR ESPECIFICO DE LA MIEL');disp(cpm);

disp('CALOR NECESARIO EN EL CALENTAMIENTO DEL AGUA (KJ)');disp(qa);
disp('CALOR NECESARIO EN EL CALENTAMIENTO DE LA MIEL (KJ)');disp(qm);
disp('CALOR NECESARIO EN EL CALENTAMIENTO (KJ)');disp(q);

disp('CALOR NECESARIO EN LA CONCENTRACIÓN (KJ)');disp(q1);
disp('PORCENTAJE DE AGUA EVAPORADA EN LA CONCENTRACION (%)');disp(ac);

disp('CALOR NECESARIO EN EL PUNTEO (KJ)');disp(q2);
disp('PORCENTAJE DE AGUA EVAPORADA EN EL PUNTEO (%)');disp(ap);

disp('CALOR TOTAL NECESARIO EN EL PROCESO DE PRODUCCIÓN (KJ)');disp(qt);

disp('PORCENTAJE TOTAL DE AGUA EVAPORADA (%)');disp(ae);

disp('PANELA PRODUCIDA POR CADA 100 Kg DE JUGO PROCESADO
(Kg)');disp(Panela);

disp('Los valores de las variables utilizadas fueron:')
disp('PRESION (bar)');disp(P);
disp('TEMPERATURA (K)');disp(T);
disp('ENTALPIA DE VAPORIZACION DEL AGUA (KJ/KgK)');disp(HS);
disp('TEMPERATURA DE SATURACION DEL AGUA (K)');disp(TS);
disp('CALOR ESPECIFICO DEL JUGO (KJ/KgK)');disp(cpm);

```

ANEXO D

DESCRIPCION DEL MÉTODO DE ANALISIS ORSAT DE LOS GASES DE COMBUSTION

El análisis de gases Orsat, se trata de un análisis volumétrico restringido a la medición de volúmenes de gases de combustión. Un volumen medido de una mezcla de gases, a presión y temperatura conocidas, se somete a la acción de reactivos químicos selectivos absorbentes para separar en procesos sucesivos los distintos constituyentes, cuyas cantidades se determinan al ser eliminados de la mezcla, por la disminución de volumen.

Durante un análisis una muestra es pasada a través de líquidos absorbentes que remueven componentes específicos. El volumen del gas es medido antes y después de la absorción. La disminución en el volumen del gas representa la cantidad del componente que estuvo presente.

ANEXO E

ENCUESTA GRUPO DE PRODUCCIÓN DE PANELA LA LAJA

Entrevista No _____ Hombre Mujer Edad

Lugar de nacimiento _____

Etnia: Indígena Afrocolombiano Mestizo Blanco Otro

Propietario Arrendatario Mancomún sin propiedad reconocida

No posee tierra

¿Que produce? Caña Café Plátano Yuca Maíz Frijol

¿Qué variedad de Caña cultiva? _____ Semilla _____

Cultiva esta variedad Por: Productividad rendimiento facilidad

tradición

El predio que trabaja: Comprado herencia Mejora

Que productos obtienen de la caña: Panela en cuadros Miel Panela

Pulverizada

Su trapiche es: Propio Alquilado Familiar Comunitario

Tipo de trapiche: A gasolina Eléctrico Tracción animal

¿Qué tipo de proceso de fabricación de panela se utiliza?

¿Quién le enseñó este proceso? Por tradición Mis padres Capacitación

Otro _____

¿Cuál es el tiempo de Molienda? _____

¿Cuál es el tiempo de Cocción? _____

¿Cuál es el tiempo de engaberado y secado? _____

¿Cuál es el tiempo de granulado? _____

Destino del producto: Consumo propio Mercado Regional

Mercado Nacional Exportación

¿Cuáles son las mayores dificultades en el proceso de fabricación de panela?

