

DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO  
Y OPERACIÓN DE CÁMARAS DE COMBUSTIÓN TIPO  
WARD-CIMPA Y PLANA-CIMPA EN HORNILLAS  
PANELERAS

**JUAN PABLO SOLER VILLAMIZAR  
FRANCO HERNÁN GÓMEZ TOVAR.**



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA

2004

DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO  
Y OPERACIÓN DE CÁMARAS DE COMBUSTIÓN TIPO  
WARD-CIMPA Y PLANA-CIMPA EN HORNILLAS  
PANELERAS

**JUAN PABLO SOLER VILLAMIZAR  
FRANCO HERNÁN GÓMEZ TOVAR**

**Trabajo de Grado para optar al título de  
Ingeniero Químico**

**Director:  
EDGAR FERNANDO CASTILLO MONROY.  
Ingeniero Químico, Ph. D.**

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA  
2004

## DEDICATORIA

A **Nubia Esther**, mi mamá, por su gran ejemplo de vida.

**Franco.**

A mi madre **Ana Josefa**, por su corazón noble y fraterno.  
A mi padre **Marco Antonio**, por su paciencia y confianza.  
A mis hermanos del cielo y de la tierra.

**Juan Pablo.**

## AGRADECIMIENTOS

A, **Edgar Fernando Castillo**, Ingeniero Químico, director del proyecto, por su apoyo y colaboración.

A, **Hugo García**, Ingeniero Agrícola, codirector del proyecto, por su apoyo y colaboración.

A, **Esperanza Prada.**, Ingeniera Química, coordinadora del Proyecto CINTEL-Hornillas.

A, **Fredy Cortes**, Ingeniera Mecánico, consultor del proyecto CINTEL-Hornillas.

A, **Dorian Prato**, Ingeniero Químico, consultor del proyecto CINTEL-Hornillas.

A, **Rosember Hernández**, estudiante Ing. Química, por su colaboración en el desarrollo del proyecto.

A, **Don Vidal**, por su importante labor en la experimentación del proyecto.

A, todo el equipo de trabajo del proyecto CINTEL-Hornillas.

A, los funcionarios, trabajadores y empleados de CORPOICA-CIMPA.

A, los y las investigadoras y trabajadoras del CEIAM.

A, nuestras familias por su apoyo incondicional a pesar de la larga duración del proyecto.

## CONTENIDO

	Pág.
<b>INTRODUCCIÓN.</b>	1
<b>1. COMBUSTIÓN EN HORNILLAS PANELERAS- FUNDAMENTOS TEÓRICOS.</b>	3
1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO ACTUAL.	3
1.2. PROCESO DE COMBUSTIÓN DE MATERIALES SÓLIDOS.	5
1.2.1. Descripción básica.	5
1.2.2. Fases de la combustión.	6
1.2.2.1. Secado de combustibles sólidos.	7
1.2.2.2. Devolatilización de combustibles sólidos.	7
1.2.2.3. Combustión del carbón.	8
1.2.3. Sistemas de combustión.	9
1.2.3.1. Lecho fluidizado.	9
1.2.3.2. Lecho en suspensión.	9
1.2.3.3. Lecho fijo.	10
1.3. HORNILLA PANELERA.	13
1.3.1. Área de generación de calor.	13
1.3.1.1. Cámara de combustión Plana-CIMPA.	14
1.3.1.2. Cámara de combustión Ward-CIMPA.	15
1.3.1.3. Diseño de cámaras de combustión.	16
1.3.2. Área de transferencia de calor.	17
1.3.3. Propiedades y características de combustibles biomásicos.	18
1.3.3.1. Propiedades físicas de la biomasa.	18
1.3.3.2. Propiedades químicas de la biomasa.	20

	<b>Pág.</b>
1.3.3.3. Propiedades termodinámicas y de transporte de los biocombustibles.	21
1.3.4. Temperaturas asociadas con la combustión de biomasa.	25
1.3.5. Proceso de combustión en una hornilla panelera.	26
1.3.5.1. Balance de masa de la combustión sin exceso de aire.	26
1.3.5.2. Balances de masa elementales.	27
1.3.5.3. Balance de energía.	28
1.3.5.4. Eficiencia energética de la cámara de combustión.	28
1.3.5.5. Balance de exergía.	29
<b>2. DESARROLLO EXPERIMENTAL.</b>	<b>30</b>
2.1 DESARROLLO EXPERIMENTAL PARA LA DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE DISEÑO Y OPERACIÓN DE LAS CÁMARAS DE COMBUSTIÓN.	30
2.1.1. Variables de evaluación.	30
2.1.2. Diagrama de flujo de las experimentaciones.	31
2.1.3. Descripción de los montajes y equipos.	33
2.1.3.1. Parámetros de las hornillas prototipo con cámara Ward-CIMPA y Plana-CIMPA.	35
2.1.3.2. Área libre de Parrilla.	36
2.1.3.3. Determinación de humedad, pesada y alimentación de bagazo.	36
2.1.3.4. Control de nivel de agua evaporada.	37
2.1.3.5. Enfriamiento, filtración y análisis de gases de combustión.	38
2.1.3.6. Sistema de variación de velocidad del ventilador.	39
2.1.3.7. Registro de datos de temperatura.	41
2.1.4. Descripción de las pruebas experimentales.	42

	<b>Pág.</b>
2.2. DESARROLLO EXPERIMENTAL PARA EL ESTUDIO DE LA PRODUCCIÓN DE ESCORIA EN CÁMARAS DE COMBUSTIÓN.	43
2.2.1. Variables de evaluación.	43
2.2.2. Diagrama de flujo de las experimentaciones.	44
2.2.3. Descripción de los montajes experimentales y equipos.	44
2.2.4. Descripción de las pruebas experimentales.	45
2.3. DESARROLLO EXPERIMENTAL PARA EL CONTROL DE TEMPERATURA EN LA CÁMARA WARD-CIMPA.	45
2.3.1. Variables de evaluación.	45
2.3.2. Diagrama de flujo de las experimentaciones.	45
2.3.3. Descripción del montaje experimental.	46
2.3.3. Descripción de la corrida experimental.	47
<b>3. MODELO MATEMÁTICO UTILIZADO PARA LA ESTIMACIÓN DE LA COMPOSICIÓN DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN.</b>	<b>48</b>
3.1. MODELAMIENTO DE LAS REACCIONES DE COMBUSTIÓN DE BAGAZO HÚMEDO.	48
3.2. MODELAMIENTO DE LAS REACCIONES DE COMBUSTIÓN DE BAGAZO SECO.	53
<b>4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.</b>	<b>56</b>
4.1. PERFILES DE EXCESO DE AIRE ( $\lambda$ ) Vs. PRODUCCIÓN DE (CO) POR Kg DE BAGAZO ALIMENTADO.	56
4.2. PERFIL DE TEMPERATURAS.	61
4.2.1. Perfiles de temperatura en cámara Ward-CIMPA.	61
4.2.2. Perfiles de temperatura en la Cámara Plana-CIMPA.	63
4.2.3. Análisis de perfiles de temperatura.	64

	<b>Pág.</b>
4.2.3.1. Determinación del tiempo de ciclo.	67
4.3. FRENTE DE COMBUSTIÓN.	72
4.4. EFICIENCIA ENERGÉTICA DE CÁMARAS DE COMBUSTIÓN.	74
4.4.1. Balance de energía.	74
4.5. EFICIENCIA EXERGÉTICA DE CÁMARAS DE COMBUSTIÓN.	81
4.6. FACTORES DE EMISIÓN DE GASES DE COMBUSTIÓN.	84
4.7. FORMACIÓN DE ESCORIA EN LAS PARRILLA DE LAS CÁMARAS DE COMBUSTIÓN.	90
4.7.1. Caudales de aire primario y secundario en la cámara Ward-CIMPA.	90
4.7.2. Peso de la escoria con respecto al régimen del ventilador, flujo y humedad del bagazo.	92
4.8. CONTROL DE TEMPERATURA EN LA CÁMARA WARD-CIMPA.	93
<b>5. DISEÑO DE CÁMARAS DE COMBUSTIÓN.</b>	<b>96</b>
5.1. HUMEDAD DEL BAGAZO.	96
5.2. FLUJO DE BAGAZO POR HORA DE OPERACIÓN.	96
5.3. VOLUMEN DE LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN.	98
5.4. CASO DE DISEÑO.	99
5.4.1. Diseño de una cámara con tecnología CIMPA.	100
5.4.2. Diseño de cámara propuesto.	102
5.4.3. Comparación de resultados.	106
<b>CONCLUSIONES.</b>	<b>108</b>
<b>RECOMENDACIONES.</b>	<b>110</b>

	<b>Pág.</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.</b>	<b>111</b>
<b>ANEXOS.</b>	<b>120</b>

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Reacciones químicas en los sistemas de combustión.	12
Tabla 2. Principales componentes químicos del bagazo de caña.	20
Tabla 3. Composición química del bagazo.	21
Tabla 4. Composición del bagazo.	21
Tabla 5. Valor calorífico superior del bagazo seco.	22
Tabla 6. Parámetros de diseño de la hornilla con cámara de combustión Ward-CIMPA.	35
Tabla 7. Parámetros de diseño de la hornilla con cámara de combustión Plana-CIMPA.	35
Tabla 8. Revoluciones del motor de acuerdo a la posición de la polea.	40
Tabla 9. Coeficientes del calor específico ( $C_p$ ).	50
Tabla 10. Constantes de equilibrio teóricas y calculadas.	51
Tabla 11. Tiempos de ciclo para la cámara Ward-CIMPA.	67
Tabla 12. Tiempos de ciclo para la cámara Plana-CIMPA.	70
Tabla 13. Potencias, eficiencias, composición de gases, flujo: 90 Kg/h, humedad: 24.68%.	76
Tabla 14. Potencias, eficiencias, composición de gases, flujo 110 Kg/h, humedad 32%.	77
Tabla 15. Potencias, eficiencias, composición de gases, flujo 70 Kg/h, humedad 21%.	77
Tabla 16. Potencias, eficiencias, composición de gases, flujo 220 Kg/h, humedad 25.71%.	78
Tabla 17. Potencias, eficiencias, composición de gases, flujo 180 Kg/h, humedad 27%.	79
Tabla 18. Nuevos factores de parrilla experimentales.	80

	<b>Pág.</b>
Tabla 19. Eficiencia exergética para las distintas configuraciones en la cámara Ward-CIMPA.	82
Tabla 20. Eficiencia exergética para las distintas configuraciones en la cámara Plana-CIMPA.	83
Tabla 21. Factores de emisión experimento CW01.	85
Tabla 22. Factores de emisión experimento CW04.	86
Tabla 23. Factores de emisión experimento CW07.	87
Tabla 24. Factores de emisión experimento CP01.	88
Tabla 25. Factores de emisión experimento CP04.	89
Tabla 26. Peso de escoria Vs Alimentación de bagazo.	92
Tabla 27. Composiciones finales, temperatura y potencia para cada iteración.	103
Tabla 28. Resultados del caso de diseño de cámara.	107

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Diagrama de flujo y másico del proceso de elaboración de la panela.	5
Figura 2. Fases de combustión de la madera.	8
Figura 3. Esquema de un combustor de lecho fijo y tiro natural.	11
Figura 4. Cámara de combustión Plana-CIMPA.	15
Figura 5. Cámara de combustión Ward-CIMPA.	16
Figura 6. Parrilla de un horno up-draft.	25
Figura 7. Esquema de Balance de masa en la cámara Ward-CIMPA.	27
Figura 8. Configuraciones experimentales para el estudio de los parámetros de diseño y operación.	31
Figura 9. Esquema general de los equipos utilizados en la hornilla con cámara Ward-CIMPA.	33
Figura 10. Esquema general de los equipos utilizados en la hornilla con cámara Plana-CIMPA.	34
Figura 11. Parrilla de 60% área libre de la cámara Plana-CIMPA (a) y parrilla de 40% área libre de la cámara Ward-CIMPA.	36
Figura 12. Compuertas de alimentación del bagazo de la cámara Ward-CIMPA (a) y de la Plana-CIMPA (b).	37
Figura 13. Sistema de control de nivel de agua en las pailas de la hornilla con cámara Plana-CIMPA.	38
Figura 14. Montaje experimental para el análisis de gases de combustión.	39
Figura 15. Sistema de ventilación.	40
Figura 16. Montajes experimentales del sistema de ventilación en la Ward-CIMPA (a.) y en la Plana-CIMPA (b).	41

	<b>Pág.</b>
Figura 17. Sistema de registro de datos de temperatura: Computador, datalogger, conexiones de las termocuplas.	42
Figura 18. Configuraciones experimentales para el estudio de la formación de escoria.	44
Figura 19. Configuraciones experimentales para el control On/Off.	45
Figura 20. Esquema general del lazo de control en la cámara Ward-CIMPA.	46
Figura 21. Esquema general de reacción de bagazo húmedo.	49
Figura 22. Esquema general de reacción para el bagazo seco.	53
Figura 23. CO Vs Exceso de aire. Hum. 25% Exp. CW01	56
Figura 24. CO Vs Exceso de aire. Hum. 24% Exp. CW02	56
Figura 25. CO Vs Exceso de aire. Hum. 32% Exp. CW03	57
Figura 26. CO Vs Exceso de aire. Hum. 33% Exp. CW04	57
Figura 27. CO Vs Exceso de aire. Hum. 30% Exp. CW05	57
Figura 28. CO Vs Exceso de aire. Hum. 30% Exp. CW06	57
Figura 29. CO Vs Exceso de aire. Hum. 22% Exp. CW07	57
Figura 30. CO Vs Exceso de aire. Hum. 26% Exp. CW08	57
Figura 31. CO Vs Exceso de aire. Hum. 23% Exp. CW09	58
Figura 32. CO Vs Exceso de aire. Hum. 26% Exp. CP01	59
Figura 33. CO Vs Exceso de aire. Hum. 30% Exp. CP02	59
Figura 34. CO Vs Exceso de aire. Hum. 30% Exp. CP03	59
Figura 35. CO Vs Exceso de aire. Hum. 27% Exp. CP04	59
Figura 36. CO Vs Exceso de aire. Hum. 36% Exp. CP05	59
Figura 37. CO Vs Exceso de aire. Hum. 30% Exp. CP06	59
Figura 38. CO Vs Exceso de aire. Hum. 32% Exp. CP07	60
Figura 39. CO Vs Exceso de aire. Hum. 31% Exp. CP08	60
Figura 40. Perfil de temperatura, humedad: 25% Exp. CW01	61

	<b>Pág.</b>
Figura 41. Perfil de temperatura, humedad: 33% Exp. CW04	61
Figura 42. Perfil de temperatura, humedad: 22% Exp. CW07	62
Figura 43. Perfil de temperatura, humedad: 24.5% Exp. CW10	62
Figura 44. Perfil de temperatura, humedad: 40.6% Exp. CW13	62
Figura 45. Perfil de temperatura, humedad: 41% Exp. CW16	63
Figura 46. Perfil de temperatura, humedad: 26% Exp. CP01	63
Figura 47. Perfil de temperatura, humedad: 27% Exp. CP04	63
Figura 48. Perfil de temperatura, humedad: 31% Exp. CP07	64
Figura 49. Perfil de temperatura, humedad: 31.8% Exp. CP10	64
Figura 50. Perfil de temperatura de 15 min. Exp. CW10	65
Figura 51. Perfil de temperatura de 15 min. Exp. CW13	65
Figura 52. Perfil de temperatura de 15 min. Exp. CW16	65
Figura 53. Perfil de temperatura de 15 min. Exp. CW01	65
Figura 54. Perfil de temperatura de 15 min. Exp. CW04	65
Figura 55. Perfil de temperatura de 15 min. Exp. CW09	65
Figura 56. Perfil de temperatura de 15 min. Exp. CP01	66
Figura 57. Perfil de temperatura de 15 min. Exp. CP04	66
Figura 58. Perfil de temperatura de 15 min. Exp. CP07	66
Figura 59. Perfil de temperatura de 15 min. Exp. CP10	66
Figura 60. Frecuencia de ciclos en cámara Ward-CIMPA.	69
Figura 61. Frecuencia de ciclos en cámara Plana-CIMPA.	71
Figura 62. Frente de combustión cámara Ward-CIMPA.	73
Figura 63. Frente de combustión cámara Plana-CIMPA.	73
Figura 64. Balance de energía en la cámara de combustión.	74
Figura 65. Histogramas con los porcentajes exergeticos de entrada y salida para los dos tipos de cámara.	84
Figura 66. Relaciones de caudales de aire 1 y 2 para tiro natural.	91

	<b>Pág.</b>
Figura 67. Relaciones de caudales de aire 1 y 2 para velocidad del ventilador baja.	91
Figura 68. Humedad del bagazo Vs Peso de la escoria.	92
Figura 69. Perfil de temperatura, para una alimentación de 70 Kg/h, a lazo abierto y lazo cerrado con control ON/OFF.	93
Figura 70. Perfil de temperatura, para una alimentación de 110 Kg/h, a lazo abierto y lazo cerrado con control ON/OFF.	93
Figura 71. Activaciones del motor del ventilador y perfil de temperatura, para 70 Kg/h, en lazo cerrado.	94
Figura 72. Activaciones del motor del ventilador y perfil de temperatura, para 110 Kg/h, en lazo cerrado.	94
Figura 73. Diagrama de bloques junto con el lazo de control.	95
Figura 74. Algoritmo de cálculo de flujo de bagazo.	98
Figura 75. Potencia desarrollada en un ciclo.	106

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
Anexo A. Plano de una hornilla panelera con cámara de combustión Plana-CIMPA.	120
Anexo B. Plano de una hornilla panelera con cámara de combustión Ward-CIMPA.	122
Anexo C. Pailas paneleras estudiadas y desarrolladas por el CIMPA.	124
Anexo D. Procedimiento para determinar la humedad del bagazo.	128
Anexo E. Plano de la protoboard utilizada para el control de nivel de agua en las pailas.	130
Anexo F. Plano de la protoboard utilizada para el lazo de control en la cámara Ward-CIMPA.	132
Anexo G. Calibración del flujo de aire en el ducto.	134
Anexo H. Procedimiento para la calibración de termocuplas.	137
Anexo I. Resultados simulación de la composición de gases de Combustión.	139
Anexo J. Matriz de Vester para variables de funcionamiento en una hornilla panelera.	145
Anexo K. Cálculos de exergía en las cámaras de combustión Ward y Plana-CIMPA.	147
Anexo L. Resultados de las variables monitoreadas en las corridas experimentales.	154

## GLOSARIO

**ANTIESPUMANTES.** Sustancias que evitan que en la ebullición los jugos, estos rebosen la altura de la paila.

**BAGACERA.** Lugar donde se almacena el bagazo verde después de la extracción de los jugos de la caña en los molinos.

**BRIX DEL JUGO (°B).** Concentración de sólidos solubles en el jugo, que principalmente son azúcares, varía de acuerdo a las condiciones agronómicas del cultivo de caña, su rango está entre 14 a 23°B.

**BRIX DE LA PANELA (°B).** Concentración de sólidos solubles en la panela, su rango está entre 88 a 94°B.

**CACHAZA.** Impurezas del jugo de la caña de azúcar, las cuales se remueven en la clarificación.

**EMISIÓN CONTAMINANTE.** Descarga proveniente de una fuente fija o móvil de contaminación de aire a través de un conducto o chimenea.

**GASES DE COMBUSTIÓN.** Gases provenientes de la combustión del bagazo, son descargados a la atmósfera a través de la chimenea después de recorrer el ducto y transferir calor a las pailas. Contienen principalmente CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> y vapor de agua.

**HORNILLA PANELERA.** Equipo donde se transforma la energía del combustible en energía calórica para realizar las etapas de clarificación, evaporación y concentración de los jugos de la caña.

**PAILAS.** Recipientes donde ocurren las etapas de clarificación, evaporación y concentración de los jugos de la caña.

**TRAPICHE.** Instalación en donde se procesa la caña de azúcar para producir panela.

## RESUMEN

### TITULO:

DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO Y OPERACIÓN DE CÁMARAS DE COMBUSTIÓN TIPO WARD-CIMPA Y PLANA-CIMPA EN HORNILLAS PANELERAS.\*

### AUTORES:

Juan Pablo Soler Villamizar  
Franco Hernán Gómez Tovar\*\*

### PALABRAS CLAVES:

Emisiones, bagazo, escoria, potencia, temperatura, Ward-Cimpa, Plana-Cimpa.

### DESCRIPCIÓN:

Las cámaras de combustión de las hornillas paneleras presentan errores de diseño y operación, que tienen como consecuencia baja eficiencia energética, alto costo ambiental y de producción. Fue necesario determinar nuevos parámetros de diseño y operación para las cámaras de combustión Ward-CIMPA y Plana-CIMPA, teniendo en cuenta el flujo y la humedad del bagazo, aire en exceso, área libre de parrilla y un modelo matemático más riguroso.

Experimentalmente se determinó un rango de exceso de aire óptimo del 55-60%, para emisiones de (CO) de 5 g/molCO/kg bagazo seco en la Ward-CIMPA y un exceso de aire óptimo del 60-65%, para emisiones de (CO) de 6 g/mol CO/kg bagazo seco en la Plana-CIMPA. Se definieron nuevos factores de parrilla experimentales, un nuevo cálculo para el diseño del volumen de las cámaras, incluyendo el volumen del ducto hasta después de la primera paila en la Ward-CIMPA y hasta después de la segunda paila en la Plana-CIMPA. Se determinaron tiempos de ciclo de la temperatura en las cámaras de combustión, de 90 seg. para la Ward-CIMPA y de 135 seg. para la Plana-CIMPA, parámetros con los cuales se expresó la potencia y el volumen de las cámaras.

Se desarrolló un modelo matemático más riguroso para la determinación del flujo de bagazo requerido, composición de gases de combustión, temperatura y potencia de la cámara. Se estudió la formación de escoria en las parrillas y se implementó un sistema de control para estabilizar la temperatura en la cámara Ward-CIMPA.

---

\* Proyecto de Grado.

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-químicas, Escuela de Ingeniería Química, Director: Álvaro Ramírez García.

## ABSTRACT

### TITLE:

DETERMINATION OF THE DESIGN PARAMETERS AND WARD-CIMPA AND PLANA-CIMPA COMBUSTIÓN CHAMBERS OPERATION IN FURNACES FOR UNREFINED SUGAR (PANELA).\*

### AUTHORS:

Juan Pablo Soler Villamizar  
Franco Hernán Gómez Tovar\*\*

### KEY WORDS:

Emissions, bagasse, scum, power, temperature, Ward-CIMPA, Plana-CIMPA.

### DESCRIPTION:

The combustion chambers in furnaces for unrefined sugar (panela) present design and operation errors, which have as consequences low energy efficiency, and high environmental and production costs. A better behavior for the Ward-CIMPA and Plana-CIMPA combustion chambers had to be determined, taking into account the flow and moisture of bagasse, air in excess, free area of the grill and a more rigorous mathematical model, for determination of operation and design parameters.

The optimum range of excess air was determined experimentally between 55-60%, for 5 gmol CO/kg dry bagasse (CO) emissions in the Ward-CIMPA and excess air about 60-65%, for 6 gmol CO/kg dry bagasse (CO) emissions in the Plana-CIMPA. New values for grill factors and a chamber volume were defined experimentally, including the duct volume after the first recipient in the Ward-CIMPA and after the second recipient in the Plana-CIMPA. Cycle times for temperature were determined in the combustion chambers, 90 sec. for the Ward-CIMPA and 135 sec. for the Plana-CIMPA, with these parameters was possible to express the power and volume of chambers.

A rigorous mathematical model for determination of the required bagasse, composition of combustion gases, temperature and chamber was developed. The scum formation in grills was studied and a control system to stabilize the temperature in the Ward-CIMPA chamber was implemented.

---

\* Final Project.

\*\* Physical-chemical Engineering Faculty, Chemical Engineering School, Director: Álvaro Ramírez García.

## INTRODUCCIÓN

La agroindustria panelera emplea al 12.8% de la población rural económicamente activa, cerca de 400.000 personas en 20.000 hornillas paneleras distribuidas en todo el territorio nacional; con una participación del 6.7% del PIB agrícola del país es el segundo generador de empleo después del café<sup>1</sup>.

Pese a la gran importancia de este sector, no ha sido razón suficiente para dar solución a la gran cantidad de problemas con que cuenta; la ausencia por parte del gobierno de una política económica, propicia un desarrollo económico desigual en la producción, distribución y venta; pues al tener altos costos de producción y fluctuación en los precios de venta a los intermediarios, se genera muy poca ganancia a los productores, condenando este sector a tener poca inversión de capital, no avanzar tecnológicamente y continuar como un proceso tradicionalmente artesanal y empírico; , el cual presenta errores de operación en distintas áreas de trabajo de las hornillas paneleras, teniendo como consecuencia altos costos de producción, baja eficiencia energética del proceso y alto costo ambiental.