Como ha pensado en solucionarlas:

Como le gustaría que fuera su trapiche teniendo en cuenta la legislación actual:

Como le gustaría que fueran cada una de las etapas del proceso productivo:

ANEXO F

INFORME TECNICO DEL DISEÑO Y COSTOS DEL MONTAJE DE UNA PLANTA PROCESADORA DE PANELA COMUNITARIA EN LA VEREDA LALAJA MUNICIPIO DE LA VEGA (CAUCA)

En el Departamento del Cauca, la producción de panela es una de las principales fuentes de ingresos para un gran número de familias campesinas, actividad en la cual participa toda la familia a lo largo del proceso. La producción de panela en el departamento del Cauca, se realiza de forma artesanal, en ramadas (estructuras en guadua o madera, techadas con paja u otro tipo de cubierta de bajo costo) donde se ubica un trapiche de hierro de 2 o 3 mazas, el cual es movido por tracción animal (caballos o bueyes) o motores de combustión. Una vez se obtiene el guarapo (jugo fresco de la caña) se procede a la cocción (proceso de evaporación de agua y concentración de los azúcares), hasta obtener la panela, la cual es moldeada en marcos de madera o pulverizada y enfriada al ambiente. Para la comercialización de la panela, se empaca en cinchos de plátano (corteza seca de la mata de plátano), bolsas plásticas o costal y se transporta al mercado local.

Para el gobierno nacional, el proceso de producción de panela que se realiza actualmente, no garantiza las condiciones de salubridad que requiere un proceso de producción de alimentos y más de alimentos de consumo masivo como lo es la panela, por lo cual el Ministerio de la Protección Social expidió la resolución número 000779 de 2006, en la cual se establece el reglamento técnico de emergencia a través del cual se señalan los requisitos sanitarios que se deben cumplir en la producción y comercialización de la panela para el consumo humano. De acuerdo a esta nueva normatividad, se hace necesario que los productores de panela, mejoren las condiciones técnicas y sanitarias en el proceso de elaboración y comercialización de panela, cumpliendo con la resolución y con el decreto 3075, el cual reglamenta la producción y comercialización de alimentos a nivel nacional. En este documento se propone un diseño para la construcción de una pequeña planta procesadora de panela, con capacidad de procesar 40 toneladas de caña panelera que se producirían en el área de influencia del grupo de producción La Laja del Municipio de la

Vega (Cauca). El diseño que se presenta a continuación busca cumplir con los requerimientos técnicos y normativos, para el procesamiento de panela y en especial para procesar la producción de caña de panela de las asociaciones vinculadas al Proceso Campesino y Popular del Municipio de La Vega Cauca.

De acuerdo a lo anterior, se diseña una estructura en ladrillo y concreto con cubierta de teja termo-acústica, bajo las dimensiones que recomienda la norma 3075 del Ministerio de la Protección Social y se recomienda la adquisición del Molino **R-12 ACR** que con su diseño mejorado permite cumplir con la resolución 2546 de 2004, en lo concerniente a la inocuidad del proceso y a los requisitos sanitarios para la elaboración de panela ya que cuenta con un sistema aislado de lubricación y tiene la capacidad de molienda por hora que se requiere. De acuerdo a la información suministrada por el Proceso Campesino y Popular del Municipio de la Vega (Cauca), la posible producción de caña panelera en la zona de influencia del centro de procesamiento de panela es la siguiente:

Tabla 1. Datos de la Producción de caña panelera en la zona

Producción estimada x ciclo de siembra (18meses)				Mas Proyección
	Hectáreas cultivo de caña	Producción x Hectárea (ton)	Producción total (Ton)	20% (Ton)
ASPROVEGA	20,00	48,00	960,00	1.152,00
TOTAL ASPROS	20,00	48,00	960,00	1.152,00
PRODUCTORES LOCALES	20,00	48,00	960,00	1.152,00
TOTAL PROYECCION PLANTA	40,00	96,00	1.920,00	2.304,00

El diseño se basa en una planta que puede atender el procesamiento de 2.304 toneladas de panela cada 18 meses (tiempo que dura el ciclo de producción de la caña panelera). Este valor incluye un 20 % de holgura, proyectando posibles aumentos en la producción. Con este dato inicial, se pueden hacer las siguientes proyecciones:

Tabla 2. Proyección de caña procesada por mes, día y hora.

PROYECCIÓN DE PROCESAMIENTO DE CAÑA POR: MES - DÍA - HORA					
PROCESO	CANTIDAD CAÑA PROCESADA (Ton)			PERDIDAS DE PROCESO	PRODUCTO FINAL (Ton/mes)
	Mes	Día	Hora		
Lavado	128,00	5,33	1,78	0,5%	127,36
Trozado	127,36	5,31	1,77	2%	124,81
Molienda	124,81	5,20	1,73	37%	78,63
Evaporación	78,63	3,28	1,09	71%	22,80
Moldeado	22,80	0,95	0,47	0,2%	22,75

Pasando la proyección total de caña panelera que entra al proceso en meses, días y horas, y aplicando un promedio en el porcentaje de pérdidas en cada proceso al que es sometida la caña hasta llegar a panela, se obtiene que cada mes se pudiera obtener 22,75 toneladas de panela. Para el cálculo se tomó el mes hábil, 24 días y el día hábil de 8 horas entre las cuales solo 3 horas se disponen a la molienda.

Tabla 3. Materiales para la construcción del área de almacenamiento y lavado

Área (1) Almacenamiento y Lavado	
Materia prima mes (Ton)	128,00
Caña por semana (Ton)	32,00
Caña por dos días (Ton)	16,00
Volumen por Tonelada (m ³)	2,00
Área por tonelada (m ²)	1,00
Toneladas por arrumes (Ton/m ²)	3,00
Numero de arrumes	6,00
Área por arrume (m ²)	20,00
Total área arrumes (m ²)	20,00
Área calles entre arrumes (m ²)	35,00
Total área, almacén y lavado	55,00

Para diseñar las diferentes áreas de la planta procesadora de panela, se espera que el área de almacenamiento de materia prima (caña panelera), pueda almacenar caña suficiente para dos días y las demás áreas con capacidad para procesar y almacenar lo necesario para un día de producción, lo cual nos da los siguientes datos:

El área necesaria para mantener almacenadas 16 toneladas de caña panelera es de 55 metros cuadrados, lo cual puede tener las siguientes dimensiones y costos:

Tabla 4. Área de Almacenamiento y Lavado

Medidas Posibles (m)	7 x 8 x 3.5
Costo de Construcción (\$/m ²)	410.000,00
Costo área Almacenamiento (\$)	22.550.000,00

El metro cuadrado de construcción se calcula en \$ 410.000, puesto que el diseño planteado para esta área, elimina gran parte de los muros y deja solo la estructura.

Tabla 5. Dimensiones de las áreas de la planta procesadora de panela

Áreas de proceso	(m ²)	Dimensiones
Área de molienda (m ²)	24,50	7 x 3,5 x 3 (m)
Área evaporación y moldeado (m ²)	36,00	6 x 6 x 3 (m)
Área de empaque (m ²)	10,50	3 x 3,5 x 3 (m)
Área de producto terminado (m ²)	10,50	3 x 3,5 x 3 (m)
Área almacén de empaques (m ²)	2,50	1 x 2,5 x 3 (m)
Área oficina (m ²)	6,25	2,5 x 2,5 x 3 (m)
Área baño (m ²)	2,50	2,5 x 1 x 3 (m)
Subtotal áreas (m ²)		
92,75		

Las otras áreas necesarias para la planta de procesamiento de panela, suman 92,75 metros cuadrados. Cada una con unas dimensiones específicas. Como estas áreas requieren terminados interiores paredes completas y otros accesorios se calcula que los costos por metro cuadrado serían de \$520.000.

Tabla 6. Costos áreas de la planta procesadora

Subtotal áreas (m ²)	92,75
Costo de construcción (\$/m ²)	520.000,00
Costo Subtotal áreas (\$)	48.230.000,00

Tabla 7. Costo total de la construcción de la planta procesadora de panela

Costo área almacenamiento (\$)	22.550.000,00
Costo Subtotal áreas (\$)	48.230.000,00
COSTO TOTAL CONSTRUCCIÓN (\$)	70.780.000,00

Este valor no incluye las obras de arte y la obra civil necesaria para el sistema de recolección y manejo de las aguas servidas, el cual es necesario para la certificación de la planta procesadora de panela comunitaria.

Molienda: Es la parte en la cual se lleva la caña desde el almacén hasta el molino para realizar el proceso de extracción de jugos, estos molinos pueden ser accionados por un motor de combustión o eléctrico. Para la selección del molino se tuvo en cuenta la cantidad de materia prima a producir por día la cual es 5,33 toneladas, está dividida en un turno de 3 horas da como resultado 1.78 toneladas por hora. Por tal razón se selecciono un trapiche con capacidad de 1.8 toneladas por hora.