En los últimos 19 años el Centro de Investigación para el Mejoramiento de la Agroindustria Panelera - CIMPA, de la Corporación Colombiana para Investigación Agropecuaria - CORPOICA, ha llevado a cabo investigaciones tendientes a mejorar la eficiencia del proceso, la calidad del producto y disminuir el impacto ambiental.

En esta oportunidad el CIMPA en convenio con el Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales - CEIAM de la Universidad Industrial de Santander y financiados por COLCIENCIAS, pretendieron validar todo el conocimiento acumulado en estos últimos años de experiencia en investigación en el sector, dando un mayor sustento técnico a los distintos procesos fisicoquímicos que ocurren en la elaboración de panela, en áreas como: la cámara de combustión, el ducto, la chimenea, las pailas; proyectando el proceso de elaboración de panela a escenarios mas propicios y competitivos.

Esta investigación fue desarrollada por un grupo interdisciplinario e interinstitucional entre la Universidad Industrial de Santander, la Universidad Nacional sede Bogotá y Corpoica, con el objetivo de desarrollar una metodología de diseño para las cámaras de combustión Ward-Cimpa y

---

<sup>1</sup> CORPOICA. Manual de caña panelera. B/manga. 1997.

Plana-Cimpa, además de identificar variables óptimas de operación del proceso.

En el primer capítulo se presentan los fundamentos teóricos del proceso de combustión haciendo énfasis en el sistema implementado en las hornillas paneleras. En el segundo capítulo se describe el desarrollo experimental para esta investigación donde se incluye la definición de variables, descripción de las configuraciones experimentales, montajes, equipos y pruebas realizadas.

En los siguientes capítulos se presenta el resultado del tratamiento de los datos, recolectados en la experimentación como fue el desarrollo del modelo de estimación de la composición de los gases de combustión, y la interpretación del comportamiento de las variables dependientes de operación como temperatura o composición de gases entre otras.

En el último capítulo, se presenta una propuesta para el diseño de una cámara de combustión basada en los datos recolectados; aquí vale la pena resaltar, que en ningún momento se alteró la geometría con la que actualmente se construyen las cámaras de combustión, en otras palabras, los resultados obtenidos son válidos para cámaras que se diseñen con los parámetros hasta ahora desarrollados por CIMPA.

## **1. COMBUSTIÓN EN HORNILLAS PANELERAS FUNDAMENTOS TEÓRICOS.**

La actividad más importante en el proceso de elaboración de panela, es la producción de calor generado a partir de la quema del bagazo de caña; esta actividad generalmente se denomina combustión. Por esta razón, el presente capítulo parte de la descripción del proceso actual de elaboración de panela, luego se describe el proceso y los sistemas más comunes de combustión de materiales sólidos, y finalmente se describen las áreas de generación y transferencia de calor de una hornilla panelera.

### **1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO ACTUAL.**

La PANELA es un producto obtenido de la evaporación de los jugos de la caña y la consiguiente cristalización de la sacarosa que contiene minerales y vitaminas. Ésta se puede utilizar para la industria alimenticia en la fabricación de productos alimenticios, o como proveedora de insumos para otras industrias y para la industria farmacéutica. En Colombia se tiene una Norma Técnica Colombiana NTC 1311 relacionada con la Panela.

El proceso consiste básicamente en concentrar el jugo de la caña de azúcar desde 18 hasta 92 grados Brix por evaporación, manteniendo un pH de 5.5 aproximadamente para inhibir la inversión de la sacarosa. Esta operación se lleva a cabo en una hornilla panelera, que se compone de una cámara de combustión donde se quema el bagazo de caña, un ducto y chimenea por donde circulan los gases calientes provenientes de la cámara, y varias pailas ubicadas sobre el ducto donde se depositan los jugos. En general, el proceso de elaboración de panela se lleva a cabo en seis etapas, comprendidas desde la molienda de la caña hasta el empaque de la panela, lista para la venta, estas etapas se describen brevemente a continuación:

**1.1.1. Extracción de jugos.** Esta etapa se lleva a cabo en un molino, generalmente de hierro, de tres o cuatro mazas. En este equipo la caña es sometida a compresión y se obtiene el jugo crudo, el porcentaje de extracción alcanzado normalmente está entre el 40 y el 60% con relación al peso de caña.

**1.1.2. Prelimpieza.** El jugo crudo se dirige por medio de canales a un recipiente metálico denominado "Prelimpiador", equipo diseñado por el CIMPA; aquí se retiran parte de las impurezas de los jugos debido a la diferencia de densidades de la sustancia.

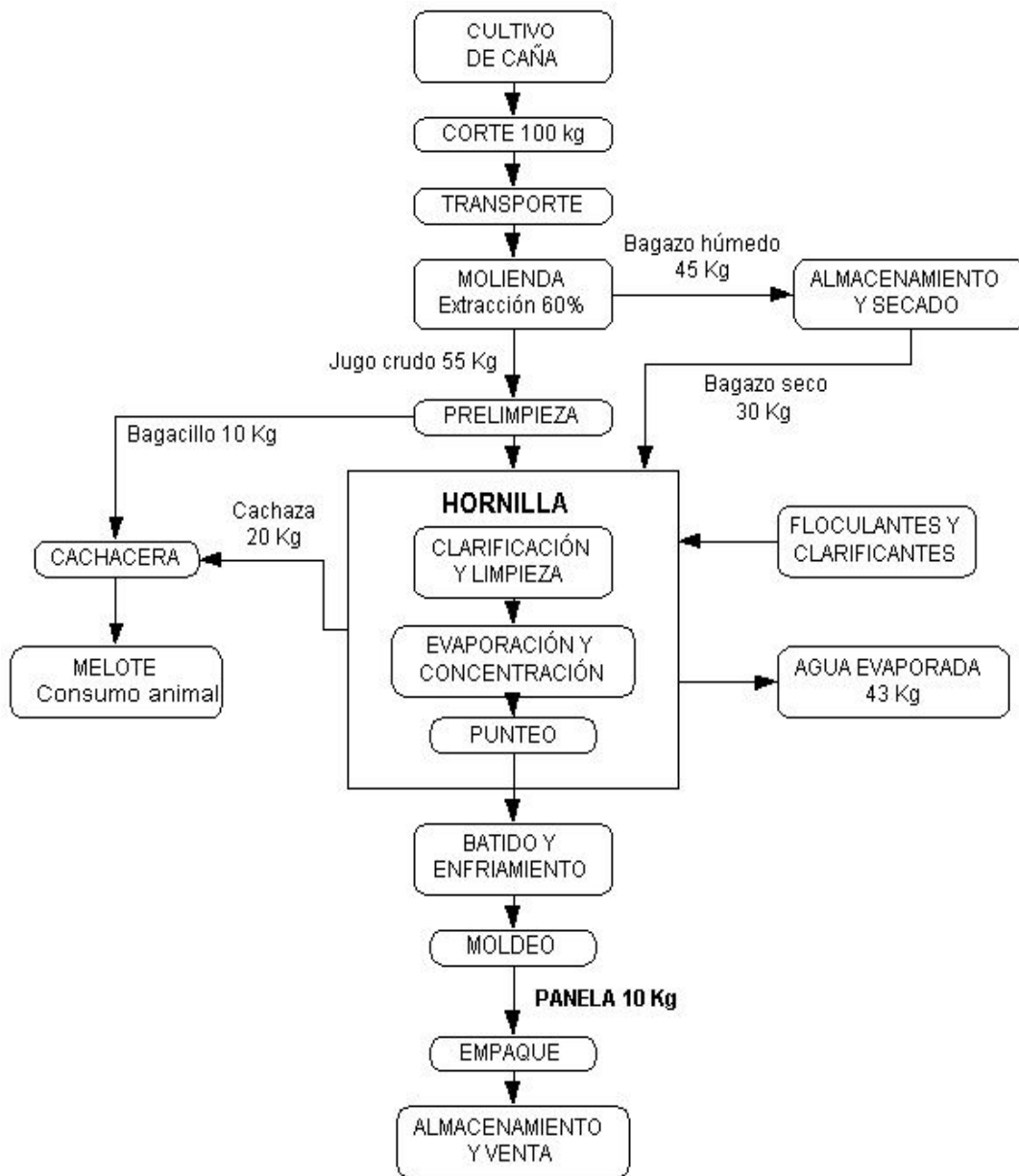
**1.1.3. Clarificación.** La paila que recibe los jugos dentro de la hornilla se denomina *Paila recibidora*, allí los jugos se calientan desde la temperatura ambiente hasta 92 °C. Cuando el jugo alcanza los 65°C, se le añade un mucílago vegetal que actúa como clarificante, con el objeto de separar los residuos de caña remanentes en el jugo y otras sustancia coloidales, que son retiradas manualmente y se denominan *cachaza*. Los clarificantes más comunes en la región de la hoya del Río Suárez son el mucílago del balso, cadillo o guásimo.

**1.1.4. Evaporación.** Esta es la operación unitaria más relevante del proceso, donde se aumenta la concentración de sólidos solubles presentes en el jugo; por lo general, se concentran desde 17 °Brix hasta 92 °Brix. En esta etapa, se agrega en algunos casos aceite de higuierilla o cera de laurel, como agente antiadherente y antiespumante cuando la concentración del jugo es cercana a los 70 grados Brix.

**1.1.5. Batido y moldeo.** La miel obtenida (92 °Brix) se lleva a un recipiente donde se agita, hasta lograr airearla y cambiar su textura; luego se lleva a los moldes o gaveras donde se solidifica a temperatura ambiente. Este producto terminado es lo que comúnmente se conoce como panela.

**1.1.6. Empaque y almacenamiento.** La panela producida es empacada para su comercialización en cajas de cartón, costales de fique o bolsas de papel.

En la Figura 1, se esquematizan las principales etapas y el balance másico que se llevan a cabo en el proceso actual de elaboración de la panela.



Fuente: Archivo CIMPA

Figura 1. Diagrama de flujo y másico del proceso de elaboración la panela

## 1.2. PROCESO DE COMBUSTIÓN DE MATERIALES SÓLIDOS

**1.2.1. Descripción básica.** El proceso de la combustión implica la oxidación de los componentes presentes en el combustible capaces de ser oxidados y puede, por lo tanto, ser representado por una ecuación química. Durante el proceso de combustión, la masa de cada elemento no se altera, de modo que al escribir ecuaciones químicas y resolver problemas que

comprendan las cantidades de varios componentes, el asunto se reduce básicamente a considerar la conservación de la masa de cada elemento.

La combustión ocurre cuando el combustible sólido reacciona con el Oxígeno del aire para producir calor; la composición del aire en base molar, es aproximadamente 21% de Oxígeno, 78% de Nitrógeno y 1% de Argón, pero en los cálculos de combustión donde se emplea aire, el argón se desprecia y se considera el aire constituido simplemente por 21% de Oxígeno y 79% de Nitrógeno en volumen; a este Nitrógeno se le conoce como "Nitrógeno atmosférico" con un peso molecular de 28.16 en lugar de 28.016 puesto que en este valor se compensa haber despreciado el Argón.

En el proceso de combustión existe una cantidad mínima de aire denominada *aire teórico*, esta es capaz de proporcionar el oxígeno suficiente para una combustión completa<sup>1</sup> de Carbono, Hidrógeno y cualesquiera otros elementos presentes en el combustible susceptibles de ser oxidados; pero en la práctica, solo se obtiene combustión completa cuando se añade al proceso una cantidad de aire superior a la teórica denominada *exceso de aire*, debido a la dificultad de mezclar el aire con el combustible en las diversas secciones del horno en que se quema (OCÓN, 1964)

De este modo, cuando la cantidad de aire suministrada en una combustión es menor que el aire teórico necesario, la combustión es incompleta; si el faltante es pequeño, el resultado es que parte del carbono se une al oxígeno para formar CO en lugar de CO<sub>2</sub>; pero si el faltante es mucho mayor, entre los productos de combustión se encontrarán algunos hidrocarburos.

A menos que la combustión se controle perfectamente, altas concentraciones de productos indeseables pueden formarse; el monóxido de carbono y la ceniza, por ejemplo, resultan de un combustible pobre y un suministro de aire bajo, o la escoria, que resulta de un combustible muy húmedo que contiene carbohidratos; otros productos indeseables, tales como óxidos de nitrógeno se forman cuando la temperatura alcanzada es demasiado alta. Si el combustible contiene azufre, se forma dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>).

**1.2.2. Fases de la combustión.** En cualquier sistema de combustión, si una partícula de combustible es expuesta al flujo de una corriente gaseosa caliente, sufre tres etapas de pérdida de masa como es el secado, devolatilización<sup>2</sup>, y combustión de carbono. La importancia de cada uno de estos tres procesos es indicada por el análisis próximo del combustible<sup>3</sup>; por ejemplo, el carbón tiene relativamente poca agua y volátiles, pero más carbón fijo comparado con la madera, por esta razón tendrá una mayor pérdida de masa en la fase de combustión de carbono.

---

<sup>1</sup> Combustión completa: cuando todo el carbono presente en el combustible reacciona a CO<sub>2</sub>

<sup>2</sup> Devolatilización: Proceso donde cierta cantidad de carbón es liberada como una mezcla compleja de compuestos orgánicos e inorgánicos en formas gaseosa y líquida.

<sup>3</sup> El análisis próximo hace referencia a la determinación aproximada de C, H, O y cenizas presentes en el combustible

**1.2.2.1. Secado de combustibles sólidos.** La humedad en los combustibles sólidos puede existir de dos maneras; como agua libre en los poros del combustible, y como agua superficial la cual es adsorbida a la estructura interior de la superficie del combustible (GARY, Borman, 1998).

En este caso considérese una partícula de carbón pulverizada o de madera la cual se introduce a un horno; al entrar por encima del horno, la partícula recibe calor por convección sobre su superficie y conducción dentro de ella por parte de la corriente de gas que abandona el horno. Para una partícula pulverizada (100 µm), el agua es vaporizada y forzada rápidamente fuera de la partícula antes de que los volátiles sean liberados.

El tiempo de secado de partícula pulverizada, es el tiempo requerido para llegar al punto de vaporización y quedar libre de agua. Un balance de energía sobre la partícula muestra que la razón de cambio con el tiempo de la energía dentro de la partícula, es igual a la razón de calor latente del agua mas la razón de transferencia de calor neta a la partícula por convección y radiación:

$$\frac{d}{dx} (m_w u_w + m_{df} u_{df}) = -m_w h_{fg} + q \quad \text{Ec. 1.1}$$

Donde,  $h_{fg}$  = Calor latente de vaporización por unidad de masa de agua  
 $w$  = masa de agua  
 $df$  = Combustible seco

**1.2.2.2. Devolatilización de combustibles sólidos.** Cuando el secado de una pequeña partícula o una zona de una partícula grande culmina, la temperatura aumenta y el sólido comienza a descomponerse, dando lugar a la liberación de volátiles. Puesto que el flujo de volátiles del sólido ocurre a través de los poros, el oxígeno externo no puede penetrar en la partícula, y aquí la devolatilización es referida como una etapa de pirólisis.

En el caso de la biomasa, la hemicelulosa piroliza entre 225° y 325°C, la celulosa entre 325-375°C, y la lignina entre 300-500°C. Varios hidrocarburos y agua se forman y rápidamente se descomponen bajo condiciones de combustión, de modo que los productos de pirolisis en un ambiente de combustión pueden ser considerados hidrocarburos de cadena corta, dióxido de carbono, monóxido de carbono, hidrógeno y vapor de agua.

La velocidad de devolatilización de un combustible sólido, puede ser representado aproximadamente como una reacción de primer orden con una ecuación de Arrhenius :

$$\frac{dm_v}{dt} = -m_v k_{pyr} \quad \text{Ec. 1.2}$$

Donde:

$$k_{pyr} = -k_{o,pyr} \exp(-E_{pyr} / RT_p) \quad \text{y} \quad m_v = m_p - m_c - m_a$$

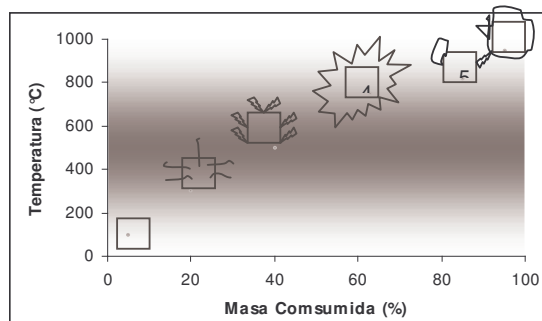
pyr = hace referencia a  
la pirólisis

$m_v$  = masa de volátiles  
 $m_p$  = masa de las partículas secas  
 $m_c$  = masa de carbono  
 $m_a$  = cenizas

**1.2.2.3. Combustión del carbón.** El paso final en el proceso de combustión de sólidos es la quema del carbón, puesto que cuando culmina la devolatilización solo permanece el carbono y la ceniza.

En esta fase se liberan los no volátiles y como el carbono es altamente poroso, el oxígeno puede difundirse por medio de la frontera externa del lecho y penetrar en las partículas del carbón, de esta manera, la velocidad de quemado depende de ambos efectos: de la velocidad de la reacción química entre el carbono y el oxígeno en la superficie del lecho y de la difusión interna del oxígeno en la partícula; la reacción en la superficie genera principalmente monóxido de carbono, que reacciona fuera de la partícula para formar dióxido de carbono; además es necesario tener en cuenta que la velocidad de esta reacción depende de la concentración de oxígeno, temperatura del gas, número de Reynolds, tamaño y porosidad del carbón.

Para un sistema de combustión en el que se utiliza madera como combustible se representa la figura 2, allí se observa la temperatura y el porcentaje másico consumido del combustible en cada fase de la combustión (HELLWIG, 1982). De acuerdo con las condiciones de aire suministrado y de la manera como se mezcla con el combustible, la velocidad de las etapas iniciales es generalmente más alta que la velocidad de la última etapa, cuando el combustible se quema en estado sólido.



Fuente: Hellwig, 1982

\*1. Secado. 2. Emisión de volátiles. 3. Ignición de volátiles. 4. Combustión de volátiles. 5. Extinción de la llama de volátiles. 6. Combustión de coque o carbono

Figura 2. Fases de combustión de la madera.

En conclusión, las partículas sólidas en un ambiente de combustión sufren secado, devolatilización y combustión del carbono, y la velocidad en cada uno de estos procesos depende del tipo de combustible, del contenido de humedad, tamaño y de la transferencia de masa y energía a la partícula; en caso de las partículas pequeñas estos tres procesos ocurren en serie, mientras que para partículas grandes ocurren simultáneamente.

**1.2.3. Sistemas de combustión.** En la práctica industrial se conocen tres tipos de sistemas de combustión para la quema de materiales sólidos, dependiendo de la manera como se dispone el sólido dentro del horno o reactor para la combustión; estos tres sistemas se conocen como combustión en lecho fluidizado, en lecho en suspensión o el más común de ellos, en lecho fijo.

**1.2.3.1. Combustión en lecho fluidizado.** Este tipo de combustión es utilizado para producir combustible gaseoso a partir de uno sólido, mediante reacciones químicas entre el carbón o la biomasa con sustancias gasificantes como el vapor del agua, el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) o el aire. Los productos son gases combustibles como el monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ), el hidrógeno ( $\text{H}_2$ ) el metano ( $\text{CH}_4$ ) y otros. El lecho fluidizado se obtiene cuando las partículas sólidas de cierto diámetro quedan suspendidas en un fluido que circula a través de ellas, las más pequeñas son arrastradas y renovadas nuevamente al reactor. (BORMAN, 1998).

La combustión o gasificación en lecho fluidizado reduce la formación de inquemados, las emisiones de  $\text{SO}_2$  y  $\text{NO}_x$  por medio del control de los parámetros de combustión (temperatura del proceso, tasa de reacción y de intercambio de energía y materia) y por medio de la inyección de absorbentes como la caliza, los cuales entran al reactor mezclados con el carbón y fluidizados en la cámara de combustión. Este tipo de combustión puede ser utilizado para una gama amplia de combustibles. (BORMAN, 1998)

**1.2.3.2. Combustión de lecho en suspensión.** Este tipo de combustión se utiliza principalmente para el carbón, el cual es pulverizado en molinos en donde generalmente el 90% de las partículas presentan un tamaño menor de 100  $\mu\text{m}$  con un punto de fusión bajo y un volumen de ceniza alto. Combustibles como la biomasa o desechos derivados de combustibles también pueden ser quemados por suspensión siempre y cuando el tamaño de partícula sea el adecuado y presenten un contenido de humedad no mayor al 15%. (BORMAN, 1998).

Para el caso de la combustión del bagazo por suspensión esta se logra utilizando un sistema de emparrillado estático, con las siguientes ventajas: se puede quemar bagazo más fino producido por una molienda mejorada, opera con pérdidas menores de material no quemado, la caldera responde con más rapidez a los cambios de carga, reducción de las pérdidas por radiación,

menos aire de exceso necesitado, lo que mejora la eficiencia de la caldera, se pueden utilizar mayores temperaturas de aire bajo el emparrillado esto permite que se pueda quemar bagazo con más contenido de humedad y las emisiones de NO<sub>x</sub> se pueden regular principalmente por el flujo de aire de mezcla en el quemador. (BORMAN, 1998).

**1.2.3.3. Combustión en lecho fijo.** La tradicional fogata donde la madera se dispone en forma cónica o de pila, es un ejemplo de combustión en lecho fijo con suministro de aire por convección natural. En este caso se presenta una baja intensidad de la combustión<sup>1</sup>, y se carece de un control efectivo del calor liberado y de las emisiones.

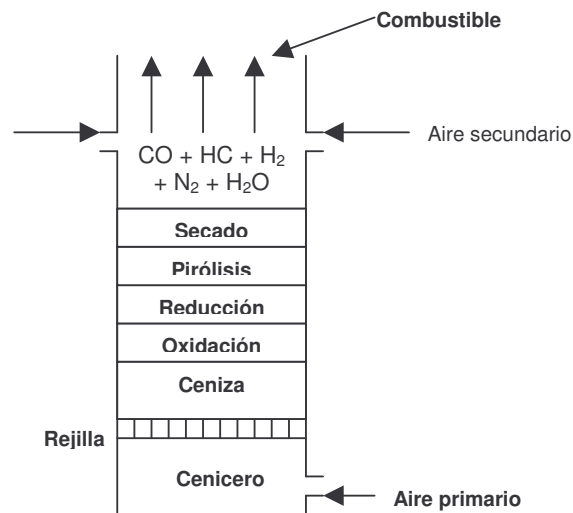
Para mejorar la eficiencia y disminuir el impacto ambiental del proceso, se han implementado rejillas o parrillas donde se soporta el combustible, para obligar al aire de combustión a entrar por la base del lecho y ascender a través de él; también es posible en algunos casos, implementar un ventilador u otro dispositivo para forzar el tiro y hacer pasar el aire a través del lecho hacia arriba, denominado sistema up-draft o en según el diseño, forzar el aire a pasar a través del lecho hacia abajo denominado sistema down-draft.

Por otra parte, es importante resaltar que un tipo de horno es diseñado para un tipo particular de combustible sólido, con un rango específico de operación de valores calóricos, contenido de humedad, cenizas y tamaño de partículas; operar un horno fuera de estos parámetros provoca la ineficiencia del proceso, que en la mayoría de los casos implica un aumento de costo de la producción.

El esquema de combustión en lecho fijo con alimentación por la parte superior se muestra en la figura 3. En la parte superior del lecho el combustible recibe el calor por flujo convectivo de los productos gaseosos de combustión, los cuales secan la capa superior del combustible (fase de secado); el calentamiento adicional del combustible en la siguiente capa del lecho conduce al escape de la materia volátil consistente primariamente de hidrocarburos gaseosos y alquitrán, monóxido de carbono e hidrógeno (fase de devolatilización); la siguiente capa del lecho corresponde al carbono, donde se consume gran parte del oxígeno suministrado debido a las reacciones que se llevan a cabo para la liberación de los no volátiles (fase de combustión de carbono); por último, en la base del lecho sobre la parrilla se depositan los residuos minerales de la combustión denominados *ceniza*, que fluye lentamente por gravedad y a través de la parrilla hacia el cenicero.

---

<sup>1</sup> Calor liberado por unidad de volumen de combustible alimentado.



Fuente: BORMAN y RAGLAND, 1998.

Figura 3. Esquema estratificado de un combustor de lecho fijo de tiro natural.

El carbono que se encuentra en la parte más baja del lecho muestra una zona de reducción y una de oxidación. En la zona de oxidación las moléculas de oxígeno penetran la superficie del carbón y forman monóxido y dióxido de carbono según lo describen las ecuaciones 1.3 y 1.4 (Ver tabla 1) y simultáneamente ocurre la oxidación del monóxido de carbono, según la ecuación 1.5.

El oxígeno generalmente se consume entre los 5 a 10 centímetros sobre la parrilla, y sobre esta sección se encuentra la zona de reducción en la cual el dióxido de carbono y el vapor de agua reaccionan con el carbono libre, para formar monóxido de carbono e hidrógeno (Ec 1.6 y Ec. 1.7). La cantidad de CO y H<sub>2</sub> formada depende del área superficial y del espesor del lecho. Una manera de mitigar la producción de monóxido de carbono y favorecer la producción de dióxido de carbono, consiste en aumentar la velocidad del aire que atraviesa el lecho; aunque experimentalmente esto se ha comprobado no se elimina totalmente la zona de reducción (BORMAN, 1998)

Por otra parte, también es importante tener en cuenta en los sistemas de combustión en lecho fijo, que las temperaturas más elevadas se encuentran en la zona de oxidación donde se libera la mayor parte del calor, por esta razón, el proceso se debe controlar para que esta temperatura no supere el punto de fusión de la ceniza (1200°C para la ceniza proveniente de la biomasa) y de esta manera se evite la formación de un aglomerado o escoria sobre la parrilla, que obstruye la entrada de aire primario al sistema de combustión (BORMAN, 1998).

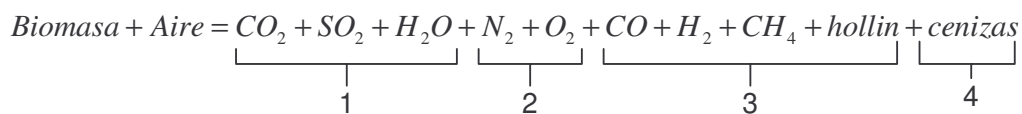
En la tabla 1, se muestran las reacciones químicas que ocurren en los sistemas de combustión de acuerdo al as zonas que se presentan.

Tabla 1. Reacciones químicas en los sistemas de combustión.

Reacciones en la zona de oxidación	
$C + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO$ Ec. 1.3	$\Delta H = -110525$ [Kj/Kmol] $\Delta G = -137255$ [Kj/Kmol] $\Delta S = 197.7$ [Kj/Kmol-°C]
$C + O_2 \rightarrow CO_2$ Ec. 1.4	$\Delta H = -393509$ [Kj/Kmol] $\Delta G = -394688$ [Kj/Kmol] $\Delta S = 213.83$ [Kj/Kmol-°C]
$CO + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO_2$ Ec. 1.5	$\Delta G = -257413$ [Kj/Kmol] $\Delta H = -282984$ [Kj/Kmol] $\Delta S = 16.13$ [Kj/Kmol-°C]
Reacciones en la zona de reducción	
$C + CO_2 \rightarrow 2CO$ Ec. 1.6	$\Delta H = 172459$ [Kj/Kmol] $\Delta G = 120178$ [Kj/Kmol] $\Delta S = 181.57$ [Kj/Kmol-°C]
$C + H_2O \rightarrow H_2 + CO$ Ec. 1.7	$\Delta H = 131463$ [Kj/Kmol] $\Delta G = 91495$ [Kj/Kmol] $\Delta S = 8.86$ [Kj/Kmol-°C]
Reacción de equilibrio	
$CO + H_2O = CO_2 + H_2$ Ec. 1.8	$\Delta H = -40995$ [Kj/Kmol] $\Delta G = -28726$ [Kj/Kmol] $\Delta S = -172.68$ [Kj/Kmol-°C]
Reacción de combustión de hidrógeno	
$H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$ Ec. 1.9	$\Delta H = -241988$ [Kj/Kmol] $\Delta G = -228750$ [Kj/Kmol] $\Delta S = 188.84$ [Kj/Kmol-°C]

Fuente: Smith Van Ness, 1996

En general, la reacción de combustión del combustible usando aire puede ser representada de acuerdo al siguiente esquema:



Para la combustión de biomasa, cada uno de los grupos numerados de 1 a 4 corresponde a:

1. Productos de oxidación completa. Una vez el contenido de azufre en el combustible sea bajo, el porcentaje de SO<sub>2</sub> es insignificante.
2. Exceso de aire.
3. Productos gaseosos (reducción), y productos sólidos por combustión incompleta.
4. Biomasa no combustible, fracciones minerales (Cenizas).

### **1.3. HORNILLA PANELERA.**

Una hornilla panelera, es el lugar donde los jugos se concentran por medio del suministro de calor, hasta convertirlos en panela. En ella se distinguen dos zonas: una donde tiene lugar la producción de calor que se denomina *cámara de combustión*, y otra donde ocurre la transferencia de calor conformada por ducto y pailas donde se concentran los jugos.

Los gases calientes provenientes de la cámara de combustión, circulan a través del ducto donde ceden parte de su calor sensible a las pailas; al final del ducto se encuentra la chimenea por medio de la cual se expulsan los gases de combustión hacia la atmósfera. Los gases de combustión circulan en la hornilla, debido a la diferencia de presión asociada con el movimiento de los gases a través de la chimenea, esto es lo que se denomina *tiro natural*, determinado principalmente por las dimensiones de la chimenea, la temperatura y el flujo de los gases.

Es de resaltar que debido a las condiciones económicas y a la situación geográfica de la mayoría de los trapiches de este sector, generalmente una hornilla panelera no cuenta con sistemas eléctricos o mecánicos dentro del proceso, que le permitan manipular el flujo de bagazo, el exceso de aire, el flujo de gases de combustión o ejercer un control automático sobre las condiciones de operación; por esta razón, los niveles de eficiencia energética con la tecnología que se dispone actualmente no superan el 65%; además, el proceso de manufactura demanda un alto recurso humano.

**1.3.1. Área de generación de calor.** También llamada cámara de combustión. Es un espacio construido en ladrillo refractario, donde se llevan a cabo las reacciones de combustión, al entrar en contacto el combustible (bagazo) con el comburente (oxígeno) a altas temperaturas; las partes principales de las cámaras usadas en este proceso son: la puerta de alimentación, la parrilla y el cenicero.

La puerta de alimentación permite el ingreso manual del bagazo a la cámara, y por lo general está provista de una tapa para evitar el ingreso de aire frío al

proceso o la pérdida de calor mientras no se está alimentando; comercialmente se construyen puertas en hierro de fundición gris.

La parrilla, es un enrejado sobre el cual descansa el bagazo mientras se quema, comercialmente se construyen parrillas en hierro fundido con un periodo de vida superior a dos años de operación y según el tipo de enrejado, la parrilla puede tener entre el 40 y 60% de área libre según el diseño de la hornilla, de esta manera parte del aire requerido para la combustión circula a través de la parrilla.

El cenicero, es el espacio donde se depositan por gravedad las cenizas e inquemados del combustible que pasan a través de la parrilla y por lo general, el largo y ancho de este es igual al de la cámara con capacidad para almacenar la ceniza producida durante una semana de operación continua.

Actualmente, en el Centro de Investigación para el Mejoramiento de la Agroindustria Panelera-CIMPA, se han desarrollado las cámaras de combustión Plana-CIMPA y Ward-CIMPA, diseñadas para operar con mayor eficiencia y en condiciones extremas de operación (55% humedad del bagazo).

**1.3.1.1. Cámara de combustión Plana-CIMPA.** Esta cámara es un diseño mejorado de la cámara tradicional, donde a diferencia de esta el bagazo se quema a una distancia prudente de la primera paila alcanzando mayores temperaturas de combustión en algunos casos superiores a 900°C; el bagazo suministrado a este tipo de cámara se caracteriza por presentar un bajo contenido de humedad.

Por lo general, una cámara de combustión Plana-Cimpa produce 7% Vol. de monóxido de carbono y entre 11 y 12% Vol. de dióxido de carbono, cuando se le suministra un bagazo seco (28% hum.) y un exceso de aire cercano al 60% del estequiométrico. Las dimensiones se determinan a partir de la energía requerida para el proceso y de la forma geométrica de las parrillas que se consiguen comercialmente; por lo general, son más largas que anchas y su altura está supeditada a la altura del ducto diseñado y su volumen comprende desde la puerta de alimentación hasta el final de la parrilla.

En la figura 4. Se presentan los partes principales de una cámara de combustión Plana-CIMPA.

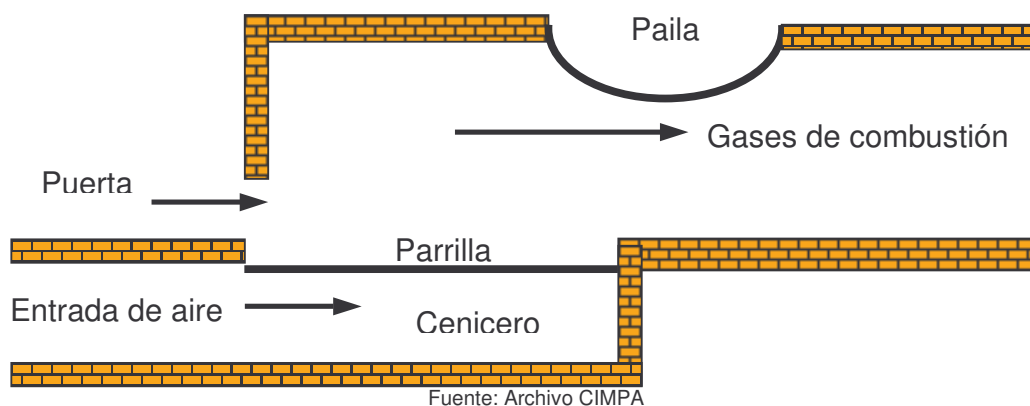


Figura 4. Cámara de combustión Plana-CIMPA.

**1.3.1.2. Cámara de combustión Ward-CIMPA.** Este tipo de cámara posee un diseño especial que aumenta la eficiencia de la combustión y del proceso, puesto que en ella se obtiene una mayor estabilidad en términos de temperatura y potencia con el tiempo.

Un cámara de este tipo puede alcanzar temperaturas cercanas a los 1200 °C, con una producción promedio de monóxido de carbono de 3% en volumen y de dióxido de carbono de 14% en volumen, cuando se le suministra un exceso de aire del 60% y una humedad promedio del bagazo del 40% (CIMPA - Mejoramiento de hornillas paneleras, 1991)

Este tipo de cámara presenta dos características especiales:

- En primer lugar, posee una rampa donde se precalienta el bagazo antes de quemarse, allí la humedad contenida en el bagazo se evapora por medio de la energía radiante proveniente de la masa de bagazo incandescente de la cámara; esta característica permite introducir incluso, bagazo recién salido del molino que por lo general contiene una humedad cercana al 55% en peso.
- En segundo lugar, el aire requerido para la combustión se suministra en dos corrientes: una de aire primario que circula a través de la parrilla y que corresponde al 70% del volumen total de diseño, y otra de aire secundario correspondiente al 30% restante, que se suministra en la parte superior de la cámara Ward por medio de tubos cilíndricos, (GODILLO Y GARCÍA, 1992). El aire primario se utiliza en la combustión del coque en la zona de oxidación y reducción del lecho de bagazo, y el aire secundario se usa para la combustión de los volátiles sobre el lecho de bagazo.

En la figura 5. se observan con claridad los componentes característicos de una cámara Ward-CIMPA.

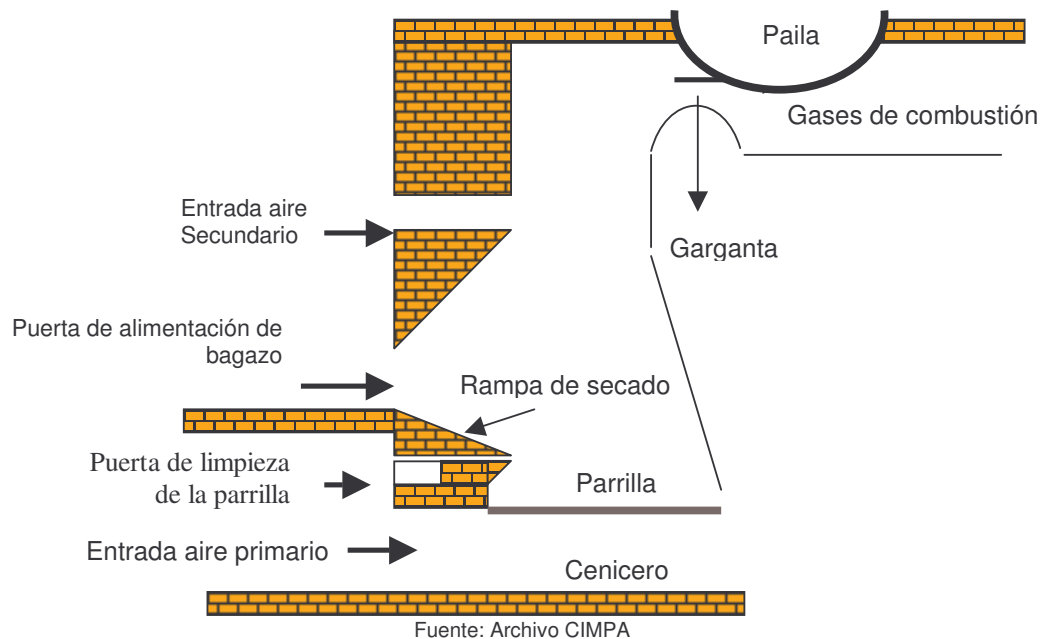


Figura 5. Cámara de combustión Ward-CIMPA.

Además, en una cámara Ward-CIMPA se presentan dos secciones bien diferenciadas tenidas en cuenta en el momento del diseño y construcción: la zona inferior denominada *cámara primaria*, que corresponde al espacio comprendido entre la parrilla y la línea de entrada de aire secundario, y la zona superior denominada *cámara secundaria*, que corresponde al espacio comprendido entre la entrada del aire secundario y la garganta.

**1.3.1.3. Diseño de cámaras de combustión.** La forma geométrica de las cámaras de combustión no varía de una cámara a otra, es decir, en cualquier cámara diseñada por CIMPA se conservan las proporciones geométricas de diseño estipuladas para cada tipo de cámara; estas proporciones se presentan en detalle en los anexos A y B.

Las dimensiones de la cámara varían de acuerdo a la capacidad de producción para la cual se diseña la hornilla; estas dimensiones se calculan a partir de los parámetros básicos de diseño, relacionados con el área de la parrilla y el volumen de la cámara, propuestos por el CIMPA (GORDILLO Y GARCÍA, 1992):

Factor parrilla:	1000 kW/m <sup>2</sup>
Área libre:	50%
Factor del volumen:	300 kW/m <sup>3</sup>

De acuerdo con estos parámetros, el área de la parrilla y el volumen de la cámara se calculan por medio de las ecuaciones 1.10 y 1.11:

$$A_{parr} = \frac{\text{Potencia\_de\_la\_hornilla}(kW)}{1000} \quad \text{Ec. 1.10}$$

$$V_{cam} = \frac{\text{Potencia\_de\_la\_hornilla}(kW)}{300} \quad \text{Ec. 1.11}$$

Donde:

$A_{parr}$  = Área de la parrilla, m<sup>2</sup>  
 $V_{cam}$  = Volumen de la cámara, m<sup>3</sup>

Además, en el diseño y construcción de la cámara se deben tener en cuenta las siguientes recomendaciones (GORDILLO Y GARCÍA, 1992):

Longitud de la cámara = Longitud de la parrilla + 0.10 (m)

Ancho cámara = Ancho parrilla + 0.20 (m)

Por otra parte, el tamaño del cenicero se diseña de acuerdo al área de la cámara, debe tener la capacidad suficiente para almacenar la ceniza producida en una semana de operación y garantizar la facilidad de acceso a los operarios para su limpieza

**1.3.2. Área de transferencia de calor.** En el área de transferencia de calor, se lleva a cabo la concentración de los jugos hasta el punto de panela; esta zona la conforman el ducto y las pailas.

El ducto se construye en ladrillo refractario, de diversas formas geométricas según el criterio del diseñador, puede tener una o dos paredes con el fin de aislar el ducto para mejorar la eficiencia del proceso según el presupuesto del diseño;

Las pailas son recipientes abiertos que se construyen frecuentemente en acero inoxidable, en ellas se vierten los jugos y dependiendo de su función y posición en la hornilla, se determina el tipo de paila que debe utilizarse; CIMPA ha investigado diversos tipos de pailas paneleras entre las que se destacan las semiesféricas, semicilíndricas, planas, aleteadas y pirotubulares, todas estas en su mayoría se utilizan en una hornilla panelera al mismo tiempo en posiciones específicas. El diseño, características y esquema general de cada una de estas pailas se presenta en el anexo C.

Las pailas se disponen sobre y a lo largo del ducto, dejando un espacio libre entre ellos por donde circulan los gases calientes provenientes de la cámara de combustión; de esta manera se transfiere calor por convección hacia las pailas y por radiación hacia los jugos; también se transfiere calor por conducción a las paredes del ducto y por radiación de los gases calientes

hacia la atmósfera, estos últimos se consideran las pérdidas energéticas más significativas del proceso.

Al final del ducto se encuentra la chimenea, por donde circulan los gases antes de abandonar la hornilla; generalmente en la base de la chimenea los gases circulan a una temperatura de 300 °C, cuando la eficiencia energética de la hornilla es del 65% (CIMPA - Mejoramiento de hornillas paneleras, 1991).

**1.3.3. Propiedades y características de combustibles biomásicos.** Las propiedades de importancia de todos los biocombustibles, son las físicas, químicas, termodinámicas y propiedades de transporte; entre estas se encuentran la gravedad específica, porosidad o volumen vacío, contenido de humedad, composición química con énfasis en el análisis elemental, contenido de trazas de metales, valor calorífico, conductividad térmica, calor específico o capacidad calorífica, y temperatura de fusión de la ceniza (TILLMAN, 1991)

**1.3.3.1. Propiedades físicas de la biomasa.** Las propiedades físicas de mayor importancia en el análisis de combustibles son el contenido de humedad, la gravedad específica, y la porosidad.

- **Contenido de humedad.** El contenido de humedad es expresado como una fracción másica sobre una base total o una base de masa seca:

$$MC_t = \frac{W_{H_2O}}{(W_{H_2O} + W_{df})} \quad \text{Ec. 1.12}$$

$$MC_t = \frac{W_{H_2O}}{W_{df}} \quad \text{Ec. 1.13}$$

Donde,  $W_{H_2O}$  es el peso del agua (lb, kg) y  $W_{df}$  es el peso de la fibra seca.

Las fracciones másicas multiplicadas por 100, son los porcentajes de la humedad en peso. El contenido de humedad en los combustibles de la biomasa depende del tipo de combustible, del proceso de que provengan y del tiempo de almacenamiento. Por lo general, el bagazo de caña contiene un 55% de humedad en peso al salir del molino y puede alcanzar un 23% de humedad, almacenado bajo techo por un período de dos meses en clima templado (25 °C).

- **Gravedad específica.** La gravedad específica es un término adimensional definida como:

$$S = \frac{(W_f/V_F)}{(W_{H_2O}/V_{H_2O})} \quad \text{Ec. 1.14}$$

donde,  $W_f$  es el peso de cualquier combustible (u otro material) y  $V_F$  es el volumen de ese combustible. La gravedad específica incide directamente en la porosidad o volumen vacío, calor específico, conductividad térmica y densidad aparente para el manejo del material.

Para los combustibles biomásicos que son altamente higroscópicos, la gravedad específica se puede expresar de tres maneras:

- a.  $S_{o,o}$ : Gravedad específica sobre volumen seco y masa seca.
- b.  $S_{o,a}$ : Gravedad específica sobre masa seca y aire seco
- c.  $S_{o,g}$ : Gravedad específica sobre masa seca y volumen húmedo

Para propósitos de cálculo, se tienen las siguientes ecuaciones:

$$S_{o,o} = W_{od}/V_{H_2O} \quad \text{Ec. 1.15}$$

$$S_m = (W_{od}/V_m)/\rho_m \quad \text{Ec. 1.16}$$

Donde,  $W_{od}$  es el peso de la biomasa en base seca,  $V_{H_2O}$  es el volumen de agua desplazada,  $S_m$  es la gravedad específica en algún contenido de humedad  $m$ ,  $V_m$  es el volumen de agua desplazado cuando la biomasa tiene un contenido de humedad  $m$ , y  $\rho_m$  es la densidad del agua. Si  $S_{o,o}$  se conoce, al igual que el contenido de humedad, entonces  $S_m$  o  $S_{o,g}$ , se puede calcular como:

$$S_{o,g} = (MC_g/100) + [1-/MC_g/100)*S_{o,o}] \quad \text{Ec. 1.17}$$

Donde,  $MC_g$  es el porcentaje de humedad del material con base al peso total y el volumen de la muestra es expresado en base humedad.

- **Porosidad.** La porosidad es la última propiedad física de importancia para los combustibles biomásicos. La oxidación del carbón es una difusión controlada e influenciada por la porosidad del combustible, particularmente entre 820 – 1100 °C, y es la limitante en el proceso de combustión. Para biomasa seca, la porosidad puede calcularse mediante la siguiente fórmula:

$$FVV = \frac{(1-S_{o,o})}{1.50} \quad \text{Ec. 1.18}$$

El valor 1.5 es el promedio de las densidades de pared celular; de esta ecuación (Ec.1.18) se determina que para la biomasa, después del

secado y antes de las reacciones de pirolisis, se puede tener una porosidad equivalente en volumen al 23% del combustible.

**1.3.3.2. Propiedades químicas de la biomasa.** Los combustibles biomásicos son materiales parcialmente oxigenados, representados por la siguiente fórmula empírica:

$$Biomasa = C_{3.3-4.9}H_{5.1-7.2}O_{2.0-3.1} \quad \text{Ec. 1.19}$$

Las características químicas de esos combustibles son descritas por análisis sumativo, análisis próximo y análisis último

- **Análisis sumativo.** Hace relación a los componentes presentes en el combustible; el bagazo esta compuesto de hemicelulosa, lignina y ciertos extractos, tal como se describen en la tabla 2.

Tabla 2. Principales componentes químicos del bagazo de caña

Componente	
Celulosa	
La hemicelulosa	Galactoglucomanosa Arabinoglucoronoxilano Arabinogalactano Glucoroxilano Glucomanosa
Liginina	
Extractos	Componentes alifáticos Terpenos y terpenoides Componentes fenólicos

Fuente: Tillman(1991)

La celulosa y la hemicelulosa están agrupados como holocelulosa, y ellos son los componentes primarios de la pared celular de la biomasa. Esos componentes generalmente se representan por las siguientes fórmulas químicas empíricas:

- Celulosa:  $C_6H_{10}O_5$
- Hemicelulosas:  $C_5H_8O_4$
- Lignina  $C_9H_{10}(OH)_{0.9-1.7}$

Generalmente, las hierbas, la cascarilla de arroz, o el bagazo de la caña de azúcar, contiene alrededor de 25-40% de celulosa, 25-50% de hemicelulosa, y 10-30% de lignina

- **Análisis próximos y último:** Convencionalmente, los combustibles sólidos son caracterizados por el análisis próximo y el análisis último;

estos análisis reportan la composición aproximada y exacta respectivamente del combustible en base seca.

La composición química del bagazo seco determinada por análisis próximo, varía ligeramente de acuerdo con los siguientes autores, como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Composición química del bagazo.

	N. Deer	Tromp	Kelly	Kersten
Carbono (C)	46.5	44	48.5	47.5
Hidrógeno (H)	6.5	6	6	6.1
Oxígeno (O)	46	48	43.3	44.4
Cenizas ( $\xi$ )	1	2	2.2	2
	100	100	100	100

Fuente: HUGOT, 1982

La variación entre las cifras anteriores no es muy grande y es posible basar los cálculos en los valores promedios de la tabla 4.

Tabla 4. Composición del bagazo.

C = 47%
H = 6.5%
O = 44%
$\xi$ = 2.5%
100%

- **Composición de la ceniza.** Los principales componentes de las cenizas contenidas en los combustibles biomásicos son:  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}_4$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{SO}_3$  y  $\text{Cl}$ .

Además, estudios concernientes a la composición de la ceniza han demostrado la presencia de trazas metálicas de: boro, manganeso, hierro, molibdeno, cobre, zinc, plata, bario, cobalto, cromo, níquel, plomo, antimonio y titanio; también se encontró aproximadamente 2.5 partes por millón en peso (ppmw) de cobre, 0.23 ppmw de plomo, 0.9 ppmw de zinc, 0.05 ppmw de cromo, 0.11 ppmw de níquel, y 0.12 ppmw de plomo en la biomasa, (Tillman, 1991)

**1.3.3.3. Propiedades termodinámicas y de transporte de los biocombustibles.** Las propiedades termodinámicas y de transporte de los combustibles biomásicos incluyen, valor calorífico (Superior e inferior), conductividad térmica, y calor específico. También se considera la fusión de la ceniza

- **Valor calorífico.** Generalmente, se determinan dos tipos de poder calorífico de los combustibles: uno denominado Valor Calorífico Superior, que tiene en cuenta el calor aprovechado si los productos de combustión

salieran a la temperatura de referencia del proceso, y otro denominado Valor Calórico Inferior, que tiene en cuenta el calor real aprovechado considerando que el agua producido por la combustión del hidrógeno y el agua contenida en el combustible sale en forma de vapor.