Figura 3. Molino R-12 ACR

Tabla 8. Características Técnicas del Molino R-12 ACR

Cap. Kg. Caña / hora	Fuerza Motriz Necesaria			Polea Molino	Reducción Velocidad
	Diesel	Eléctrico	Gasolina		
1800	16 a 25	15	-	50 cm	51 a 1

Dimensiones de Mazas (pulgadas)						Embarque		
Superior		Quebradora		Exprimidora		Peso Neto	Peso Bruto	Volumen
Largo	Diam	Largo	Diam	Largo	Diam	Kg.	Kg	Mt ³
12''	10''	12''	9''	12''	10''	2000	2200	2.50

Dimensiones de Ejes (Milímetros)					
Superior		Quebradora		Exprimidora	
Largo	Diam	Largo	Diam	Largo	Diam
830	90	720	90	720	90

Maquinaria y Equipos

En el proceso de fabricación de la panela: en bloque, con sus diferentes presentaciones y pulverizada; requiere la utilización de varias máquinas, equipos y accesorios que permitan la transformación de la caña y demás materias primas, en los productos terminados que cumplan con las condiciones sanitarias, de calidad y de presentación necesarias. En el proceso de selección de los equipos y la maquinaria se debe tener en cuenta diversos factores que se mencionan a continuación:

- Ambientales
- Funcionales
- El tipo de producto a realizar
- Condiciones de trabajo

Para la selección de maquinaria se buscarán equipos existentes en el medio que cumplan con las especificaciones requeridas al producto. Los precios mostrados en este capítulo fueron extraídos de cotizaciones entregadas por **Metalagro** y realizadas para este proyecto (ver anexo G de maquinaria y equipos).

Tabla 9. Especificaciones de los Equipos para la planta procesadora de panela

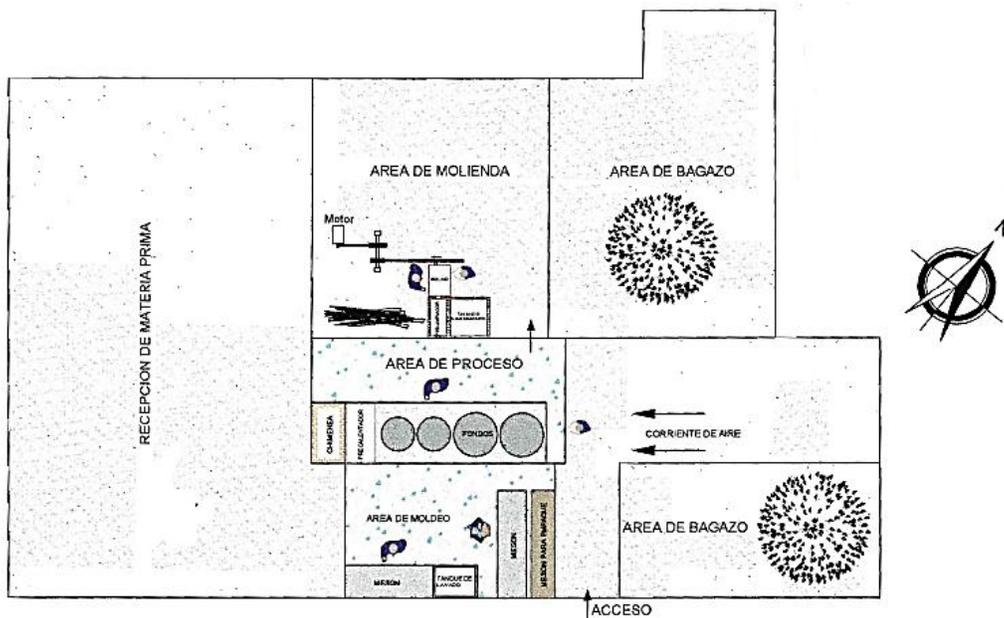
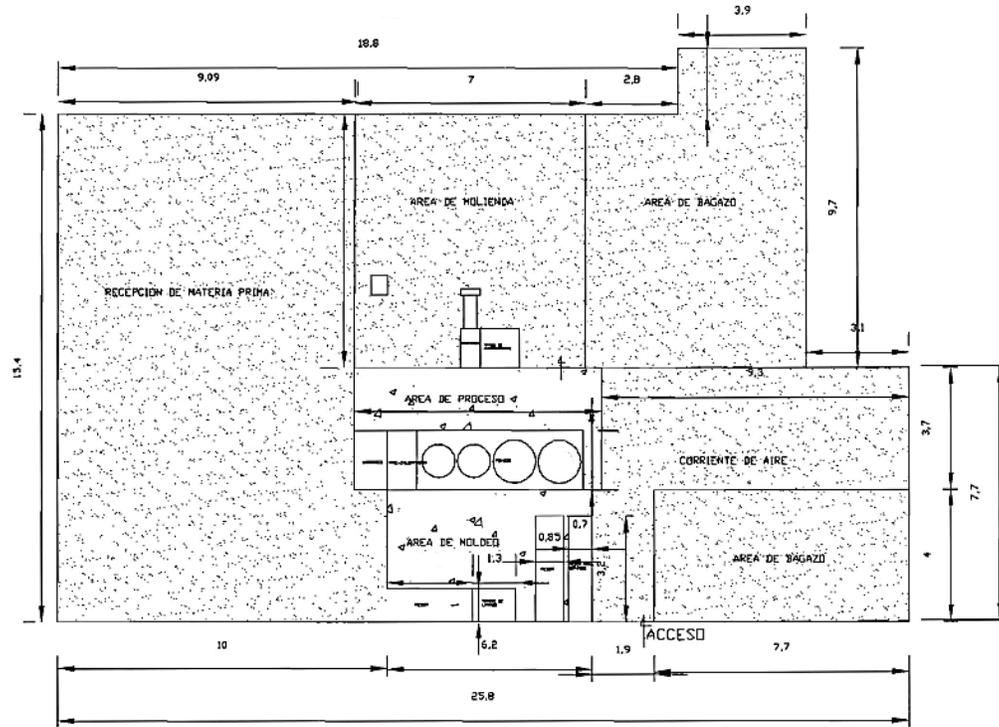
COTIZACION DE LA MAQUINARIA Y EQUIPOS			
ITEM	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
Filtro para colocar la cachaza: longitud de 150 cm, ancho de 40 cm, alto 40 cm con separación central, descarga con llave de paso de ¾" colocada a 3 cm de la base, fabricado en acero inoxidable 304, calibre 18 marco del mismo material con pestañas horizontales y verticales de 3 cm.	1	\$ 892.500	\$ 892.500
Tanque para preparación de mucilago: largo 80 cm, ancho 60 cm, alto 50 cm, con orificios de 0.5 cm para colocar la baba, acero inoxidable 304 calibre 18	1	\$ 1.260.000	\$ 1.260.000
Mesones en acero inoxidable largo 3 m, ancho 1.05 m, alto 0.80 m, calibre 16 con soportes y patas en acero	2	\$ 2.625.000	\$ 5.250.000