El *valor calórico superior* (HHV) para los combustibles biomásicos son del orden de 8500 – 9500 Btu/lb (4730 – 5280 kcal/kg), el rango es causado por la variación de carbono y el bajo contenido de hidrógeno. En ausencia de datos experimentales, el valor calórico superior puede estimarse mediante la fórmula de Dulong, (HOUGEN, 1954):

$$HHV_{Btu/lb} = 14490 * C + 61000 * H + 5550 * S \quad \text{Ec. 1.20}$$

Donde C, H, y S son las fracciones en peso de carbono, hidrógeno y azufre en el combustible. Una ecuación similar puede construirse para medidas métricas. Si el contenido de hidrógeno y oxígeno contenidos en la humedad se reportan en el hidrógeno y oxígeno del análisis último, la fórmula de Dulong, se expresa como sigue:

$$HHV_{Btu/lb} = 14440 * C + 61020 * H + 5550 * S - 6590 * O - (39 * O)^2 \quad \text{Ec. 1.21}$$

Donde O es la fracción en peso del contenido de oxígeno en el combustible. Un tercer método de cálculo es la fórmula de Dulong-Berthelot:

$$HHV_{Btu/lb} = 81370 + 3.45[\%H - (\%O + \%N - 1)/8] + 22.2(\%S) \quad \text{Ec. 1.22}$$

Donde el contenido en el combustible de hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, y azufre se expresan en porcentaje y base seca. En el caso del bagazo, a pesar de las diferencias que en apariencia tienen las diversas variedades de caña, el valor calórico superior del bagazo seco es notablemente constante en todos los países y en todas las variedades de caña; esto se observa en los datos reportados en la tabla 5.

Tabla 5. Valor calórico superior del bagazo seco.

Autor	País	Referencia	V.C.S. del bagazo seco (BTU/lb)
Behne	Quensland	ISJ. (1935) P.160	8177
Hedley	Sudáfrica	ISJ. (1936) P.349	8253
Gregory	Cuba	FAS (1944) P. 26	8444
Gregory	Puerto Rico	FAS (1944) P. 26	8270
	Medio		8293

Fuente: HUGOT, 1982

Puede verse que no se cometerá un error de mas del 2% al tomar un valor calórico superior del bagazo seco de:

$$H.H.V = 8280 \text{ BTU/lb} = 4600 \text{ kcal/kg}$$

Es útil considerar el *Valor Calórico Inferior* (LHV) del combustible, debido a que las biomazas contienen humedades cercanas al 55% en peso, este valor representa la energía que realmente se puede capturar de un proceso de combustión y se puede calcular por la siguiente ecuación:

$$LHV_{\text{Btu/lb}} = HHV_{\text{Btu/lb}} - \left[ (1050 * MC_f) + (9 * H * 1050) \right] \quad \text{Ec. 1.23}$$

Donde  $MC_f$  es la fracción de humedad del combustible.

Según la composición promedio del bagazo reportada en la tabla 3, el contenido el valor calórico inferior del bagazo seco es el siguiente:

$$L.H.V = V.C.S, - (0.065 \times 9720) = 8280 - 630$$

$$L.H.V = 7650 \text{ BTU/lb} = 4250 \text{ kcal/kg}$$

En la práctica, el bagazo alimentado a las cámaras de combustión no esta seco, por esta razón el Valor calorífico del bagazo húmedo (V. C. Bh) se debe calcular a partir, de las siguiente ecuaciones:

$$V.C.Bh. = 8280 - 82.8 * \%Hum - 82.8 * \% \xi \quad \text{[BTU/lb]} \quad \text{Ec. 1.24}$$

$$V.C.Bh. = 19300 - 193 * \%Hum - 193 * \% \xi \quad \text{[kJ/kg]} \quad \text{Ec. 1.25}$$

Donde, %Hum es el porcentaje de humedad en el combustible en peso y %  $\xi$  es el porcentaje de cenizas en el combustible.

- **Conductividad térmica.** La conductividad térmica determina la velocidad con la cual es calor es transportado desde la superficie al interior de la partícula, y consecuentemente es la variable que gobierna el calentamiento, el secado y la iniciación de la pirolisis. La conductividad térmica es función de la gravedad específica y el contenido de humedad, y se calcula como (TILLMAN, 1991):

Para biomasa con menos del 30% de humedad en peso:

$$k = S_{o,g} (1.39 + 0.028 * MP_{od}) + 0.165 \quad \text{Ec. 1.26}$$

Para biomasa con humedad mayor al 30% en peso:

$$k = S_{o,g} (1.39 + 0.038 * MP_{od}) + 0.165 \quad \text{Ec. 1.27}$$

Donde  $k$ , es la conductividad térmica en Btu-in/hr-°F y  $MP_{od}$  es el porcentaje de humedad del combustible de la biomasa expresado en base seca.

Como la humedad abandona la partícula de combustible y es reemplazada por un compuesto gaseoso, la conductividad de la partícula decrece y hace que la transferencia de calor desde la superficie al centro incremente en dificultad. Similarmente, como la gravedad específica incrementa (porosidad disminuye), la transferencia de calor al centro de la partícula mejora.

- **Calor específico.** El calor específico gobierna la energía requerida para alcanzar las condiciones a la temperatura de reacción. Para biomasa seca la ecuación general es la siguiente:

$$H_{sp,g} = \frac{M + (0.266 + 0.00116t)}{(1 + M) + A} \quad \text{Ec. 1.28}$$

Donde  $t$  está en °C,  $M$  es la fracción de humedad contenida en el combustible,  $A$  es el calor específico adicional debido al hidrógeno aportado por la humedad en el combustible.  $A$  puede variar entre 0.02 y 0.09 como función de la temperatura y humedad de la biomasa entre el 0 y 30%.  $A$  puede estimarse aproximadamente por medio de la siguiente ecuación:

$$A = 0.006t + 0.0018MC - 0.0591 \quad \text{Ec. 2.29}$$

donde,  $t$  está en °F y  $MC$  es el porcentaje de humedad en el combustible.

- **Punto de fusión de la ceniza.** En sistemas de lecho fijo es muy importante tener en cuenta este parámetro, puesto que si la ceniza inherente en el combustible funde, al disminuir la temperatura, ésta se solidifica obstruyendo la entrada de aire requerido para la combustión; un valor promedio del punto de fusión para las diferentes biomásas es de 1200°C (TILLMAN, 1991).

Además, para el caso de la combustión del bagazo en lecho fijo con parrilla estacionaria, existe un efecto directamente relacionado con la fusión de la ceniza, con el jugo remanente y las impurezas presentes en el combustible; estos tres componentes conforman sobre la parilla, una estructura sólida porosa, de color oscuro, denominado *escoria*, que en una hora de operación de un horno up-draft puede alcanzar hasta un centímetro de espesor. Salvi G. (1975), define la escoria como un material químicamente absorbido fruto de la reacción heterogénea de

combustión vinculada esencialmente al proceso de absorción de oxígeno y repulsión de los productos de la reacción.

En la figura 6, se puede observar la parrilla de un horno up-draft en operación, en la cual se aprecia la formación de escoria sobre su superficie después de un corto periodo de operación.



Fuente: Investigación de los autores

Figura 6. Parrilla de un horno up-draft.

**1.3.4. Temperaturas asociadas con la combustión de biomasa.** Los factores dominantes en la temperatura alcanzada son el poder calórico del combustible, la razón estequiométrica de oxígeno a carbón e hidrógeno, el contenido de humedad y de ceniza del combustible, la composición y temperatura del oxidante. Con relación a esto se han demostrado ciertos comportamientos:

- a) Cada incremento en el porcentaje del exceso de aire reduce la temperatura de llama adiabática cerca de  $5.6^{\circ}\text{C}$ .
- b) Cada incremento en el porcentaje de la humedad del combustible reduce la temperatura de llama adiabática cerca de  $0.6 - 1.2^{\circ}\text{C}$ , y
- c) Cada grado de aire precalentado sobre  $25^{\circ}\text{C}$  incrementa la temperatura de llama adiabática cerca de  $0.6^{\circ}\text{C}$

Fundamentalmente, la temperatura de llama adiabática se puede calcular por las siguientes ecuaciones derivadas del modelo del modelo de Gordon-McBride, (TILLMAN, 1991):

$$T_f = 3870 - 15.6MC_g - 130.4EO_2 + 0.59(A - 77) \quad \text{Ec. 1.30}$$

$$y \\ T_f = 695 - 10.1MC_g + 1734(1/SR) + 0.61(A - 298) \quad \text{Ec. 1.31}$$

Donde  $T_f$  es la temperatura de llama adiabática en  $^{\circ}\text{F}$ ,  $MC_g$  es el porcentaje de humedad en el combustible,  $EO_2$  es el exceso de oxígeno es el gas de salida, expresado en base total, no en base seca,  $A$  es la temperatura del aire de combustión y  $SR$  es la razón estequiométrica.

Las dos últimas ecuaciones demuestran que generalmente los biocombustibles queman con temperaturas de llama más bajas que los combustibles fósiles, que en esas temperaturas inciden diluyentes como la

humedad y que tales temperaturas de llama son gobernadas por la cantidad, composición, y temperatura del oxidante o del aire de combustión

**1.3.5. Proceso de combustión en una hornilla panelera.** En el proceso actual, la combustión que se lleva a cabo en una hornilla panelera tiene las siguientes características: el combustible alimentado a la cámara de combustión es bagazo de la caña generado como residuo en la etapa de extracción del jugo; el proceso es continuo durante la molienda, el sistema opera a tiro natural (lecho up-draft), y la alimentación del bagazo a la cámara es manual y por lotes o cochadas.

**1.3.5.1. Balance de masa de la combustión sin exceso de aire.** La composición química del bagazo determinada por el análisis último del bagazo (Tabla 3) y las proporciones estequiométricas de las reacciones de la combustión (Ec. 1.3 – 1.9 de la Tabla 1) permiten calcular la cantidad de aire mínima requerida para la combustión de bagazo seco o húmedo mediante la ecuación 1.34:

$$A_{\min} = \frac{1}{0.209} \left( \frac{P_C}{12} + \frac{P_H}{4} - \frac{P_O}{32} \right) B \quad \text{Ec. 1.32}$$

Para el bagazo seco se tiene:

$$A_{\min} = \frac{1}{0.209} \left( \frac{0.47}{12} + \frac{0.065}{4} - \frac{0.44}{32} \right) B \quad \text{Ec. 1.33}$$

$$A_{\min} = 0.19936 * B \text{ [kmol/kg]} \quad \text{Ec. 1.34}$$

Donde:

$A_{\min}$  = Aire mínimo requerido para quemar B kilogramos de bagazo seco

$P_C$  = Cantidad de carbono en un kilogramo de bagazo

$P_H$  = Cantidad de hidrógeno en un kilogramo de bagazo

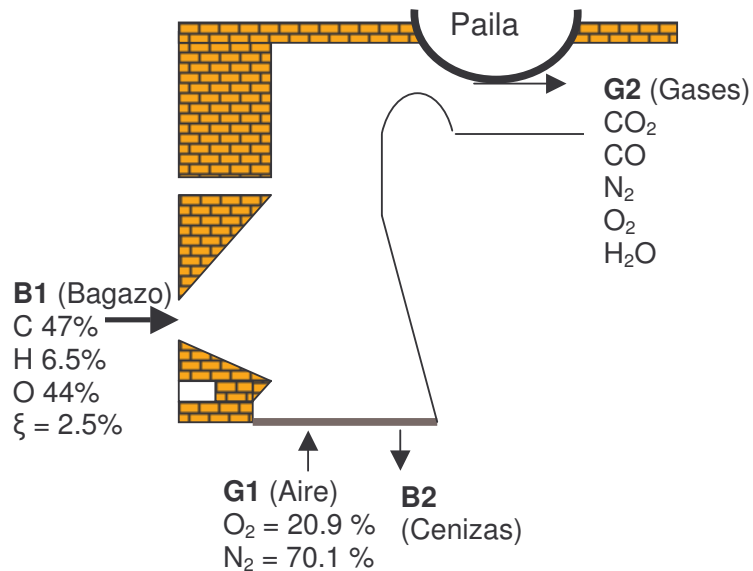
$P_O$  = Cantidad de oxígeno en un kilogramo de bagazo

Un parámetro importante, para los cálculos del balance de masa es el lambda ( $\lambda$ ), que es la relación de exceso de aire, definido como:

$$\lambda_{\text{aire}} = \left( \frac{\text{Aire}_{\text{real}} - A_{\text{teórico}}}{A_{\text{teórico}}} \right) * 100 \quad \text{Ec. 1.35}$$

Donde, el  $\text{Aire}_{\text{real}}$  es el aire que se suministra a la cámara en kilogramos,  $A_{\text{teórico}}$  es el aire mínimo para la combustión en kilogramos, y  $\lambda_{\text{aire}}$  es el parámetro de exceso de aire.

**1.3.5.2. Balances de masa elementales.** Los balances de masa de cada componente, se expresan en moles y base seca (Análisis Orsat). En la figura 7, se generalizan los flujos de masa para las dos cámaras de combustión.



Fuente: Archivo CIMPA

Figura 7. Esquema de Balance de masa en la cámara Ward-CIMPA.

**a. Balance molar de Carbono.**

$$\frac{0.47B1}{12} - G2(\gamma_{CO_2} + \gamma_{CO}) = 0 \quad \text{Ec. 1.36}$$

**b. Balance molar de Hidrógeno.**

$$0.065B1 - 2(H_2O)_{Formada} = 0 \quad \text{Ec. 1.37}$$

**c. Balance de Oxígeno.**

$$\frac{0.44B1}{16} + 2(0.209)G1 - (2\gamma_{O_2} + \gamma_{CO} + 2\gamma_{CO_2})G2 - (H_2O)_{formada} = 0 \quad \text{Ec. 1.38}$$

**d. Balance de Nitrógeno.**

$$0.791G1 - \gamma_{N_2}G_2 = 0 \quad \text{Ec. 1.39}$$

Y la sumatoria de las fracciones volumétricas:

$$1 - \gamma_{CO_2} - \gamma_{CO} - \gamma_{O_2} - \gamma_{N_2} = 0 \quad \text{Ec. 1.40}$$

Donde,

- B1 = Flujo de combustible, kg/h
- G1 = Flujo de aire, kmol/h
- G2 = Flujo de gases de combustión, kmol/h
- $\gamma$  = Fracción de los gases de combustión, mol

**1.3.5.3. Balance de energía.** Los gases obtenidos en la combustión del bagazo, pueden alcanzar una temperatura teórica, calculada a partir de un balance de energía en la cámara de combustión:

$$Q_{entra} - Q_{sale} + Q_{generado} = Q_{Acumulado} \quad \text{Ec. 1.41}$$

donde, Q es el calor, [kj/kg], reemplazando obtenemos:

$$B1 \int_{T_{base}}^{T_{amb}} Cp_{Bagazo} dT + G1 \int_{T_{base}}^{T_{amb}} Cp_{Aire} dT - \left( G2 \int_{T_{base}}^{T_{combustion}} Cp_G dT + m_{H_2O_{gases}} \lambda_{H_2O} \right) - B2 \int_{T_{base}}^{T_{ceniza}} Cp_{Aire} dT + Q_{Generado} = Q_{Acumulado}$$

Ec. 1.42

**1.3.5.4. Eficiencia energética de la cámara de combustión.** La eficiencia de la cámara se define como la razón entre la energía entregada al proceso (contenido entalpico de los gases de combustión de combustión) y la energía suministrada a la cámara (Valor calórico del bagazo húmedo mas el calor sensible del aire)

$$\eta = \frac{\text{energía\_obtenida}}{\text{Energía\_suministrada} + \text{energía\_aire}} \quad \text{Ec. 1.43}$$

Las energías se calculan de la siguiente manera:

- Energía obtenida =  $m_G Cp_{GT} T_G$
- Energía Suministrada = V. C. Bh
- Energía Aire =  $m_A Cp_A t$

Donde:

- $M_G$  = Flujo másico de los gases de combustión, [Kg/s]
- $Cp_{GT}$  = Capacidad calorífica de los gases a  $T_G$ , [KJ/Kg °C]
- $T_G$  = Temperatura medida de los gases de combustión, [°C]
- $M_A$  = Flujo másico de aire a la cámara de combustión, [Kg/s]
- $Cp_{AT}$  = Capacidad calorífica del aire a  $T_A$  [KJ/Kg °C]
- $T_A$  = Temperatura ambiente, [°C]
- V. C. Bh = Valor calórico del bagazo húmedo, [KJ/Kg]

**1.3.5.5. Balance de exergía.** La exergía es la medida máxima de la energía recuperable de un sistema en desequilibrio con el ambiente, al tenerse en cuenta los cambios de entalpía y los de entropía en el área de balance. También representa el trabajo aprovechable que el sistema puede entregar, el resto de la energía del sistema se denomina anergía y es energía no recuperable. La ecuación que representa la exergía específica es la siguiente:

$$E = H - H_0 - T_0(S - S_0) \quad \text{Ec. 1.44}$$

Donde:

E = Exergía. [KJ/Kg]

H = Entalpía. [KJ/Kg]

H<sub>0</sub> = Entalpía en las condiciones del ambiente. [KJ/Kg]

T<sub>0</sub> = Temperatura ambiente. [°C]

S = Entropía. [KJ/Kg °C]

S<sub>0</sub> = Entropía en las condiciones del ambiente. [KJ/Kg °C]

La eficiencia exergética E<sub>f</sub>, representa la relación entre el beneficio y el gasto exergético, en donde se incluyen las pérdidas que ocurren en los procesos o en los equipos debido a factores de irreversibilidad, estas pérdidas pueden ser por estrangulamiento, intercambio de calor, mezclas y reacciones químicas, principalmente, pérdidas de exergía que proporcionan una medida cuantitativa de la ineficiencia del proceso. Los cálculos de eficiencia exergética son indispensables para la optimización de instalaciones y procesos buscando la minimización de los costos de inversión y de operación.

Para el cálculo de la eficiencia exergética primero se debe plantear el balance exergético para el sistema de control en estudio con los respectivos flujos de exergía de entrada y salida, incluyéndose en el balance una variable que represente el valor de la pérdida de exergía *I*, el cual se despejara para ser incluido luego en la siguiente ecuación y así calcularse la eficiencia exergética del sistema analizado.

$$E_f = 100 - I \quad \text{Ec. 1.45}$$

Para la realización de un análisis exergético en la cámara de combustión de una hornilla panelera se debe tener en cuenta que la combustión libera la energía química del combustible en este caso del bagazo, la deposita como energía interna en la masa de gases resultantes de la combustión para ser utilizados en el proceso de transferencia de calor, procesos altamente irreversibles y con grandes pérdidas de exergía<sup>2</sup>.

---

<sup>2</sup> CENICAÑA, Manual de auditoría energética. Cali. 1998.

## **2. DESARROLLO EXPERIMENTAL**

En este capítulo inicialmente se describe el desarrollo experimental para la determinación de los parámetros de diseño y operación en las cámaras de combustión, seguido por el desarrollo experimental para el estudio de la formación de escoria en las parrillas y la implementación de un control de temperatura en la cámara de combustión Ward-CIMPA. Para cada desarrollo experimental se definieron las variables de evaluación, luego se muestra el diagrama de flujo de las configuraciones experimentales, seguido por la descripción de los montajes y por último la descripción de las pruebas experimentales.

La etapa experimental del proyecto se llevó a cabo en el Centro de Investigación para el Mejoramiento de la Agroindustria Panelera - CIMPA, localizado en Barbosa, Santander a 1520 msnm. Para el desarrollo de la investigación se construyeron dos hornillas paneleras prototipo, una con cámara de combustión tipo Ward-CIMPA y otra con cámara de combustión tipo Plana-CIMPA; para la construcción de ambas hornillas se tuvieron en cuenta las actuales herramientas de diseño desarrolladas por el CIMPA. En estas hornillas se realizaron experimentaciones comparativas, en donde variables del proceso de combustión del bagazo se mantuvieron constantes o se variaron deliberadamente para su estudio.

### **2.1. DESARROLLO EXPERIMENTAL PARA LA DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE DISEÑO Y OPERACIÓN DE LAS CÁMARAS DE COMBUSTIÓN.**

#### **2.1.1. Variables de evaluación.**

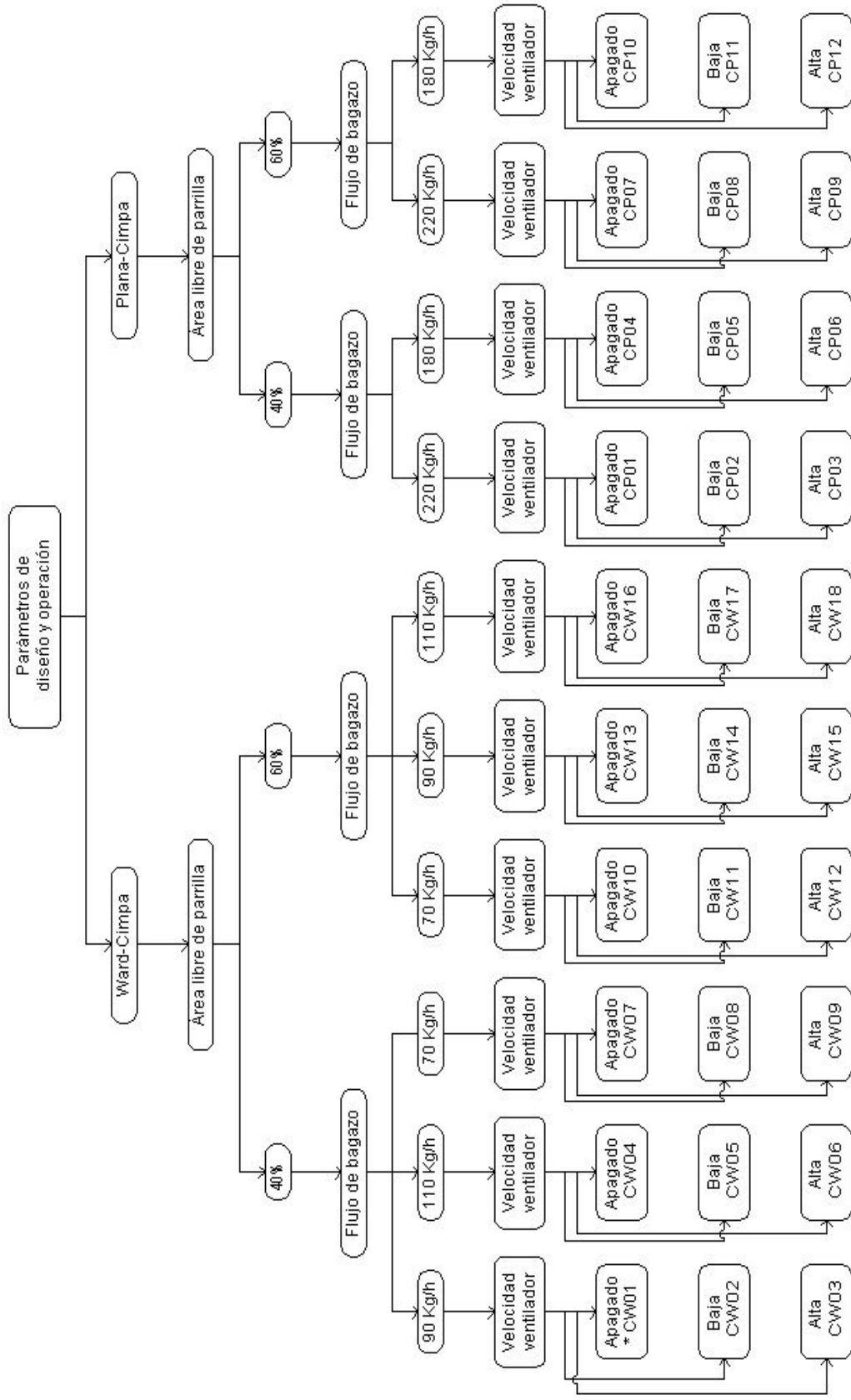
##### **Variables independientes:**

- Flujo de bagazo por hora.
- Área libre de Parrilla.
- Humedad del bagazo.
- Exceso de aire.

##### **Variables dependientes.**

- Temperatura de la cámara de combustión.
- Composición de los gases de combustión.
- Masa de agua evaporada.

**2.1.2. Diagrama de flujo de las experimentaciones.** En la figura 8, se muestra el diagrama de flujo de las distintas configuraciones experimentales para la determinación de los parámetros de diseño y operación de las cámaras Ward-CIMPA y Plana-CIMPA.



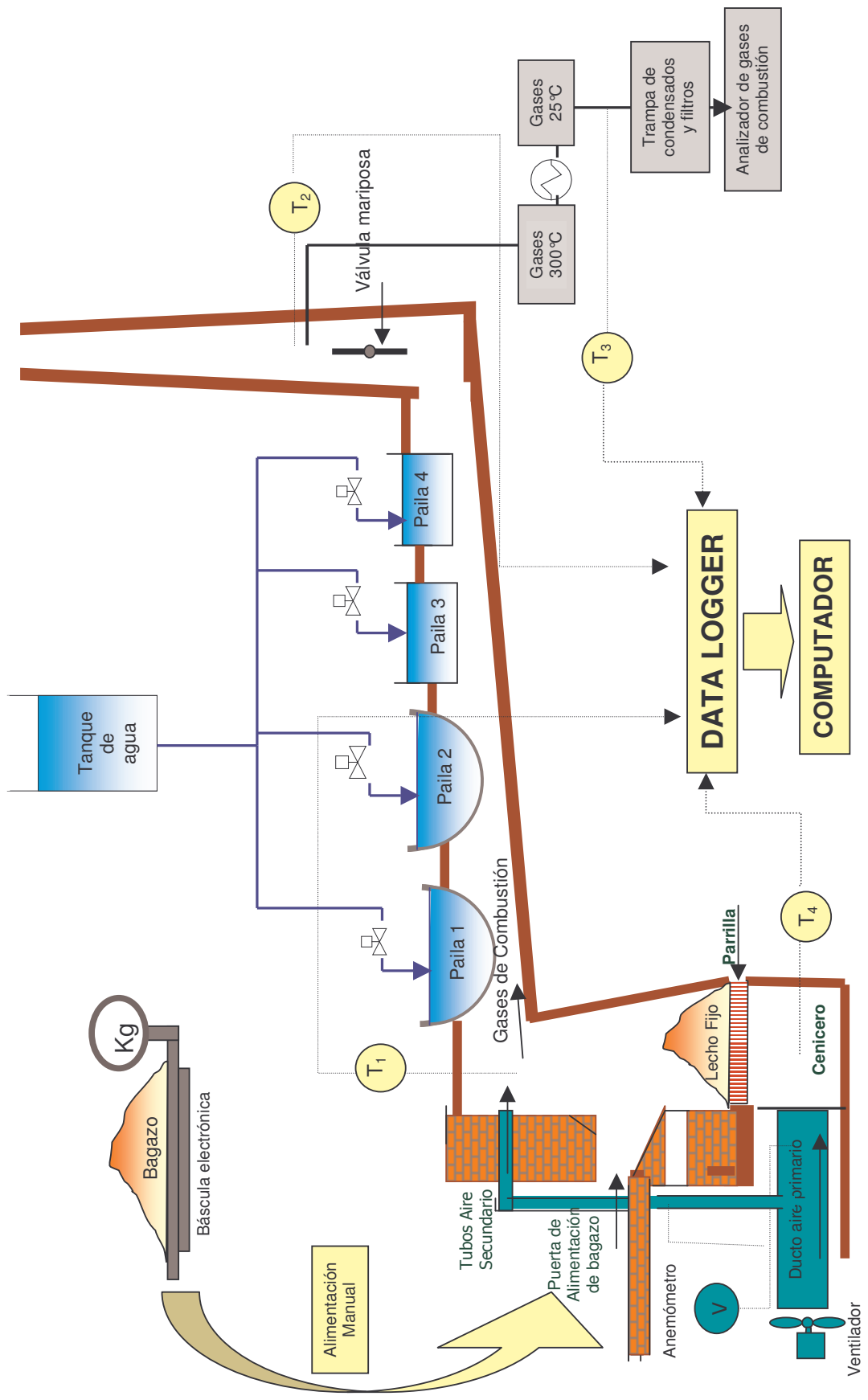
Fuente: Investigación de los autores.  
 \*Código de la configuración experimental.

Figura 8. Configuraciones experimentales para el estudio de los parámetros de diseño y operación.

### **2.1.3. Descripción de los montajes y equipos.**

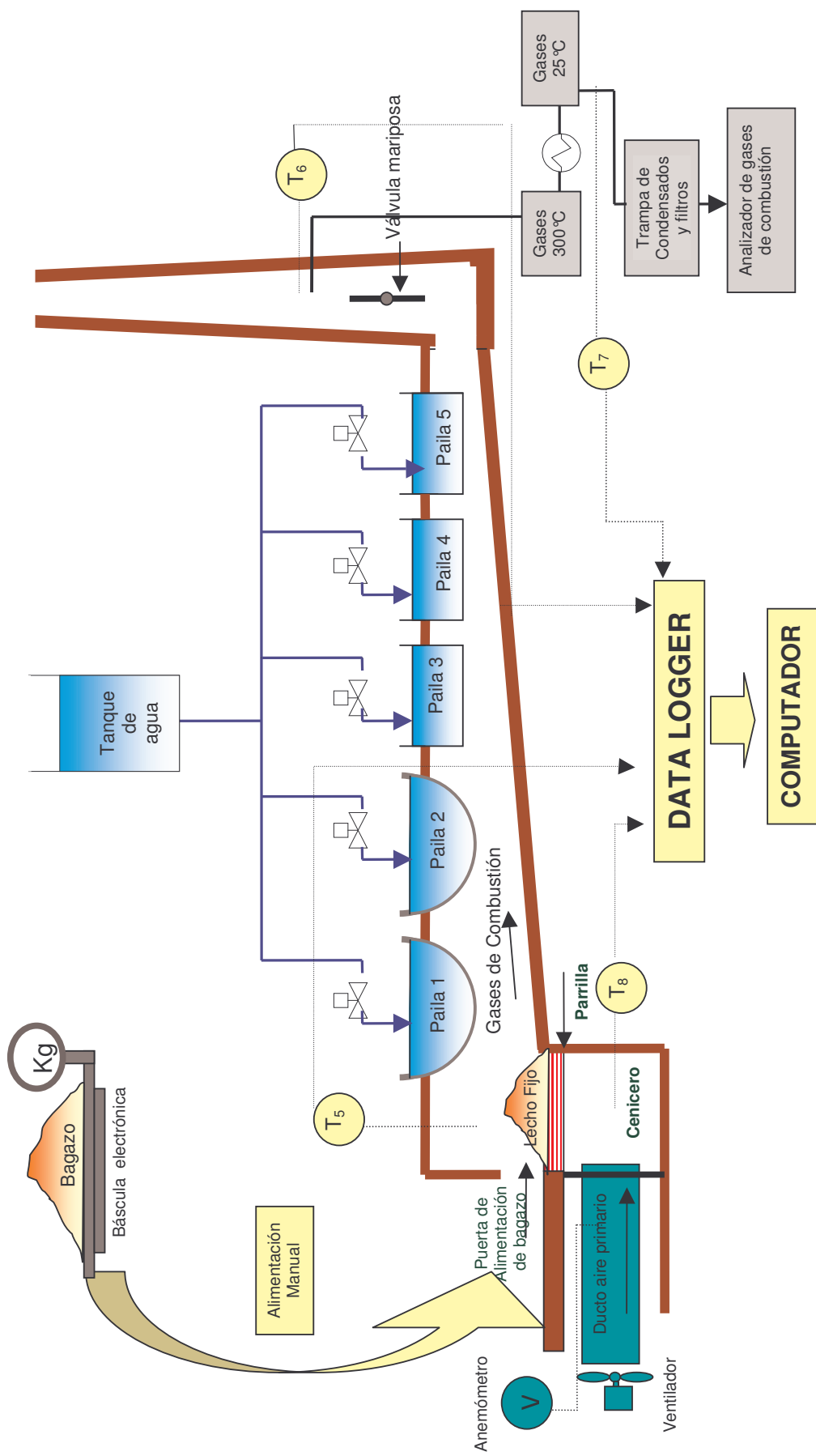
Los distintos componentes de los montajes experimentales y los puntos de monitoreo, para las hornillas prototipo con cámara de combustión Ward-CIMPA y Plana-CIMPA respectivamente, se pueden apreciar en las figuras 9 y 10, donde se diferencian el tipo de hornilla, cámara de combustión y parrilla, el sistema de pesaje, la determinación de humedad y alimentación de bagazo, el sistema de control de nivel de agua evaporada en las pailas, el sistema de enfriamiento, filtración y análisis de gases de combustión, el sistema de operación del ventilador y la red de registro de datos de temperatura.





Fuente: Investigación de los autores.

Figura 9. Esquema general de los equipos utilizados en la hornilla con cámara Ward-CIMPA.



Fuente: Investigación de los autores.

Figura 10. Esquema general de los equipos utilizados en la hornilla con cámara Plana-CIMPA

**2.1.3.1. Parámetros de las hornillas prototipo con cámara Ward-CIMPA y Plana-CIMPA.** En las tablas 6 y 7, se encuentran los parámetros de diseño de las hornillas con cámara de combustión Ward-CIMPA y Plana-CIMPA. La configuración de las pailas utilizada en orden ascendente desde la cámara de combustión hacia la chimenea fue para la Ward-CIMPA de dos semiesféricas y dos pirotubulares mientras que para la Plana-CIMPA fue de dos semiesféricas, una plana, una aleteada y una pirotubular. En el anexo C, se encuentran las características de las pailas utilizadas.

Tabla 6. Parámetros de diseño de la hornilla con cámara de combustión Ward-CIMPA.

<b>Hornilla Ward-CIMPA</b>	<b>Valor</b>
Capacidad panela	50 Kg/h
Eficiencia	48 %
Humedad del bagazo	45 %
Exceso de Aire	40 %
Temperatura Combustión	950 °C
Flujo de Bagazo	90 Kg/h
<b>Cámara de Combustión</b>	
Largo Parrilla	0.55 m
Ancho parrilla	0.47 m
Volumen de la Cámara	0.65 m
Ancho de la Cámara	0.67 m
Altura primera Cámara	77 m
Altura Segunda Cámara	70 m
Volumen Cámara	0.86 m <sup>3</sup>

Fuente: Archivo CIMPA

Tabla 7. Parámetros de diseño de la hornilla con cámara de combustión Plana-CIMPA.

<b>Hornilla</b>	<b>Valor</b>
Capacidad	100 Kg/h
Eficiencia	65 %
Humedad del bagazo	30 %
Exceso de Aire	60 %
Temperatura Combustión	800 °C
Masa de Bagazo	200 Kg/h
<b>Cámara de Combustión</b>	
Largo Parrilla	1.5 m
Ancho parrilla	0.65 m
Longitud de la Cámara	1.6 m
Ancho de la Cámara	0.7m
Altura Cámara	0.6m

Fuente: Archivo CIMPA

**2.1.3.2. Área libre de Parrilla.** Se experimentó con dos tipos de área libre de parrilla, 40% y 60%. El material utilizado para la construcción de las parrillas de la cámara Ward-CIMPA fue varilla de hierro cuadrada de 15 mm de espesor y varilla de hierro cilíndrica de 15 mm de espesor para las parrillas de la cámara Plana-CIMPA. Estas parrillas se sometieron a esfuerzos térmicos, mediante pruebas 4 pruebas preeliminares, operando las cámaras a flujos de bagazo de 110 Kg/h para la Ward-CIMPA y 220 Kg/h para la Plana-CIMPA durante 4 horas, sin que se presentaran deformaciones y agrietamientos en las parrillas, garantizándose un buen funcionamiento para las pruebas experimentales definitivas. En la figura 11, se pueden apreciar dos de las cuatro parrillas construidas.



Fuente: Investigación de los autores

Figura 11. Parrilla de 60% área libre de la cámara Plana-CIMPA (a) y parrilla de 40% área libre de la cámara Ward-CIMPA (b).

**2.1.3.3. Determinación de humedad, pesada y alimentación de bagazo.**

El bagazo fue el combustible utilizado en las pruebas preliminares y en la experimentación definitiva. Se consideró bagazo seco al que se encontrara con una humedad que oscilara entre el 20% y 35% y bagazo húmedo al que oscilara entre 36% y 55%. El bagazo utilizado para la combustión provenía de la combinación de variedades de caña panelera de la región como la POT, PR y la EPC. Siendo el tamaño del bagazo en promedio de 5 cm de largo por 2 cm de ancho.

La pesada de la cantidad de bagazo establecida por hora se realizó en una báscula electrónica de plataforma en acero inoxidable, con capacidad de 600 Kg, resolución 100 Kg a 220 V. Se pesaba cuatro veces por hora y este bagazo era alimentado manualmente a la cámara de combustión por una persona “atizador”, quien aproximadamente cada 3 minutos abría la compuerta y suministraba el bagazo a la cámara. Los flujos de bagazo se definieron de acuerdo con el dato de alimentación de diseño para cada tipo de hornilla, manejándose un margen del 30% por encima y por debajo del flujo de bagazo óptimo, para trabajar a condiciones límites.

Para determinar la humedad del bagazo se realizó un muestreo por cada una de las cuatro pesadas por hora que se realizaban para cada configuración

experimental, determinándose cuatro datos de humedad, para obtener un dato promedio por configuración. La humedad se determinaba en el laboratorio de fisicoquímica del Cimpa utilizando una Balanza analítica digital con capacidad de 110 Kg, resolución 0,001 gr a 110 V y una estufa para el secado del bagazo marca Blue M. Electronic, con un rango de operación de 30 a 65°C. En el anexo D, se encuentra la metodología para la determinación de humedad.

En la figura 12, se aprecian las compuertas de alimentación de bagazo para la cámara de combustión Ward-CIMPA y Plana-CIMPA respectivamente.



Fuente: Investigación de los autores

Figura 12. Compuertas de alimentación del bagazo de la cámara Ward-CIMPA (a) y de la Plana-CIMPA (b).

**2.1.3.4. Control de nivel de agua evaporada.** Se desarrollo un sistema de control de nivel de agua en las pailas para trabajar a condiciones de ebullición; para lo cual se desarrollo una estrategia de control por retroalimentación con un controlador On/Off.

El sistema de control consistía en sensar el nivel de agua en las pailas por medio de dos electrodos, los cuales al tener definido el set point, transmitían la señal a un integrado que abría o cerraba un circuito que alimentaba 110V a la válvula solenoide; cada válvula estaba conectada a un tanque de agua con un escala de nivel que facilitaba la medición de la cantidad de agua que se reponía a las pailas. Esta medición se realizaba cada 5 minutos. El plano de la protoboard utilizada se puede apreciar en el anexo E.

En la figura 13, se puede apreciar el montaje experimental del sistema de control de nivel de agua en las pailas para la hornilla con cámara Plana-CIMPA.



Fuente: Investigación de los autores

Figura 13. Sistema de control de nivel de agua en las pailas de la hornilla con cámara Plana-CIMPA.

**2.1.3.5. Enfriamiento, filtración y análisis de gases de combustión.** Las distintas composiciones de los gases de combustión se reportaron por medio de un analizador portátil de emisiones de gases marca HORIBA MEXA- Serie 554J, de las siguientes características: Rangos de operación CO: 0-10% vol, CO<sub>2</sub>: 0-20% vol, O<sub>2</sub>: 0-25% vol. Resolución: CO: 0.01% vol, CO<sub>2</sub>: 0.02% vol, O<sub>2</sub>: 0.02% vol. Condiciones de operación: 0-40 °C; 90% R.H. gases secos, a 110-220 V.

Las mediciones se realizaron en la chimenea de la hornilla y para ello se debió garantizar un flujo de gases a temperatura ambiente por medio de un serpentín hecho de un tubo de cobre de 2 m, el cual sumergido en agua reducía la temperatura de los gases de 350 °C a 25 °C, luego los gases se pasaban por un erlenmeyer con salida lateral adaptado para ser trampa del agua condensada y un tren de filtros con el fin de obtener gases secos y con un material particulado entre 5 – 10 µm. Se tomaron 30 datos por minuto aproximadamente.

En la figura 14, se aprecia el montaje experimental para la toma de datos de la composición de los gases de combustión con el analizador portátil.



Fuente: Investigación de los autores.

Figura 14. Montaje experimental para el análisis de gases de combustión.

**2.1.3.6. Sistema de variación de velocidad del ventilador.** Para esta investigación se trabajó con un ventilador de 5 aspas de 12 cm de largo cada una, por medio del cual se modificó el caudal de aire de entrada a la cámara de combustión y el exceso de aire, dejando fija la posición de la válvula mariposa, a  $90^\circ$  en abertura total.

Se trabajó con un motor Siemens, trifásico de 1.8 hp, 1450 rpm a 220 V, conectado por medio de una polea al eje del ventilador, el cual contaba con un polipasto de cuatro posiciones, las cuales generarían distintas rpm, como se puede apreciar en la tabla 7. Pruebas preliminares a flujos de bagazo de 70, 90, 110 Kg/h en la Ward y de 220 y 180 Kg/h en la Plana, definieron el polipasto, las posiciones de polea y el exceso de aire adecuado para trabajar, ya que por condiciones de diseño, la cámara Plana-Cimpa requería más aire teórico que la Ward-CIMPA, además si se excedía de 2000 rpm para la Plana-CIMPA y de 1400 rpm para la Ward-CIMPA se presentaría una combustión totalmente descontrolada.

Para la experimentación definitiva se trabajó a dos velocidades del ventilador, utilizando dos posiciones de eje que equivaldrían a una velocidad de ventilador alta VVA y otra baja VVA. El sistema trabajaría a tiro natural cuando el ventilador se encontrara de modo apagado. Las equivalencias de las rpm del motor del ventilador de acuerdo con la posición de la banda en el polipasto, para los dos tipos de cámara se encuentran en la tabla 8.

Tabla 8. Revoluciones del motor de acuerdo a la posición de la polea.

Cámara de Combustión	Posición de la polea	Velocidad del ventilador	Rpm del ventilador
Ward-CIMPA	1	BAJA	1035,7
Ward-CIMPA	2	ALTA	1208,3
Plana-CIMPA	3	BAJA	1450
Plana-CIMPA	4	ALTA	1812,5

Fuente: Investigación de los autores

El aire aportado por el ventilador se condujo a través de un ducto ubicado en el cenicero de la cámara, este ducto se elaboró en lámina de Zinc, con un largo de 3 m y un diámetro de 35.5 cm; para el aire secundario en la cámara Ward-CIMPA se dispuso de una tubería de PVC de 4,5 cm de diámetro, la cual salía lateralmente del ducto de aire primario hacia los orificios de aire secundario.

Para la implementación de este sistema se hizo necesario el diseño de un strainliners para la linealización del flujo de aire (según Norma ASTM 1258), se identificó el mejor punto de medición del caudal de aire con el anemómetro por medio de una calibración se encuentra en el anexo G. El sistema de ventilación se puede apreciar en la figura 15.

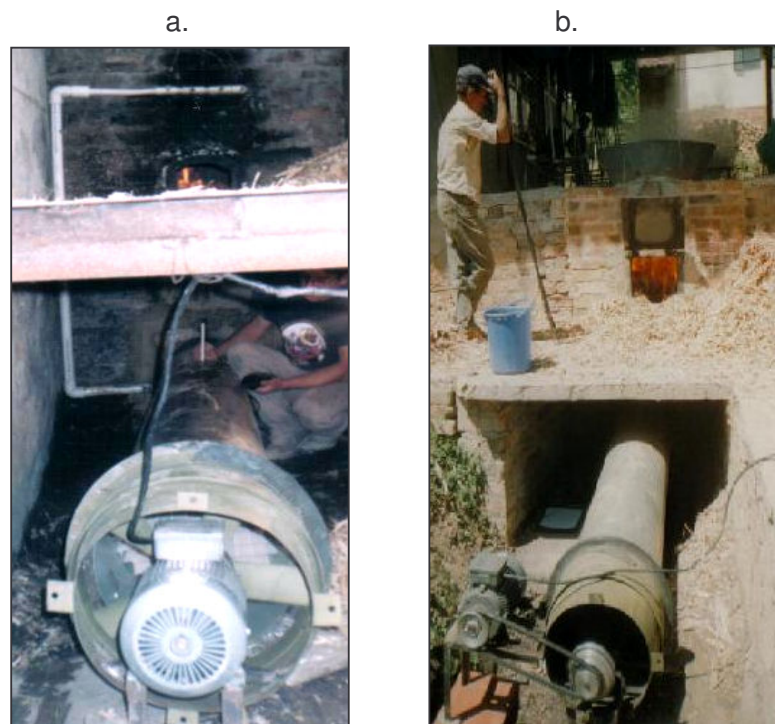


Fuente: Investigación de los autores

Figura 15. Sistema de ventilación.

El sensor utilizado para la medición de la velocidad del aire tanto para la calibración del ducto como para la experimentación en los dos tipos de cámaras de combustión fue un anemómetro marca TESTO 435 con sonda de molinete de 16 mm de diámetro, telescopio máximo de 720 mm. Rango de +0.6...+40m/s y una exactitud de  $\pm(0,2 \text{ m/s} \pm 5\% \text{ del v.m.})$ . Las mediciones se realizaban en el ducto cada 5 minutos.

En la figura 16, se puede apreciar los montajes experimentales del sistema de ventilación en la cámara Ward-CIMPA con su derivación al aire secundario (a), como en la Plana-CIMPA (b), respectivamente.



Fuente: Investigación de los autores

Figura 16. Montajes experimentales del sistema de ventilación en la Ward-CIMPA (a.) y en la Plana-CIMPA (b).

**2.1.3.7. Registro de datos de temperatura.** Para sensar las distintas temperaturas, de  $T_1$  a  $T_8$  (Figura 9 y 10), tanto en las cámaras de combustión como en el resto de la hornilla, se utilizaron termocuplas Tipo K, denominación Chromel vs. Alumel, composición NiCr-Ni, blindada en acero inoxidable 304-316, para un rango de temperaturas de 0 a 1300 °C, y fuerza electromotriz de 0-52,398 mV. El procedimiento para la calibración de las termocuplas se encuentra en el anexo H.

Las termocuplas daban una respuesta del diferencial del potencial generado por cada medida de temperatura, estas señales análogas se enviaban a un equipo registrador de datos llamado data logger multiplexor con 16 entradas análogas 4 digitales, quien reportaba los datos a un computador portátil cada dos segundos, por medio de un software llamado INCTECH 2000.

Las características del computador portátil fueron las siguientes: marca Toshiba, modelo Satellite Pro A10-103, procesador Celeron 2.4 GHz, RAM 256 Mb, disco duro de 30Gb, tipos de conexiones: VGA, PCMCIA, RJ45, RJ11, USB 2.0, sistema operativo WXP Home. En la figura 17 se observa el computador portátil y las conexiones de las termocuplas al data logger.



Fuente: Investigación de los autores

Figura 17. Sistema de registro de datos de temperatura: Computador, datalogger, conexiones de las termocuplas.

**2.1.4. Descripción de las pruebas experimentales.** Los distintos componentes de los montajes experimentales se adecuaban con anterioridad a las pruebas, primero que todo cerciorándose del taponamiento de las distintas grietas que pudiesen ocasionar filtraciones o escapes, en toda la hornilla, luego se verificaba el buen funcionamiento de los montajes:

Para los controles de nivel de agua en las pailas se revisaba su buen funcionamiento y se llenaban con agua las pailas hasta fijar su set-point, se revisaba la polaridad correcta y posicionamiento adecuado en los respectivos orificios a lo largo de la hornilla de las termocuplas. Para el sistema de ventilador se cercioraba de la no presencia de escapes y del buen funcionamiento del anemómetro. Para el sistema de análisis de gases se revisaba el buen posicionamiento del tubo de cobre que se introducía a la chimenea, la no presencia de escapes en la manguera, en el serpentín de cobre, que se utilizaba para el enfriamiento e los gases, en la trampa de condensados y filtros, así como el buen funcionamiento del analizador, para el pesaje del bagazo se calibraba la balanza electrónica y se cercioraba que las reservas de bagazo con que se disponían garantizarían la realización de la corrida experimental del día.

Cada corrida experimental iniciaba con un precalentamiento de dos horas en la cámara de combustión, como la alimentación de bagazo a la cámara de combustión se hace manualmente, se disponía de un atizador, quien distribuía el peso suministrado para alimentación definida por hora, dependiendo de en que cámara se estaba trabajando, tapando la compuerta de alimentación de bagazo después de cada atizada.

Para la pesada del bagazo se disponía de dos personas quienes seleccionaban el bagazo de tamaño adecuado, lo pesaban, lo llevaban al

atizador y tomaban las muestras de bagazo para la determinación de su humedad. Se disponía de una persona permanente que verificara el buen funcionamiento del software INCTECH y que estuviera atento al buen funcionamiento de los sensores de temperatura. Para el análisis de gases se disponía de una persona quien estaba atento a su buen funcionamiento y a la toma de datos. Para la medición de la velocidad del aire suministrado por el ventilador por medio de un anemómetro se disponía de otra persona y para la activación de las válvulas solenoides del sistema de control de nivel de agua en las pailas se disponía de otra persona.

Los tiempos de duración de las pruebas experimentales para cada configuración dependían del tipo de cámara: Para la Ward-CIMPA se trabajó 1 hora y 15 minutos mientras que para la Plana-CIMPA fue de 1 hora y 30 minutos. Al finalizar cada configuración se disponía de 15 minutos para hacer limpieza de la parrilla pues se presentaban altos niveles acumulación de escoria en la parrilla, que afectaban la entrada de aire primario y el normal desarrollo de la combustión.