Molino R-12 ACR autolubricado, totalmente en acero SAE 1045 mazas en hierro gris, caja reductora 6 piñones helicoidales estructura mono-bloque capacidad 1500-1800 Kilos caña hora	1	\$ 31.035.000	\$ 31.035.000
Motor eléctrico Siemens de 20 HP a 1800 RPM trifásico 220-440 V	1	\$ 3.143.000	\$ 3.143.000
Parrilla para hornilla de 100 x 15	2	\$ 164.000	\$ 328.000
Accesorios conducción jugo	GLOBAL	\$ 1.260.000	\$ 1.260.000
Mano de obra hornilla tipo CIMPA para 150 Kilos/hora panela e instalación trapiche y motor	1	\$ 4.725.000	\$ 4.725.000
Paila redonda: diámetro 115 cm y profundidad 38 cm, en acero inoxidable 304, de espesor 5/16" falca: altura 65-67 cm, abrir en ángulo de 22° falca en acero inoxidable calibre 18	3	\$ 4.200.000	\$ 12.600.000
Pre-limpiador 1 y 2 en acero inoxidable 304 calibre 18	2	\$ 892.500	\$ 1.785.000
Utensilios	global	\$ 940.000	\$ 940.000
Gaveras en madera redondo 500 gramos	10	\$ 17.000	\$ 170.000
Gavera en madera cuadrada 500 gramos	10	\$ 42.000	\$ 420.000
Selladora de bolsas	1	\$ 600.000	\$ 600.000
estibas	40	\$ 21.000	\$ 840.000,00
Botiquín de salud	1	\$ 40.000	\$ 40.000
Extintores	2	\$ 150.000	\$ 300.000
Bateas acero inoxidable	2	\$ 650.000	\$ 650.000
TOTAL			\$ 66.238.500

Con la infraestructura, la maquinaria y equipos, el costo total del proyecto es de:

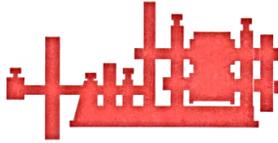
Tabla 9. Costos Total del Proyecto

COSTO AREA DE ALMACENAMIENTO DE CAÑA.	22.550.000,00
TOTAL CONSTRUCCION OTRAS AREAS	48.230.000,00
COSTO TOTAL MAQUINARIA Y EQUIPOS	66.238.500,00
TOTAL PROYECTO	137.018.500

PLANO PLANTA PROCESADORA DE PANELA VEREDA LA LAJA



ANEXO G



NIT. 860.507.847 - 9

METAL AGRO LTDA

TRAPICHES HORIZONTALES *El Panelero*

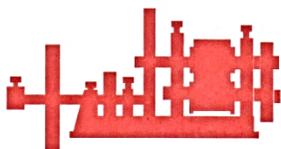
Bogotá D.C. Julio 6 de 2.011

Señores
FUNDACION DESPERTAR
 Atn. Oscar Gerardo salzar Muñoz
 Email: jhosu18@hotmail.com
 Tel: 3148425834
 Transv. 1AE No. 9A-60
 Popayán - Cauca

ASUNTO: PROPUESTA ECONOMICA EQUIPOS ACERO INOXIDABLE R12ACR

DESCRIPCION	CANTIDAD TOTAL	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
PAILA REDONDA: DIÁMETRO 82 CM Y PROFUNDIDAD 30 CM. EN ACERO INOXIDABLE 304, DE 5/16" DE ESPESOR, FALCA ALTURA 50 CM, ABRIR EN ÁNGULO DE 22°. MATERIAL DE FALCA EN ACERO INOXIDABLE CALIBRE 18.	1	\$ 4.095.000	\$ 4.095.000
PAILA REDONDA: DIÁMETRO 105 CM Y PROFUNDIDAD 38 CM. EN ACERO INOXIDABLE 304, DE ESPESOR 5/16" FALCA: ALTURA 65 - 67 CM, ABRIR EN ÁNGULO DE 22°. MATERIAL DE FALCA EN ACERO INOXIDABLE CALIBRE 18.	1	\$ 4.095.000	\$ 4.095.000