## **2.2. DESARROLLO EXPERIMENTAL PARA EL ESTUDIO DE LA PRODUCCIÓN DE ESCORIA EN CÁMARAS DE COMBUSTIÓN.**

En la combustión del bagazo se identificó una variable que aparentemente influye en la buena operación de las cámaras de combustión, se trata de la formación de escoria, la cual al depositarse en la toda la superficie de la parrilla, obstruía gradualmente la entrada de aire primario a la cámara.

Teniendo como referencia parte de la experimentación realizada para determinar los parámetros de diseño y operación de las cámaras y pruebas experimentales adicionales en la cámara de combustión Ward-CIMPA, se estudió el comportamiento con respecto al tiempo de los caudales de aire primario y secundario y su relación con la formación de escoria, Además de la relación entre el peso de escoria y el flujo y humedad del bagazo.

### **2.2.1. Variables de evaluación.**

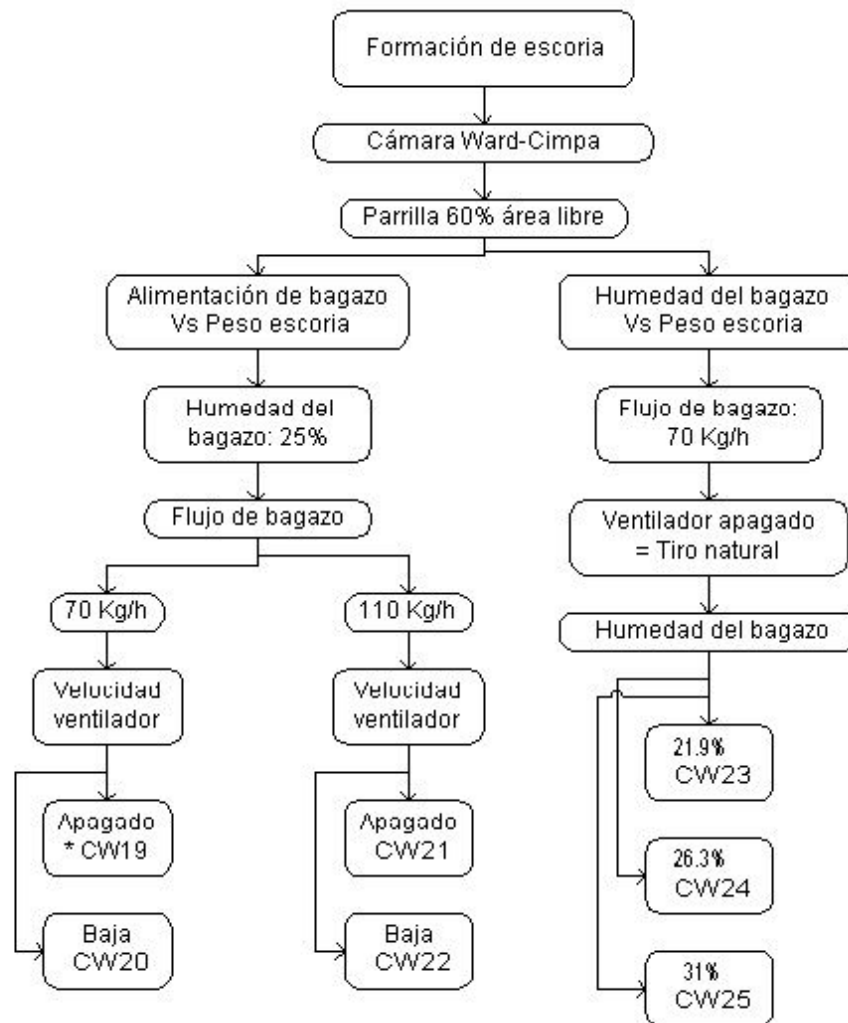
#### **Variables independientes**

- Flujo de bagazo por hora.
- Humedad del Bagazo.

#### **Variables dependientes.**

- Temperatura de la cámara de combustión.
- Caudal de aire primario y secundario
- Peso de la escoria.

**2.2.2. Diagrama de flujo de las experimentaciones.** En la figura 18, se muestra el diagrama de flujo de las distintas configuraciones experimentales para el estudio de la formación de escoria en la cámara de combustión Ward-CIMPA y su relación con el flujo y humedad del bagazo.



Fuente: Investigación de los autores.  
\*Código de la configuración experimental.

Figura 18. Configuraciones experimentales para el estudio de la formación de escoria.

**2.2.3. Descripción de los montajes experimentales y equipos.** Se trabajó en la hornilla con cámara de combustión Ward-CIMPA, con los mismos montajes experimentales, equipos y puntos de monitoreo para los sistemas de pesaje, determinación de humedad y alimentación de Bagazo, variación de velocidad del ventilador y sistema de control de nivel de agua evaporada en las pailas, utilizados para la experimentación para la determinación de parámetros de diseño y operación de las cámaras de combustión.

**2.2.4. Descripción de las pruebas experimentales.** Después de cerciorarse del buen funcionamiento de los distintos montajes experimentales, se iniciaban las pruebas con un precalentamiento de la cámara de combustión por dos hora, luego se iniciaba experimentación con cada configuración definida por un tiempo de una cada una, al finalizar cada prueba se procedió a pesar la escoria resultante en la superficie de la parrilla, utilizándose una balanza analítica.

### 2.3. DESARROLLO EXPERIMENTAL PARA EL CONTROL DE TEMPERATURA EN LA CÁMARA WARD-CIMPA

Se decidió desarrollar y experimentar un lazo de control en la cámara Ward-CIMPA al observarse una relación entre el caudal de aire que entra y la temperatura de la cámara. El lazo de control que se utilizó fue por retroalimentación con un controlador On/Off.

#### 2.3.1. Variables de evaluación.

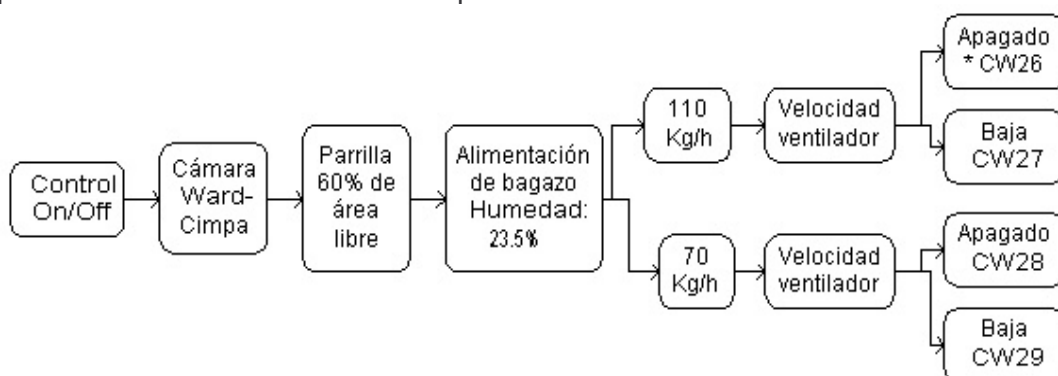
##### Variables independientes.

- Flujo de bagazo por hora.
- Humedad del Bagazo.
- Exceso de aire.

##### Variable dependiente.

- Temperatura de la cámara de combustión.

**2.3.2. Diagrama de flujo de las experimentaciones.** En la figura 19, se muestra el diagrama de flujo de las distintas configuraciones experimentales para el estudio del control de temperatura en la cámara Ward-CIMPA.

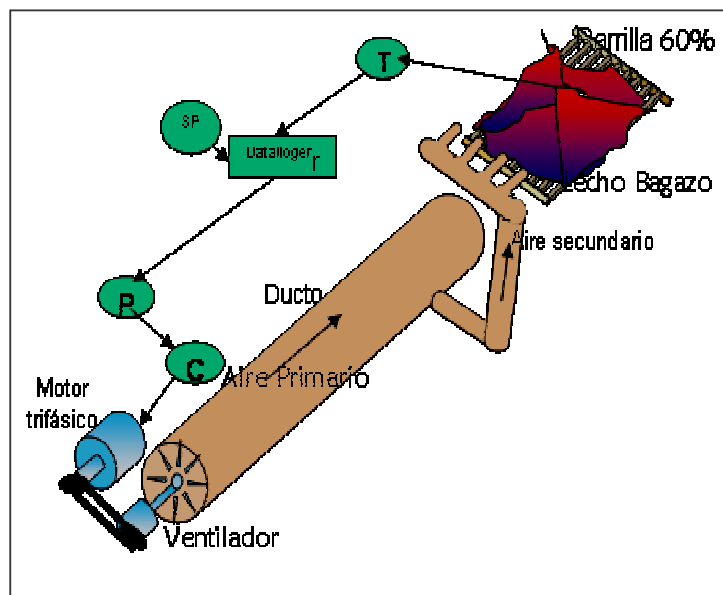


Fuente: Investigación de los autores.  
\*Código de la configuración experimental.

Figura 19. Configuraciones experimentales para el control On/Off.

**2.3.3. Descripción del montaje experimental.** Se trabajó en la hornilla con cámara de combustión Ward-CIMPA, con los mismos montajes experimentales, equipos y puntos de monitoreo para los sistemas de pesaje, determinación de humedad y alimentación de Bagazo, variación de velocidad del ventilador y sistema de control de nivel de agua evaporada en las pailas, utilizados para la experimentaciones para la determinación de parámetros de diseño y operación y para el estudio de la formación de escoria.

Para el desarrollo del lazo de control se hizo necesario una instrumentación con un conjunto de dispositivos usados para medir y controlar variables; en este caso la variable controlada fue la temperatura de la cámara, utilizándose una estrategia de control por retroalimentación, que consistía en sensar la temperatura por medio de una termocupla (T) tipo K, esta enviaba la señal análoga al datalogger, lugar donde se fijaba el setpoint (SP=950°C) y se registraba el dato de temperatura en el computador por medio del software INCTECH 2000, luego se transmitía la señal a una protoboard (P), la cual contaba con un relé que abría o cerraba el circuito que alimentaba los 110V al contactor (C) de 30A con salida de 220 V al motor del ventilador, el cual estaba fijado para operar a régimen de velocidad de ventilador baja. El esquema general del lazo de control se puede apreciar en la figura 20. En el anexo F, se puede apreciar el plano de la protoboard utilizada para el lazo de control.



Fuente: Investigación de los autores

Figura 20. Esquema general del lazo de control en la cámara Ward-CIMPA.

**2.3.3. Descripción de la corrida experimental.** La corrida experimental iniciaba con un precalentamiento de la cámara de dos horas, dando iniciándose la experimentación primero a lazo abierto y luego a lazo cerrado por cada régimen de alimentación. Cada configuración experimental durante un tiempo de 45 minutos, tiempo en el cual simultáneamente se hacía un registro cada dos segundos de la temperatura de la cámara y de las activaciones que sufría el motor en lazo cerrado este trabajo lo realizaba el data logger.

### 3. MODELO MATEMÁTICO UTILIZADO PARA LA ESTIMACIÓN DE LA COMPOSICIÓN DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN

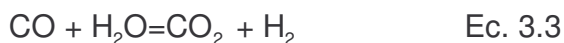
#### 3.1. MODELAMIENTO INICIAL DE LAS REACCIONES DE COMBUSTIÓN DE BAGAZO HÚMEDO.

Como se describió anteriormente el proceso de combustión de biomasa, se lleva a cabo en varias etapas donde ocurren diferentes reacciones químicas; por esta razón es necesario estudiar el comportamiento de cada una de ellas durante el proceso de combustión de bagazo en una hornilla panelera.

Teniendo en cuenta las principales reacciones de combustión que se dan en el proceso y de acuerdo con las experimentaciones que se llevaron a cabo en los dos tipos de cámara de combustión, se simuló el proceso en un software comercial de procesos químicos industriales. La simulación se realizó en 3 reactores CSTR en serie. En el primero de ellos ocurren las reacciones de conversión:



En el segundo se lleva a cabo la reacción de equilibrio:

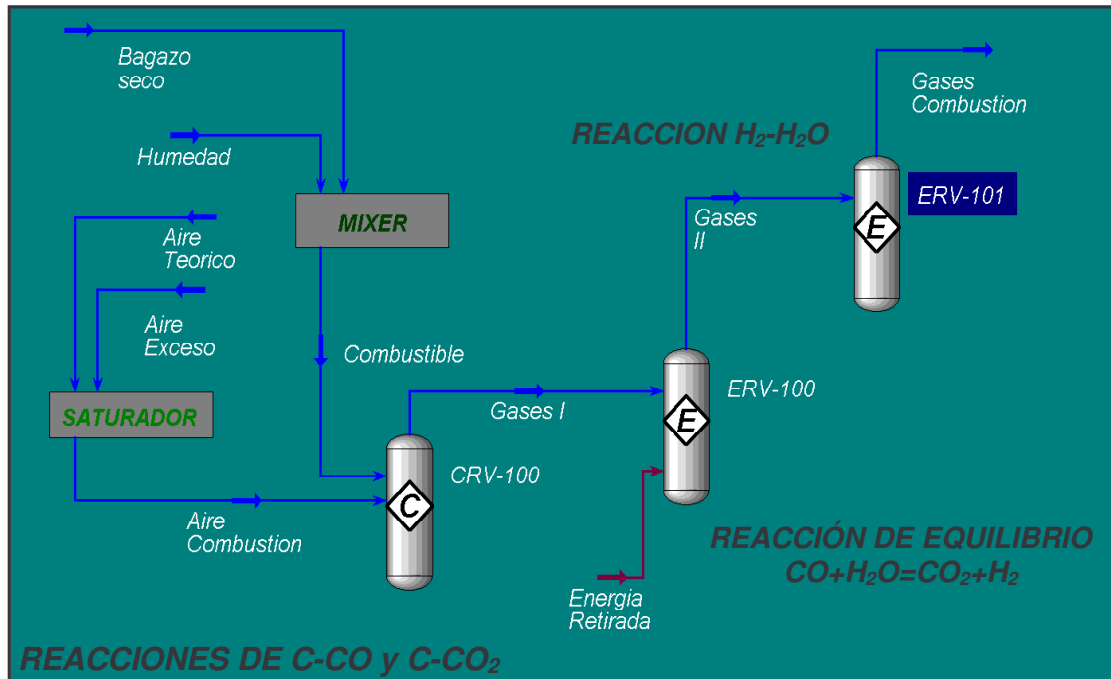


En el tercer reactor se lleva a cabo la última reacción correspondiente a la formación de agua a partir del hidrógeno presente en el bagazo:



La teoría y los datos experimentales demuestran que el proceso de combustión es independiente del tipo de cámara en que se lleva cabo, es decir, una u otra cámara puede proporcionar mejores condiciones de operación para la combustión, pero el proceso de quema de bagazo siempre va a tener las mismas etapas y las mismas reacciones químicas.

La figura 21, presenta el esquema general del sistema de reactores que permiten representar las reacciones que ocurren durante la combustión del bagazo húmedo.



Fuente: Investigación de los autores

Figura 21. Esquema general de reacción de bagazo húmedo.

En el reactor CRV-100, ocurren la siguientes reacciones de tipo conversión:



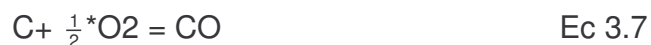
Esta es la primera reacción que se lleva a cabo y se determinó para ella una conversión aproximada de 15,0% de carbono a Dióxido de carbono. La conversión se sugiere de tipo polinómico y es del siguiente tipo:

$$C: C_0 + C_1 \cdot T \quad \text{Ec. 3.6}$$

Donde:

- C: Conversión Total.
- C<sub>0</sub>: 74.5%
- C<sub>1</sub>:  $-9 \times 10^{-3}$
- T: Temperatura Kelvin.

La segunda reacción que ocurre es la de carbono a monóxido de carbono y tiene una conversión del 100.0%:



Como los flujos máscicos son conocidos a la entrada del reactor CRV-100, y se dispone de los datos de conversión para las dos reacciones, se tiene

definido totalmente los balances de masa a la salida del reactor (composiciones, los demás componentes actúan como inertes en el proceso).

Queda por definir la temperatura de la corriente intermedia de gases, denominada en la figura gases I y esto se hace mediante el cálculo de la temperatura adiabática de la reacción. (Es decir la corriente de salida del reactor CRV-100).

Los datos de entalpía de las reacciones de combustión son los siguientes:



$$\Delta H_{\text{total}} = \Delta H_1 + \Delta H_2 \text{ ( a 298.15 K)}$$

El cambio total de entalpía es entonces función como se espera del número de moles que reaccionan. La temperatura adiabática se determina iterando las siguientes reacciones (cálculo de prueba y error):

$$(Cp/R) = \Delta H_{\text{ad}} = \int (A + B * T + C * T^2 + D * T^{-2}) dT \quad \text{Ec. 3.10}$$

Donde los coeficientes A, B, C, D, para las condiciones de salida de los gases de combustión se encuentran en la tabla 9.

Tabla 9. Coeficientes del calor específico (Cp)

Componente	A	B	C	D
H <sub>2</sub>	3.249	4.22E-04	0	8.30E+03
O <sub>2</sub>	3.639	5.06E-04	0	-2.27E+04
N <sub>2</sub>	3.28	5.93E-04	0	4.00E+03
H <sub>2</sub> O	3.47	1.45E-03	0	1.21E+04
CO	3.376	5.57E-04	0	-3.10E+03
CO <sub>2</sub>	5.457	1.05E-03	0	-1.16E+05

Fuente: Smith Van Ness, 1996

$$\Delta H_{\text{adi}} + \Delta H_{298} = \Delta H = 0 \quad \text{Ec. 3.11}$$

$$\Delta H_{\text{adi}} = 8.314 * (A * (T_2 - T_1) + \left(\frac{B}{2}\right) * (T_2^2 - T_1^2) + \left(\frac{C}{3}\right) * (T_2^3 - T_1^3) - D * (T_2^{-1} - T_1^{-1})) \quad \text{Ec. 3.12}$$

Resolviendo las ecuaciones anteriores, obtenemos la temperatura adiabática de la reacción, que es el dato de temperatura a la salida en el reactor; este dato es la temperatura de entrada al segundo reactor, en el cual se lleva a

cabo la reacción de equilibrio (Ec 3.3). El cálculo se hizo mediante el uso de los datos de la tabla 10, para la constante de equilibrio en función de la temperatura, Smith Van Ness (1996).

Tabla 10. Constantes de equilibrio teóricas y calculadas.

Temperatura C	$K_{\text{equil}}$	$K_{\text{calculada}}$	error (%)
93.33	4523	4546.76	-0.525
148.89	783.6	781.30	0.293
204.44	206.8	205.72	0.522
232.22	119	118.49	0.432
260.00	72.75	72.52	0.323
287.78	46.7	46.73	-0.061
315.56	31.44	31.47	-0.097
343.33	22	22.02	-0.076
371.11	15.89	15.92	-0.191
398.89	11.8	11.85	-0.418
426.67	9.03	9.05	-0.175
454.44	7.05	7.06	-0.169
482.22	5.61	5.62	-0.245
510.00	4.55	4.56	-0.185
537.78	3.749	3.75	-0.131
565.56	3.13	3.14	-0.180
593.33	2.653	2.65	0.000
621.11	2.27	2.27	-0.035
648.89	1.966	1.96	0.091
676.67	1.72	1.72	0.272
704.44	1.512	1.51	0.059
732.22	1.34	1.34	-0.139
760.00	1.202	1.20	0.141
787.78	1.08	1.08	-0.086
815.56	0.9813	0.98	0.188
843.33	0.894	0.89	0.158
871.11	0.8192	0.82	0.180
898.89	0.754	0.75	0.157
926.67	0.697	0.70	0.115
954.44	0.647	0.65	0.067
982.22	0.6037	0.60	0.145
1037.78	0.5305	0.53	0.156
1093.33	0.4712	0.47	-0.038
1148.89	0.4233	0.42	-0.221
1204.44	0.3843	0.39	-0.339

Fuente: Smith Van Ness, 1996

El esquema de cálculo es el siguiente:

1. Suponer la temperatura de salida en Kelvin.
2. Mediante la ecuación de la constante de equilibrio se determinan las composiciones de salida de la mezcla reaccionante, de la siguiente forma.



$$K = (Y_{\text{H}_2} \times Y_{\text{CO}_2}) / (Y_{\text{CO}} \times Y_{\text{H}_2\text{O}}) \quad \text{Ec. 3.14}$$

Donde  $Y_i$  se determina de la siguiente forma:

$$Y_i = (n_i/n) = (n_{i0} + v_i \cdot e) / (n_0 + v \cdot e) \quad \text{Ec. 3.15}$$

Donde:

- e: Grado de avance de la reacción.
- v: Coeficientes estequiométricos, sumatoria de los coeficientes de la reacción.
- $n_0$ : Número de moles iniciales.
- $n_{i0}$ : Número de moles iniciales del componente i.
- $v_i$ : Coeficiente estequiométrico del componente i.

Con las composiciones determinadas a una temperatura supuesta, procedemos a determinar la temperatura nuevamente a partir de:

$$\Delta G = J - R \times T \times (\Delta A \times \ln(T) + (\Delta B/2) \cdot T + (\Delta C/6) \cdot T^2 + (\Delta D/2 \cdot T^2) + I) \quad \text{Ec. 3.16}$$

Donde las constantes de integración J e I, se obtienen a partir de un valor conocido de  $\Delta G$  y  $\Delta H$  a 298.15 K. Los datos se usan para calcular nuevamente la constante de equilibrio y a su vez determinar el valor de las composiciones a la salida.

La formación de agua a partir de Hidrógeno ocurre en el reactor 3, en este caso el  $\Delta H$  para toda la reacción tiene en cuenta el cambio de llevar los componentes de entrada hasta 298.15 K, la posterior reacción de los mismos y el cambio de entalpía de los productos desde 298.15 K hasta la temperatura adiabática de la mezcla.

Entonces se tienen tres etapas para el cálculo del  $\Delta H$  total de reacción.

$$\Delta H_{\text{total}} = \Delta H_1 + \Delta H_2 + \Delta H_3$$

Donde,

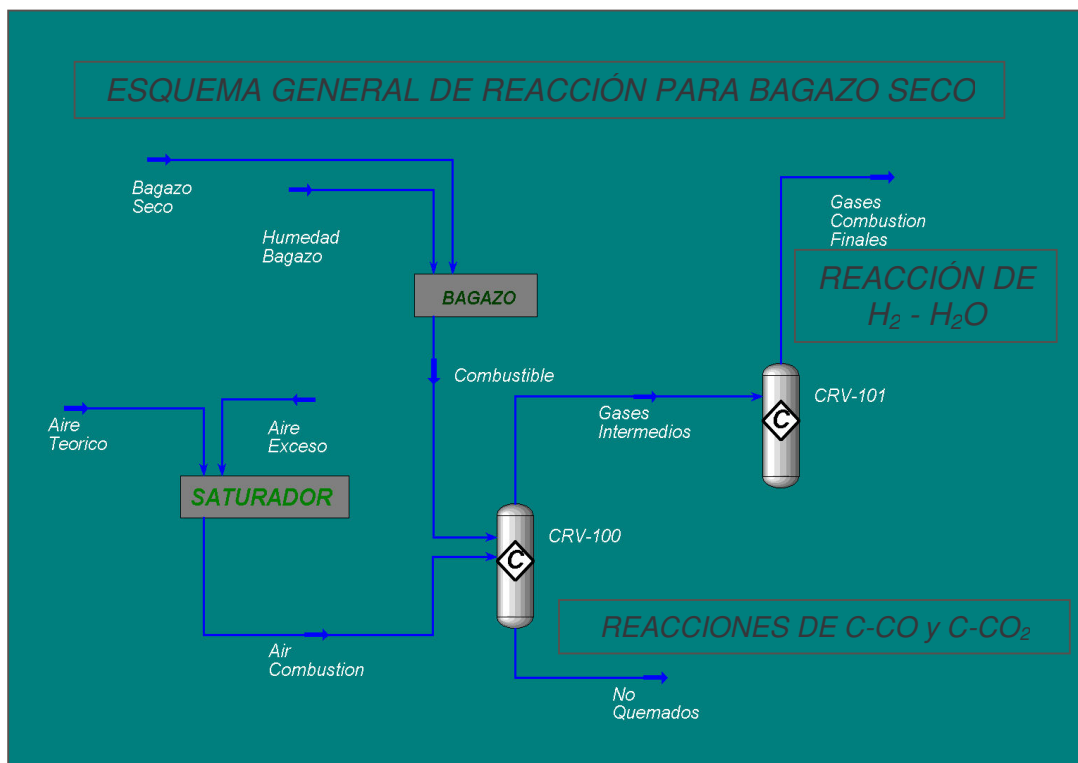
$\Delta H_1$  = Cambio de entalpía para llevar los reactivos de la temperatura de entrada hasta 298.15 K (Temperatura de referencia). Dato de salida del reactor de equilibrio.

$\Delta H_2$  = Cambio de entalpía por reacción a la temperatura de referencia.  
 $\Delta H_3$  = Cambio de entalpía de los productos desde 298.15K hasta la temperatura adiabática.

El esquema iterativo es idéntico al presentado con anterioridad para la reacción de producción de CO y CO<sub>2</sub>.

### 3.2. MODELAMIENTO DE LAS REACCIONES DE COMBUSTIÓN DE BAGAZO SECO.

En la figura 22, se presenta el esquema general del sistema de reactores que permiten representar las reacciones que se dan durante la combustión del bagazo seco en una cámara Ward y en una tradicional mejorada, los resultados son producto de las corridas experimentales.



Fuente: Investigación de los autores

Figura 22. Esquema general de reacción para el bagazo seco.

En el reactor CRV-100, ocurren la siguiente reacción:



La cual es de rango cero, es decir es la primera reacción que se lleva a cabo y se determinó para ella una conversión aproximada de 68% de carbono a dióxido de carbono. La conversión se sugiere de tipo polinómico, pero inicialmente se sugiere que tome como una conversión constante.

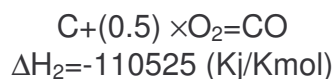
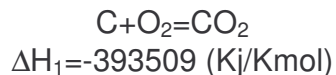
La conversión polinómica es del siguiente tipo:

$$\text{Conversión: } C_0 + C_1 \times T + C_2 \times T^2 \quad \text{Ec. 3.18}$$

La segunda reacción que ocurre es la de carbono a monóxido de carbono y tiene una conversión del 50.0%:



Como los flujos másicos son conocidos a la entrada del reactor CRV-100, y se dispone de los datos de conversión para las dos reacciones, se tiene definido totalmente los balances de masa a la salida del reactor (composiciones, los demás componentes actúan como inertes en el proceso). Queda por definir la temperatura de la corriente intermedia de gases y esto se hace mediante el cálculo de la temperatura adiabática de la reacción.



$$\Delta H_{\text{total}} = \Delta H_1 + \Delta H_2 \text{ ( a 298.15 K)}$$

El cambio total de entalpía es entonces función del número de moles que reaccionan. La temperatura adiabática se calcula mediante por prueba y error, con las siguientes ecuaciones:

$$(C_p / R) = \Delta H_{\text{adi}} = \int (A + B \times T + C \times T^2 + D \times T^{-2}) \times dT \quad \text{Ec. 3.20}$$

Es necesario ahora calcular el valor de cada uno de los coeficientes A, B, C, D, para las condiciones de salida de los gases de combustión.

$$\Delta H_{\text{adi}} + \Delta H_{298} = \Delta H = 0 \quad \text{Ec. 3.21}$$

$$\Delta H_{\text{adi}} = 8.314 \times (A \times (T_2 - T_1) + (B/2) \times (T_2^2 - T_1^2) + (C/3) \times (T_2^3 - T_1^3) - D \times (T_2^{-1} - T_1^{-1})) \quad \text{Ec. 3.22}$$

Resolviendo las ecuaciones anteriores obtenemos la temperatura adiabática de la reacción, que es el dato de temperatura a la salida en el reactor. Este dato es el valor de entrada al segundo reactor que es en el cual se lleva a cabo la reacción de producción de agua a partir de hidrógeno.



Para este caso el  $\Delta H$  para toda la reacción tiene en cuenta el cambio de llevar los componentes de entrada hasta 298.15 K, la posterior reacción de los mismos y el cambio de entalpía de los productos desde 298.15 K hasta la temperatura adiabática de la mezcla.

$$\Delta H_{\text{total}} = \Delta H_1 + \Delta H_2 + \Delta H_3 \quad \text{Ec. 3.24}$$

Donde:

$\Delta H_1$  = Cambio de entalpía para llevar los reactivos de la temperatura de entrada hasta 298.15 K (Temperatura de referencia).

$\Delta H_2$  = Cambio de entalpía por reacción a la temperatura de referencia.

$\Delta H_3$  = Cambio de entalpía de los productos desde 298.15 K, hasta la temperatura adiabática.

El esquema iterativo es idéntico al presentado en la sección precedente. En el anexo I, se presentan los resultados de la simulación para una corrida experimental.

## 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

A partir de los datos tomados en las corridas experimentales, se analizan los resultados para cada tipo de cámara con el objeto de definir las condiciones óptimas de operación y los parámetros de diseño de cámaras. Todos los datos de temperatura, análisis de gases y tiempo de registro, se reportan en el anexo J y a partir de ellos se elaboraron las gráficas de análisis presentadas en este capítulo.

### 4.1. PERFILES DE EXCESO DE AIRE ( $\lambda$ ) Vs. PRODUCCIÓN DE (CO) POR Kg DE BAGAZO ALIMENTADO.

En un proceso de combustión ideal, la producción de CO tiende a cero; por esta razón, se relaciona la producción de monóxido con la eficiencia de la cámara: a menor CO producido mayor eficiencia del proceso. Con relación a esto, es necesario observar la influencia que tiene el exceso de aire sobre la generación de monóxido de carbono, para identificar un rango de suministro de aire adecuado.

**4.1.1. Cámara de combustión Ward-CIMPA.** Las figuras que comprenden entre la 23 y la 31, corresponden a la producción de monóxido de carbono en función del exceso de aire suministrado al proceso (CO vs. Exceso), para cada uno de los experimentos llevados a cabo en cámara Ward-Cimpa. La variable reportada como registro en el eje X, corresponde al número del experimento o de la medición y equivale aproximadamente a 30 segundos.

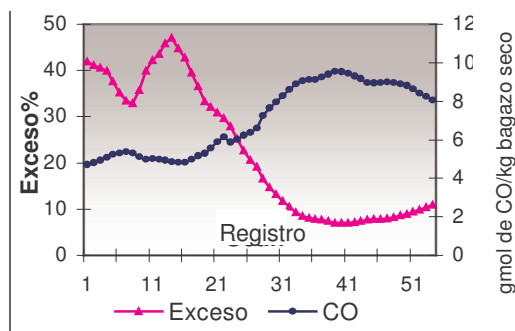


Figura 23. CO Vs Exceso de aire.  
Hum.25% Exp. CW01

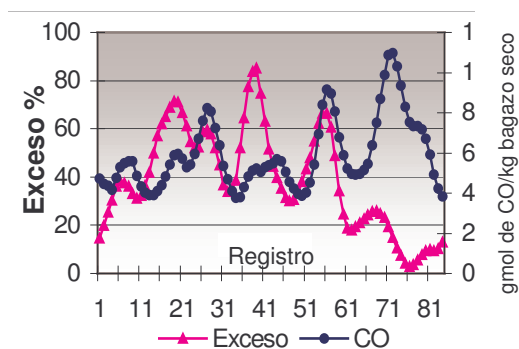


Figura 24. CO Vs Exceso de aire.  
Hum 24% Exp. CW02

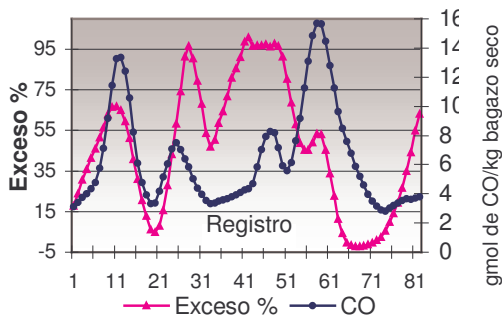


Figura 25. CO Vs Exceso de aire.  
Hum.32% Exp. CW03

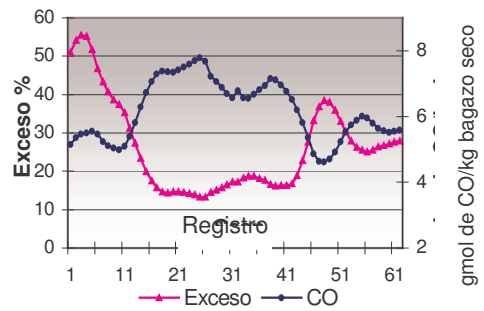


Figura 26. CO Vs Exceso de aire.  
Hum.33% Exp. CW04 .

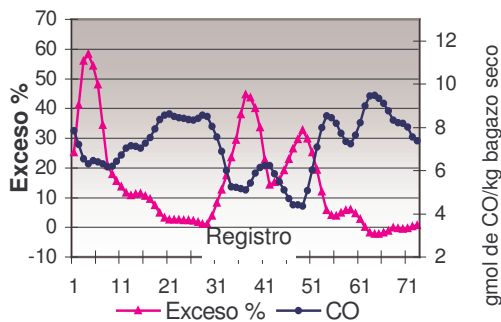


Figura 27. CO Vs Exceso de aire.  
Hum.30% Exp. CW05

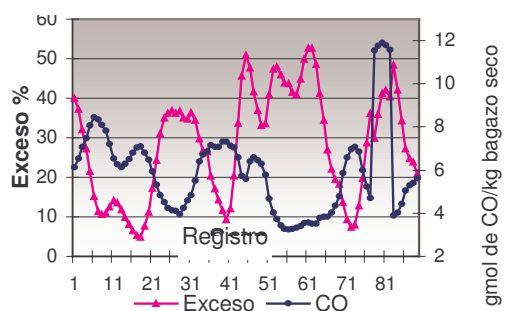


Figura 28. CO Vs Exceso de aire.  
Hum.30% Exp. CW06

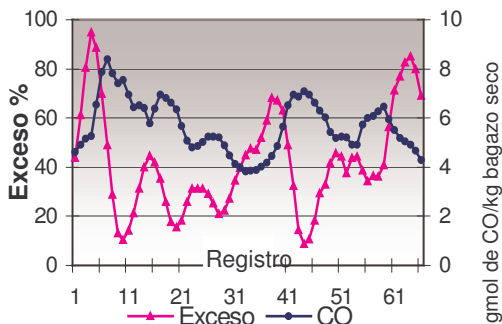


Figura 29. CO Vs Exceso de aire.  
Hum.22% Exp. CW07

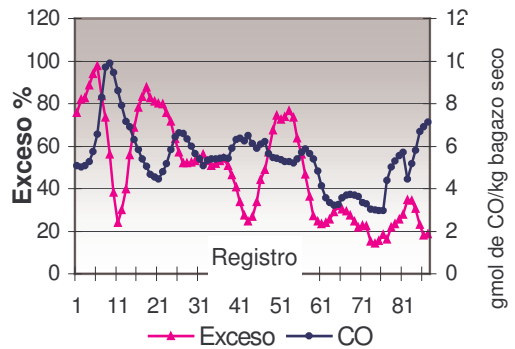


Figura 30. CO Vs Exceso de aire.  
Hum.26% Exp. CW08.

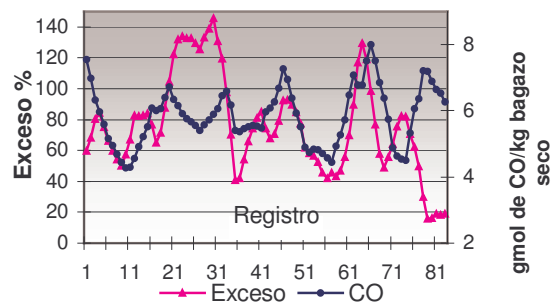


Figura 31. CO vs Exceso de aire.  
Hum.23% Exp. CW09

En los experimentos ilustrados en las nueve figuras anteriores, se observa que la producción de monóxido se encuentra en un rango comprendido entre 4 y 8 gmol por kilogramo de bagazo seco alimentado; la presencia de este rango de variación en el CO y en el exceso de aire, se atribuye en gran parte a los siguientes aspectos:

- La cantidad de bagazo en la cámara no es constante, por esta razón eventualmente los gases aparecen más diluidos o concentrados en el momento del análisis, puesto que hay una mayor cantidad relativa de Nitrógeno y Oxígeno en los gases de chimenea.
- Al consumirse el bagazo la temperatura disminuye, alterando la velocidad de los gases y por ende el exceso de aire.

En las figuras 23 a 31, la producción de CO se mantiene dentro del mismo rango independientemente del flujo de bagazo alimentado a la cámara, y en la gran parte de ellas los perfiles muestran que el exceso de aire con que se reduce la producción de monóxido a 4 gmol es del 55 al 60%, esto quiere decir, según la ecuación 2.34, que por cada kilogramo de bagazo seco alimentado a la cámara se debe garantizar que el tiro proporcione 0.30-0.32 Kmol aire (9-9.3 kg aire aprox.).

**4.1.2. Cámara de combustión Plana-CIMPA.** Las figuras que comprenden entre la 32 y la 39, corresponden a la producción de monóxido en función del exceso de aire suministrado al proceso (CO vs. Exceso), para cada uno de los experimentos llevados a cabo en cámara Plana-CIMPA. La variable reportada como registro en el eje X, corresponde al número del experimento o de la medición y es aproximadamente igual a 30 segundos.

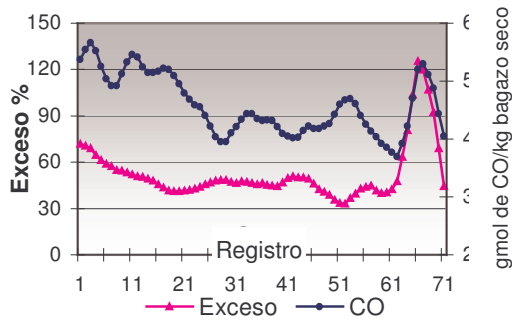


Figura 32. CO Vs Exceso de aire.  
Hum.26% Exp. CP01

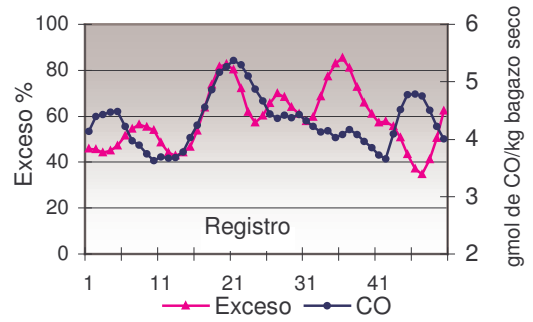


Figura 33. CO Vs Exceso de aire.  
Hum.30% Exp. CP02

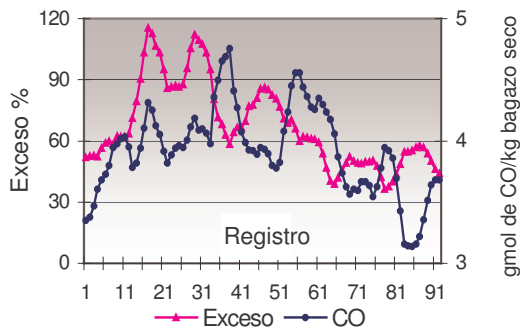


Figura 34. CO Vs Exceso de aire.  
Hum.30% Exp. CP03

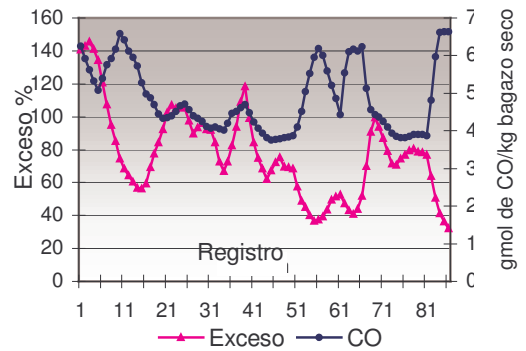


Figura 35. CO Vs Exceso de aire.  
Hum.27% Exp. CP04

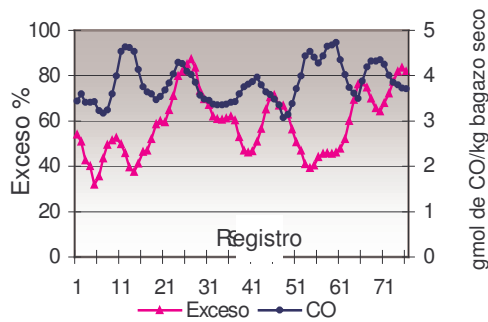


Figura 36. CO Vs Exceso de aire.  
Hum.36% Exp. CP05

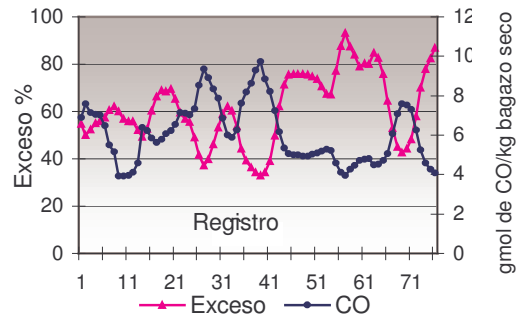


Figura 37. CO Vs Exceso de aire.  
Hum.30% Exp. CP06

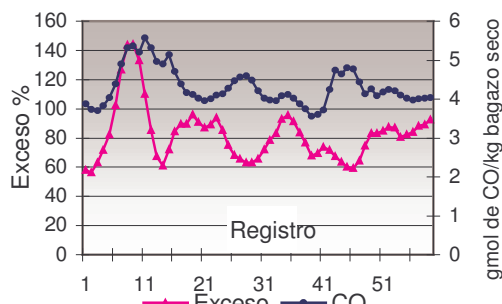


Figura 38. CO Vs Exceso de aire.  
Hum.32% Exp. CP07

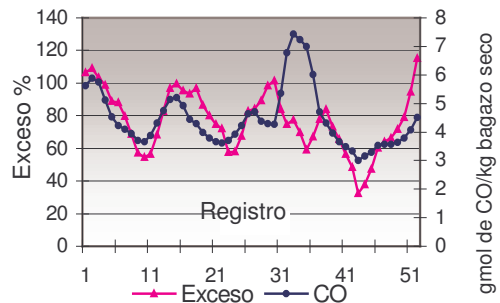


Figura 39. CO Vs Exceso de aire.  
Hum.31% Exp. CP08

En los experimentos ilustrados en las ocho figuras 31 a 38, se observa que la producción de monóxido de carbono CO, se encuentra en un rango comprendido entre 4 y 7 gmol por kilogramo de bagazo seco alimentado; las razones por las cuales se presentan estos rangos de variación son las mismas que se resaltaron anteriormente.

También se observa que la producción de CO no se altera por la variación del flujo de alimentación de bagazo, pero si cuando se trabajo con distintas áreas libres de parrilla. En el caso de los experimentos CW01 a CW04 se operó con un ALP del 40%, teniendo una producción de monóxido más constante comprendida entre 4 y 6 gmol de CO/kg bagazo seco. Esto se argumenta en el hecho, de que al ofrecer la parrilla más obstrucción al paso del aire se mejoran las condiciones del proceso (aumento de temperatura) que favorecen la conversión de carbono a dióxido de carbono.

Efectuando el mismo análisis que la cámara Ward-CIMPA, se puede determinar que el exceso de aire que favorece la operación se encuentra entre el 60% y 65%, esto quiere decir según la ecuación 2.34, que por cada kilogramo de bagazo seco alimentado a la cámara se debe garantizar que el tiro proporcione 0.32-0.33 kmol aire (9.3 – 9.6 kg aire aprox.)

En general, en las figuras correspondientes a los experimentos CW02 a CW04 y CW05 a CW06 y CW08 y CW09 en el caso de la cámara Ward-CIMPA, y CP02, CP04, CP06 y CP08 en el caso de la cámara Plana-CIMPA, se observa el caos generado en la variación del exceso de aire cuando se opera a tiro forzado (ventilador); en estos experimentos el proceso permanece fuera de control debido al aumento de la velocidad de los gases; por esta razón, toman mayor importancia los experimentos efectuados a tiro natural, que es el caso con mayor aproximación al proceso real.

## 4.2. PERFIL DE TEMPERATURAS.

Las figuras 40 a 49, corresponden a perfiles de temperatura medidos en las cámaras de combustión Ward-CIMPA y Plana-CIMPA operando a tiro natural, estos datos no tienen ningún tratamiento estadístico y corresponden a la temperatura censada a la salida de la cámara durante una hora de operación, con una humedad del bagazo promedio, medida para cada experimento; en cada gráfica se registran aproximadamente 1800 datos de temperatura.

### 4.2.1. Perfiles de temperatura en la cámara Ward-CIMPA.

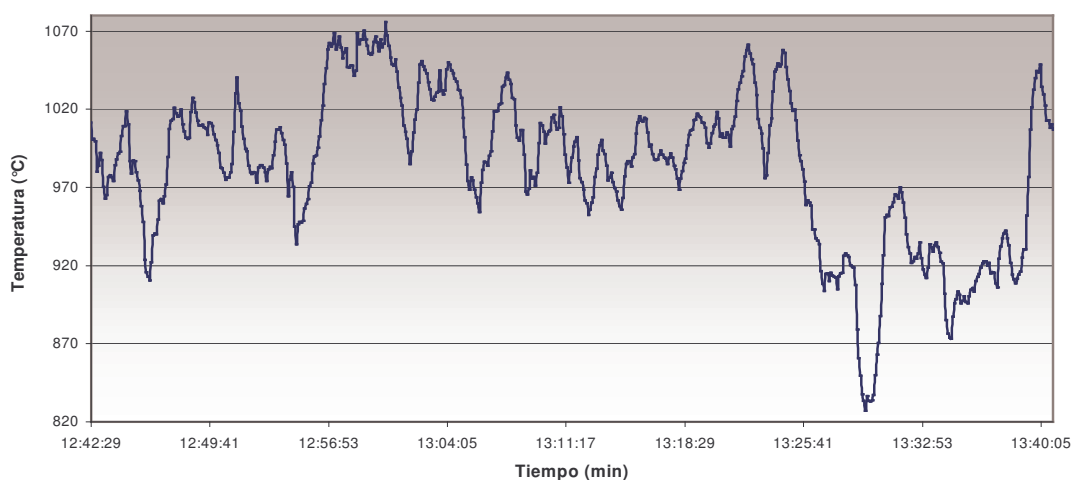


Figura 40. Perfil de temperatura, humedad: 25% Exp. CW01

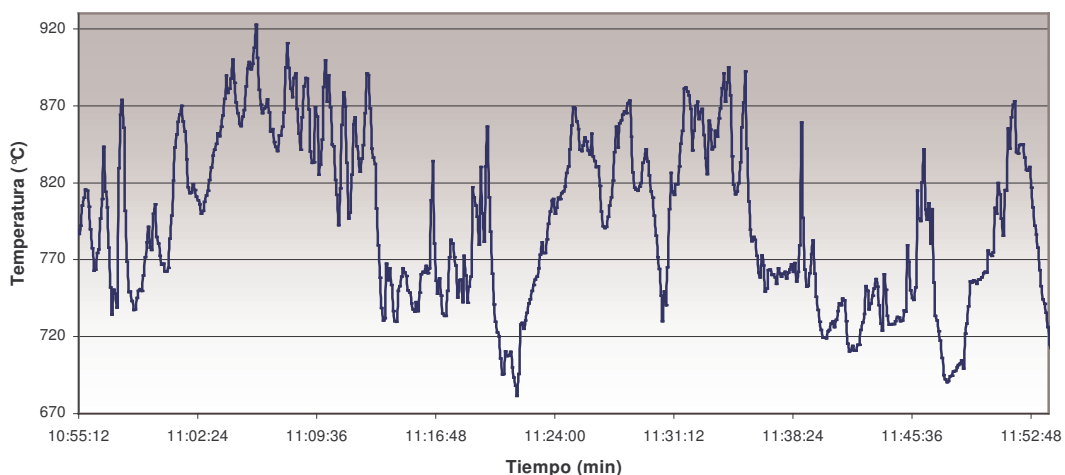


Figura 41. Perfil de temperatura, humedad: 33% Exp. CW04

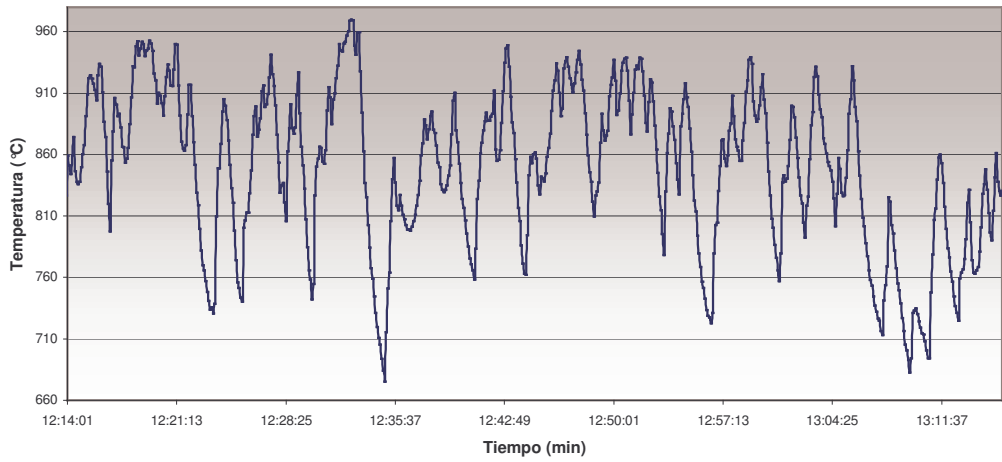


Figura 42. Perfil de temperatura, humedad: 22% Exp. CW07

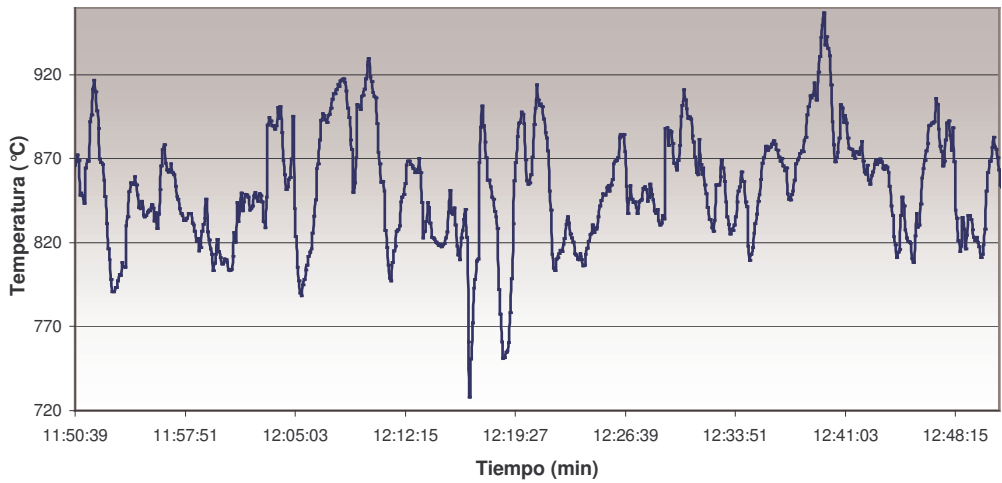


Figura 43. Perfil de temperatura, humedad: 24.5% Exp. CW10

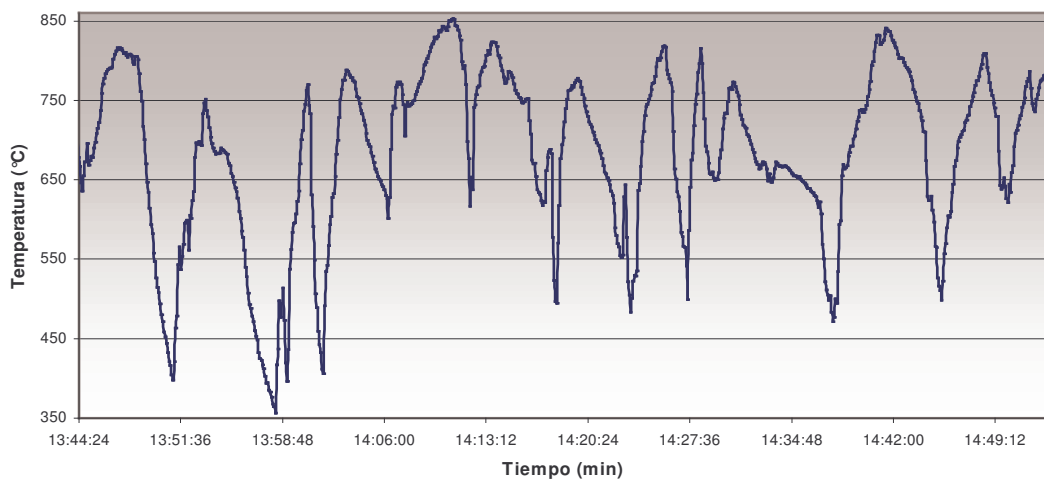


Figura 44. Perfil de temperatura, humedad: 40.6% Exp. CW13.