PAILA REDONDA: DIÁMETRO 115 CM Y PROFUNDIDAD 38 CM. EN ACERO INOXIDABLE 304, DE ESPESOR 5/16" FALCA: ALTURA 65 - 67 CM, ABRIR EN ÁNGULO DE 22°. MATERIAL DE FALCA EN ACERO INOXIDABLE CALIBRE 18.	1	\$ 4.200.000	\$ 4.200.000
PAILA SEMICILÍNDRICA: DIÁMETRO CILINDRO 90 CM LONGITUD DEL CILINDRO 122 CM REDONDEADA EN LAS PUNTAS EN FORMA DE CANOA. LONGITUD TOTAL DE LA PAILA 152 CM ACERO INOXIDABLE 304, CALIBRE 1/8, FALCA ALTURA 65 - 67 CM, ABRIR EN ÁNGULO DE 22°. MATERIAL DE FALCA EN ACERO INOXIDABLE CALIBRE 18.	1	\$ 3.990.000	\$ 3.990.000
PAILA PIROTUBULAR: CARCASA ANCHO 122 CM, LONGITUD 244 CM, ACERO INOXIDABLE 304, CALIBRE 14, ESPEJOS DE ESPESOR 3/16", TUBOS DE 61 CM DEL PERÍMETRO (SN PLANOS) CANTIDAD 5 ACERO INOX CALIBRE 1/8" FALCA: ACERO INOXIDABLE DE 304 CALIBRE 16 SOLDADA A LA CARCASA Y ESTRUCTURA PARA EVITAR DEFORMACIONES. MARCO: DESARROLLO EN LA MISMA FALCA CON PESTAÑA HORIZONTAL DE 5 CM Y PESTAÑA VERTICAL DE 3 CM, LA FALCA CAE AL FRENTE VERTICALMENTE A LA BASE Y ABRE 22° HACIA LOS LADOS. DEBE LLEVAR UNA DESCARGA PARA ENROSCAR TUBOS DE 2 1/2" DE DIÁMETRO. LA POSICION DE ACUERDO A LOS PLANOS DE LA HORNILLA.	1	\$ 8.400.000	\$ 8.400.000
PAILA ALETEADA: BASE ANCHO 1.20 CM, LONGITUD 1.52 ACERO INOX 304 CALIBRE 3/16 ALETAS ALTURAS 10 CMS. ESPESOR CALIBRE 1/4 SOLDADURA DE PENETRACION CONTINUACION POR AMBOS LADOS DE LA ALETA. MATERIAL ALETA HR. CANTIDAD 19. LA BASE DEBE TENER UNA ALETA EXTERNA Y HORIZONTAL PARA SOSTENER LA PAILA SOBRE EL MURO DE LADRILLO. FALCA ACERO INOXIDABLE CALIBRE 14 SOLDADA A LA BASE Y ESTRUCTURADA PARA EVITAR DEFORMACIONES. MARCO DESARROLLADO EN LA MISMA FALCA CON PESTAÑA HORIZONTAL DE 5 CM Y PESTAÑA VERTICAL DE 3 CM. LA FALCA CAE EN EL FRENTE VERTICALMENTE A LA BASE Y ABRE 22° HACIA LOS LADOS. DEBE LLEVAR UNA DESCARGA PARA ENROSCAR TUBOS DE 2.5" DE DIÁMETRO. LA POSICION LA DEFINIRAN LOS PLANOS DE LA HORNILLA.	1	\$ 6.825.000	\$ 6.825.000
PAILA MELOTERA: BASE ANCHO 90 CM, LONGITUD 80 CM, MATERIAL ACERO INOX CALIBRE 1/4" FALCA; ALTURA 45 CM EN EL FRENTE CAE VERTICALMENTE A LA BASE Y ABRE 22° HACIA LOS LADOS; ACERO INOX 304 CALIBRE 3/16/15 ALETAS HR EN CALIBRE 1/4 DE 1 CM DE ESPESOR/LA BASE DEBE TENER UNA ALETA EXTERNA PARA SOPORTARLA SOBRE EL MURO.	1	\$ 1.050.000	\$ 1.050.000
PRELIMPIADOR 1 Y 2 EN ACERO INOX 304 CALIBRE 18	2	\$ 892.500	\$ 1.785.000

Carrera 22 No. 13 - 13 • PBX: 201 72 84 • 201 5658 • Tel.: 360 04 74 • Fax: 237 52 43
 Bogotá, D.C. - Colombia • E-mail: contactenos@metalagro.com.co • www.metalagro.com.co



NIT. 860.507.847 - 9

METAL AGRO LTDA

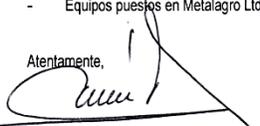
TRAPICHES HORIZONTALES *El Panelero*

FILTRO PARA COLOCAR LA CACHAZA: LONGITUD DE 150 CM, ANCHO DE 40 CM, ALTO 40 CM CON SEPARACIÓN CENTRAL, DESCARGA CON LLAVE DE PASO DE 3/4" COLOCADA A 3 CM DE LA BASE, FABRICADO EN ACERO INOXIDABLE 304, CALIBRE 18 MARCO DEL MISMO MATERIAL CON PESTAÑAS HORIZONTALES Y VERTICALES DE 3CM.	1	\$ 892.500	\$ 892.500
BATEA FORMA TRAPEZOIDAL: BASE SUPERIOR DE LONGITUD 1.50/0.90 DE ANCHO Y 0.20 CM DE ALTURA.ACERO INOX 304 CALIBRE 18	3	\$ 945.000	\$ 2.835.000
TANQUE PARA PREPARACION DE MUSCILAGO : LARGO 80 CM /ANCHO 60 CMS/ALTO 50 CMS/ CON ORIFICIOS DE 0.5 CM PARA COLAR LA BABA.ACERO INOXIDABLE 304 CALIBRE 18.MARCO EN EL MISMO MATERIAL CON PESTAÑA HORIZONTAL Y VERTICAL DE 3 CM.	1	\$ 1.260.000	\$ 1.260.000
TANQUE PARA LAVAR LAS GAVERAS LARGO 1.50CMS ANCHO 90 CMS,ALTURA 40 CMS,CON DESCARGA INFERIOR PARA TUBO DE 1"ACERO INOX 304 CALIBRE 18 MARCO EN EL MISMO MATERIAL,CON PESTAÑA HORIZONAL Y VERTICAL DE 3 CMS	1	\$ 1.155.000	\$ 1.155.000
MESONES EN ACERO INOXIDABLE LARGO 3 MTS ANCHO 1.05 MTS ALTO 0.80MTRS CALIBRE 16 CON SOPORTES Y PATAS EN ACERO	3	\$ 2.625.000	\$ 7.875.000
TRAPICHE O MOLINO R12ACR AUTOLUBRICADO TOTALMENTE EN ACERO SAE 1045 MAZAS EN HIERRO GRIS CAJA REDUCTORA 6 PIÑONES HELICOIDALES ESTRUCTURA MONOBLOQUE CAPACIDAD 1500-1800 KILOS CAÑA HORA.	1	\$ 31.035.000	\$ 31.035.000
MOTOR ELECTRICO MARCA SIEMENS DE 20 HP A 1800 R.P.M. TRIFÁSICO 220-440 V.	1	\$ 3.143.000	\$ 3.143.000
ARRANCADOR ESTRELLA TRIANGULO	1	\$ 2.692.000	\$ 2.692.000
PARRILLA PARA HORNILLA DE 120X15	4	\$ 232.000	\$ 928.000
PARRILLA PARA HORNILLA DE 100X15	3	\$ 164.000	\$ 492.000
ACCESORIOS CONDUCCION JUGO	GLOBAL	\$ 1.260.000	\$ 1.260.000
PASAFUEGOS EN ANGULO	GLOBAL	\$ 1.050.000	\$ 1.050.000
MANO DE OBRA HORNILLA TIPO CIMPA CUNDINAMARQUES PARA 150 KILOS/HR PANELA E INSTALACION TRAPICHE Y MOTOR	1	\$ 4.725.000	\$ 4.725.000
SUB TOTAL			\$ 93.782.500
IVA 16%			\$ 15.005.200
TOTAL			\$ 108.787.700

CONDICIONES GENERALES:

- Validez de la oferta 30 días
- La Mano de OBRA NO CALIFICADA NO SE ENCUENTRA EN LA SIGUIENTE COTIZACION
- LA alimentación y hospedaje NO se encuentra contemplada en la siguiente cotización
- Tiempo de entrega a Convenir
- Certificado de Calidad y Garantía del Material
- Forma de Pago: 50% a la orden de compra y 50% a la entrega de los equipos
- Equipos puestos en Metalagro Ltda Bogota cra 22 No.13-13

Atentamente,


JORGE E. PINZON DELGADO
 Coordinador Comercial-Metalagro Ltda.

Carrera 22 No. 13 - 13 • PBX: 201 72 84 • 201 5658 • Tel.: 360 04 74 • Fax: 237 52 43
 Bogotá, D.C. - Colombia • E-mail: contactenos@metalagro.com.co • www.metalagro.com.co

ANEXO H



UNIVERSIDAD DEL CAUCA
 Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y de la Educación
 Departamento de Química
Unidad de Análisis Industriales

8.5.8 – UAI 031

Popayán, 02 de agosto de 2011

Señora:
 Jhovana Suarez Valdés
 L. C.

INFORME DE RESULTADOS

Muestra 1 - 2:	Molido claro (a) – Molido oscuro (b)			
Fecha de Recepción:	24 de junio de 2011			
Fecha de Análisis:	24 de junio al 4 de julio de 2011			
Análisis Realizado:	Fisicoquímico panelas			
	Molido claro (a)		Molido oscuro (b)	
ANÁLISIS	Base Seca	Base Húmeda	Base Seca	Base Húmeda
Humedad	0.000	2.58 ± 0.001	0.000	2.92 ± 0,004
Materia Seca	100	97.42 ± 0.001	100	97.08 ± 0,004
Minerales (cenizas)	0.951 ± 0,04	0.926 ± 0.04	0.882 ± 0,064	0.856 ± 0,064
Proteína (F=6.25)	0.337 ± 0,012	0.339 ± 0,012	0.484 ± 0.055	0.486 ± 0,055
Azúcares reductores(glucosa)	3.69 ± 0.063	3.60 ± 0.063	1.93 ± 0.19	1.89 ± 0.19
Azúcares totales(sacarosa)	60.72 ± 1.58	59.15 ± 1.58	68.36 ± 1.65	66.60 ± 1.65
Blanqueadores	positivo		positivo	
Colorantes	positivo		positivo	
Materia extraña	0.658 ± 0.022	0.641 ± 0.022	0.564 ± 0.032	0.549 ± 0.032

Muestra 3 :	Bloque (c)	
Fecha de Recepción:	24 de junio de 2011	
Fecha de Análisis:	24 de junio al 4 de julio de 2011	
Análisis Realizado:	Fisicoquímico panelas	
	Bloque (c)	
ANÁLISIS	Base Seca	Base Húmeda
Humedad	0.000	9.56 ± 0,013
Materia Seca	100	90.44 ± 0.013
Minerales	0.834 ± 0,075	0.754 ± 0,075
Proteína (F=6.25)	0.250 ± 0.0096	0.234 ± 0,0096
Azúcares reductores(glucosa)	3.07 ± 0.44	2.99 ± 0.44
Azúcares totales(sacarosa)	71.05 ± 0.43	69.22 ± 0.43
Blanqueadores	positivo	
Colorantes	positivo	
Materia extraña	0.169 ± 0.03	0.165 ± 0.03

Nota: Los resultados corresponden a las muestras recibidas en el laboratorio y traídas por la señora JHOVANA SUAREZ VALDÉS. La Unidad de Análisis Industriales no se hace responsable de la extrapolación de estos datos.