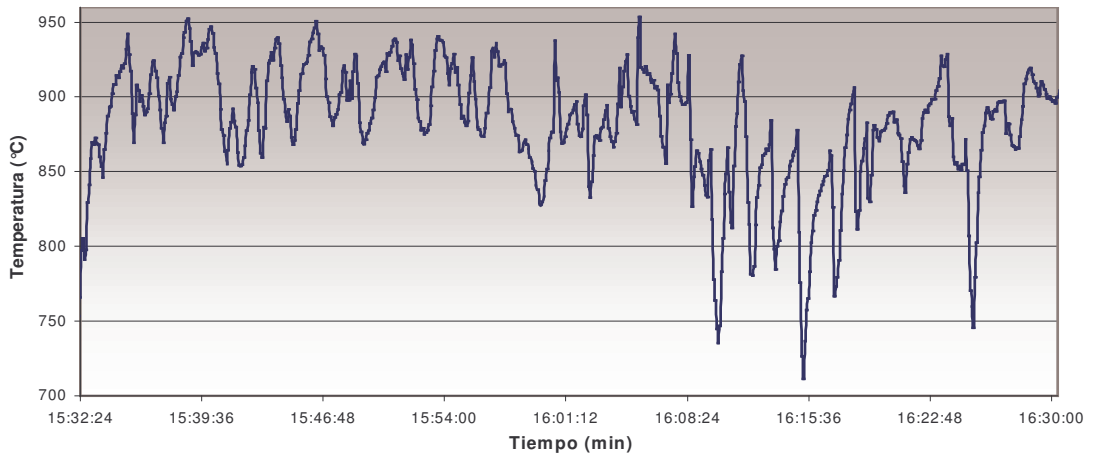


Figura 45. Perfil de temperatura, humedad: 41% Exp. CW16

### 5.2.1 Perfiles de temperatura en la Cámara Plana-CIMPA.

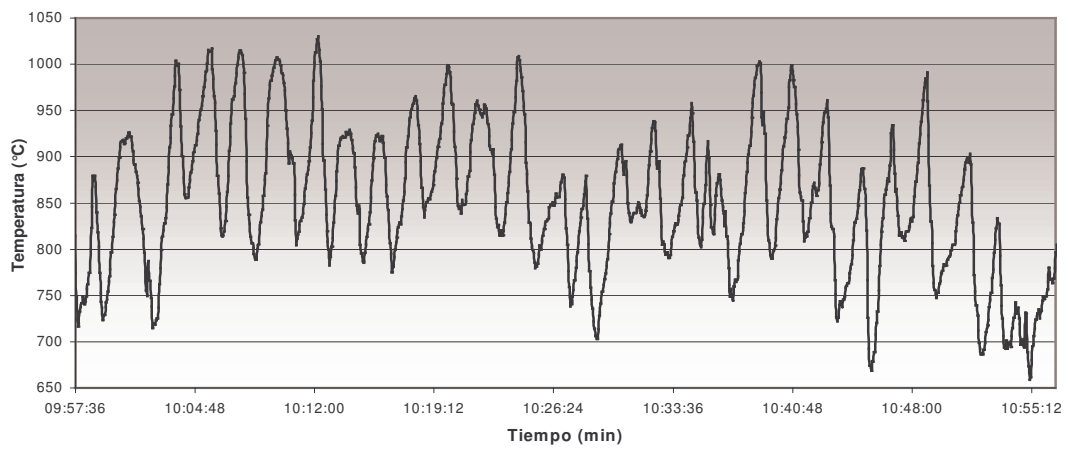


Figura 46. Perfil de temperatura, humedad: 26% Exp. CP01

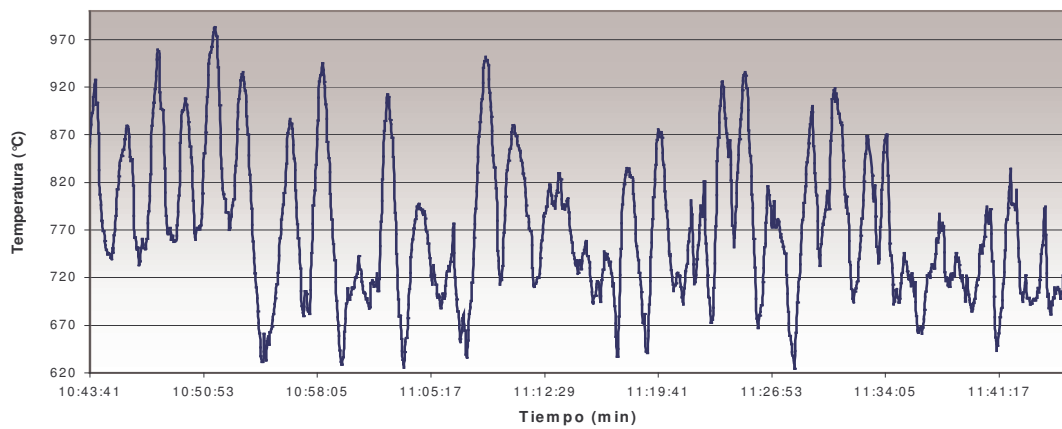


Figura 47. Perfil de temperatura, humedad: 27% Exp. CP04

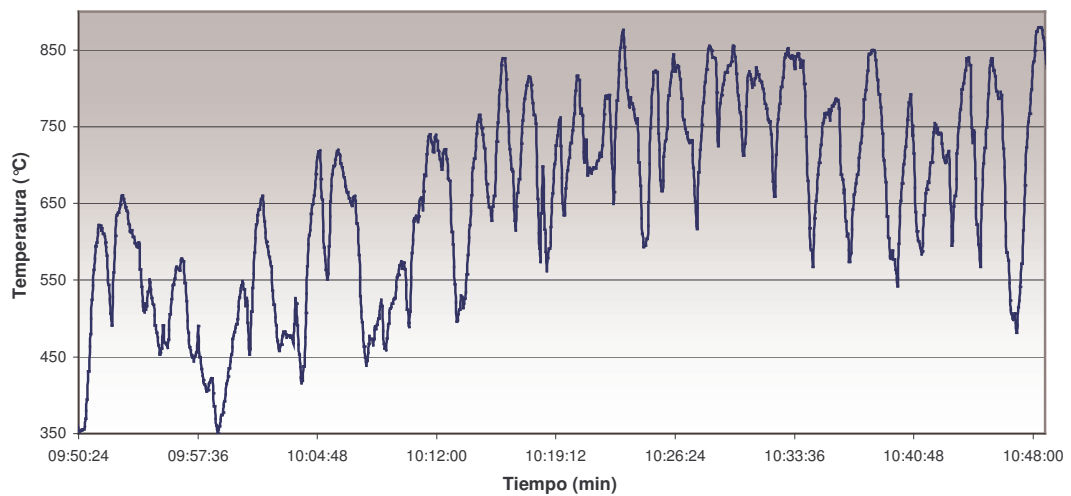


Figura 48. Perfil de temperatura, humedad: 31% Exp. CP07.

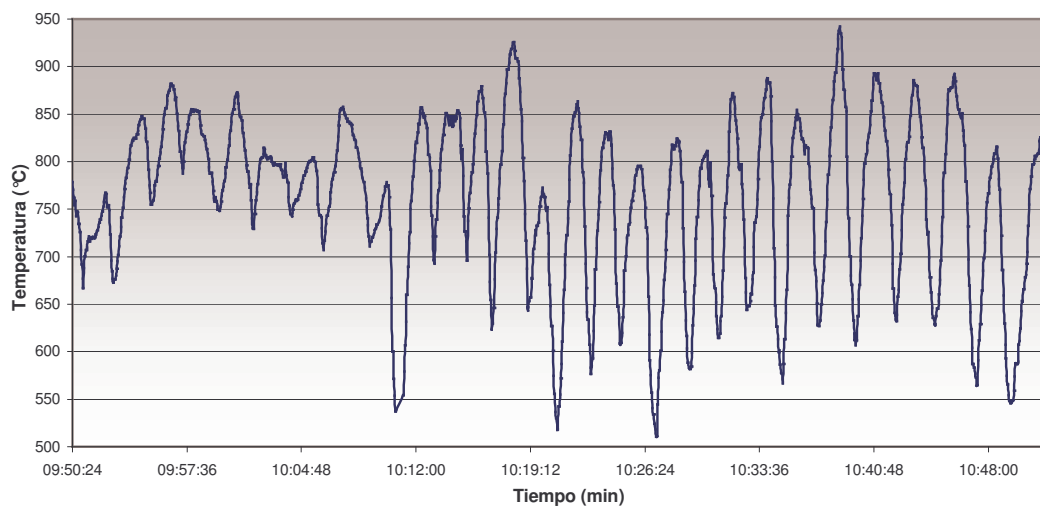


Figura 49. Perfil de temperatura, humedad: 31.8% Exp. CP10.

**4.2.3. Análisis de perfiles de temperatura.** La gráfica de temperatura con el tiempo nos permite observar la estabilidad de la cámara durante la operación de la hornilla, que indirectamente refleja el comportamiento de la hornilla en términos de potencia.

Al observar con detenimiento las figuras de la 40 a la 49, se observa que el perfil de la temperatura se repite en pequeñas fracciones de tiempo, es decir, las temperaturas que se reportan describen una misma función en frecuencia muy parecidas; para observar este comportamiento con claridad, se muestran perfiles de la temperatura de 15 minutos de operación escogidos al azar dentro de una hora; estos perfiles se muestran en las figuras 50 a 59.

- **Cámara Ward-CIMPA.**

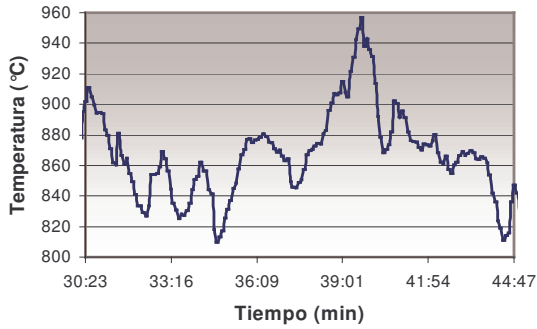


Figura 50. Perfil de temperatura de 15 min. Exp. CW10

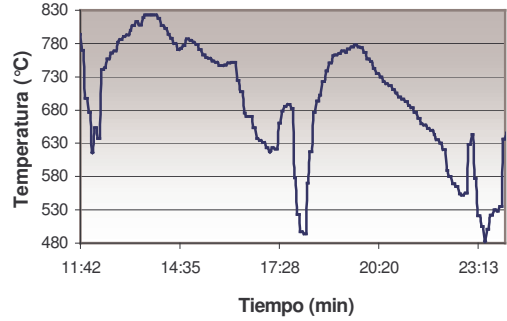


Figura 51. Perfil de temperatura de 15 min. Exp. CW13

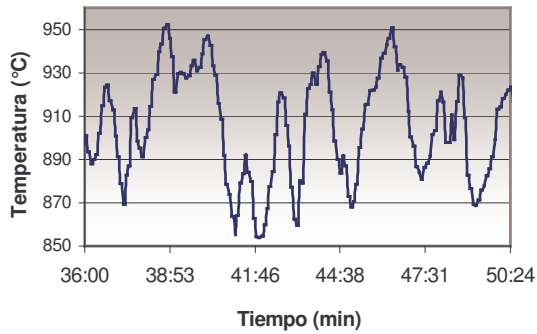


Figura 52. Perfil de temperatura de 15 min. Exp. CW16

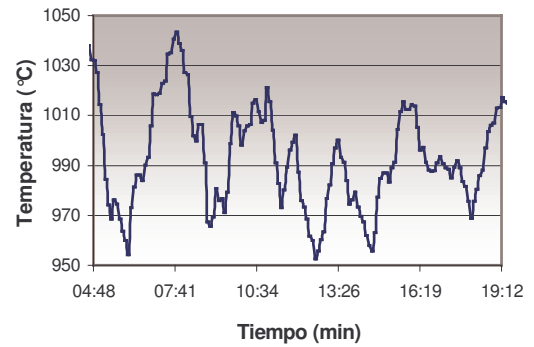


Figura 53. Perfil de temperatura de 15 min. Exp. CW01

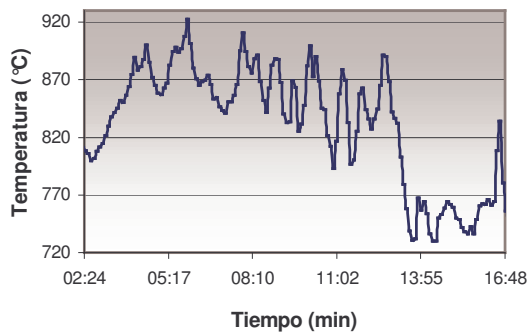


Figura 54. Perfil de temperatura de 15 min. Exp. CW04

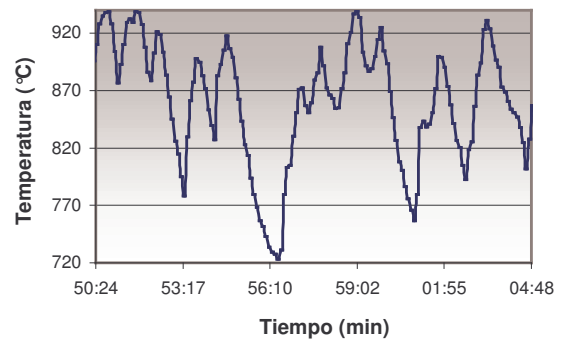


Figura 55. Perfil de temperatura de 15 min. Exp. CW09

- **Cámara Plana-CIMPA.**

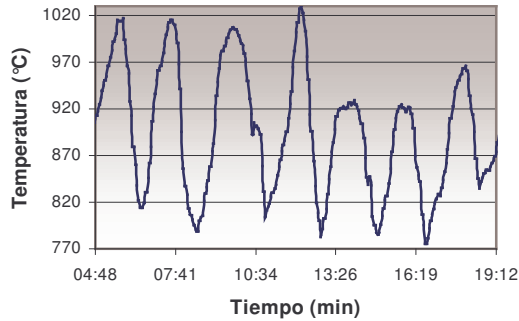


Figura 56. Perfil de temperatura de 15 min. Exp. CP01

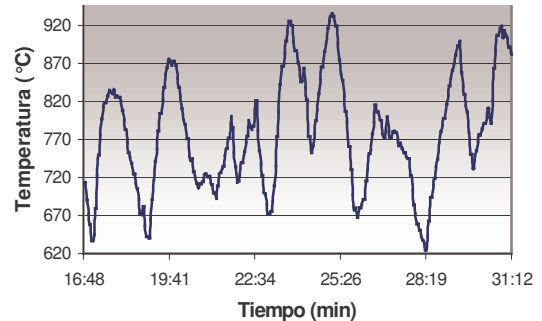


Figura 57. Perfil de temperatura de 15 min. Exp. CP04

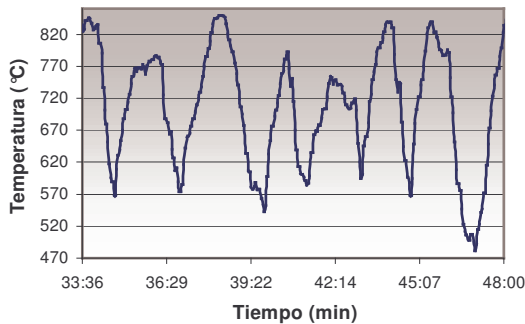


Figura 58. Perfil de temperatura de 15 min. Exp. CP07

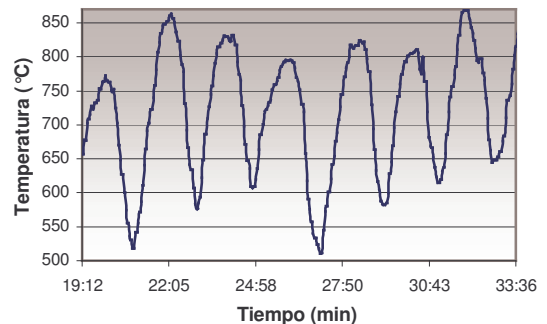


Figura 59. Perfil de temperatura de 15 min. Exp. CP10

En estos perfiles se comprueba la existencia de una función que se repite con el tiempo, pero determinar su expresión matemática es una tarea compleja; por esta razón se debe relacionar esta dependencia con una variable del proceso, que permita cualificar o cuantificar esta relación.

Sin duda alguna la temperatura es la variable mas sensible del proceso puesto que cualquier variación en las condiciones del operación se reflejan en el valor de la misma; por ejemplo cuando se le suministra bagazo a la cámara la temperatura alcanza un punto máximo hasta que este se agota y desciende, razón principal de la periodicidad que se observa en los perfiles. Esta periodicidad en los diferentes perfiles describe el desempeño de cada tipo de cámara en función del bagazo suministrado, para su estudio de aquí en adelante se denominará “Tiempo de ciclo”, se representará por  $\Theta_C$  y se define como el tiempo que transcurre entre un atizamiento y el siguiente; entendiéndose por atizamiento la acción de alimentar periódicamente la cámara de combustión.

**4.2.3.1. Determinación del tiempo de ciclo.** La temperatura es la única variable que permite observar con claridad los tiempos de ciclo de operación de la cámara, puesto que es una variable dependiente directa sensible a cualquier cambio en las condiciones de operación y se mide in situ.

El tiempo de cada ciclo, se determina observando el tiempo transcurrido desde que la temperatura inicia su ascenso debido a la alimentación de bagazo hasta que la temperatura alcanza un mínimo en su descenso. Para cada cámara se miden los tiempos de ciclo observados en una hora de operación, para luego tratarlos estadísticamente y hallar el tiempo de ciclo característico de cada cámara.

- **Cámara Ward-CIMPA.** En la tabla 11, se reportan los tiempos de ciclo, determinados para las diferentes corridas experimentales llevadas a cabo en la cámara Ward-Cimpa.

Tabla 11. Tiempos de ciclo para la cámara Ward-CIMPA.

Área libre de parrilla	40%			60%		
Flujo de bagazo (kg/h)	90	110	70	70	90	110
<b>Humedad Promedio</b>	24.38	32.47	21.34	24.55	40.6	41
	min:seg	min:seg	min:seg	min:seg	min:seg	min:seg
1	01:12	01:12	02:00	01:50	01:50	02:18
2	01:48	01:02	01:42	01:50	02:06	01:28
3	01:06	01:18	01:42	01:06	04:20	01:50
4	01:06	01:36	01:42	01:54	02:00	01:46
5	01:30	01:04	02:00	01:46	05:14	01:44
6	01:36	01:24	01:06	01:28	03:24	02:00
7	01:42	01:50	02:00	01:56	04:34	00:56
8	01:12	01:30	01:42	01:22	04:12	01:12
9	01:24	02:04	01:56	01:00	01:46	01:50
10	01:30	01:36	01:58	01:40	02:28	02:22
11	01:18	01:34	01:26	01:44	03:30	01:48
12	01:18	01:26	01:28	02:28	04:40	02:26
13	01:18	01:06	01:42	02:06	01:00	01:16
14	01:30	01:12	02:08	01:28	03:34	01:22
15	01:12	01:18	02:40	01:34	02:08	01:06
16	01:42	01:30	01:42	02:18	03:56	01:02
17	01:12	01:48	01:12	01:32	04:12	02:06
18	01:48	01:24	01:14	01:46	02:24	01:14
19	01:30	01:12	01:46	01:56	05:18	01:18
20	01:18	01:18	01:36	02:50	04:42	01:36
21	02:12	01:26	01:48	00:38	03:46	01:22
22	01:12	01:16	01:18	01:44	02:32	01:24
23	01:48	01:54	01:52	02:12		01:44
24	01:36	01:42	01:20	01:02		01:34
25	01:24	01:24	01:36	01:14		01:32

Área libre de parrilla	40%	40%	40%	60%	60%	60%
Flujo de bagazo (kg/h)	90	110	70	70	90	110
Humedad Promedio	24.38	32.47	21.34	24.55	40.6	41
	min:seg	min:seg	min:seg	min:seg	min:seg	min:seg
26	01:18	01:52	01:54	01:08		01:58
27	01:54	01:32	01:06	02:40		01:26
28	01:24	01:48	01:00	01:44		01:40
29	01:18	01:18	02:12	01:18		01:50
30	01:18	01:24	01:54	02:12		01:22
31	01:18	01:18	01:06	01:44		01:44
32	01:18	01:06	01:24	01:06		01:06
33	02:12	01:18	01:42	01:56		01:44
34	02:42	01:42	02:00	01:10		01:20
35	01:42	01:24	03:06	01:18		00:58
36	01:42	01:16	01:48	01:56		01:56
37	01:42	01:56	01:18	01:16		02:00
38	01:12	02:02	01:54	02:02		02:12
39	01:42	01:40	01:18	03:34		01:50
40	01:42	01:24	01:34			01:22
41	01:42	01:12	01:42			02:18
42	01:06	01:16	01:38			01:50
43	01:54	01:32	01:36			02:24
44	01:12	01:48	01:48			01:28
45	01:10	01:24				01:22
46	01:20	01:34				
47	01:30	01:44				
48	01:20	01:00				
49	01:04	02:02				
50	01:52	02:06				
<b>Promedio</b>	01:30.0	01:29.7	01:41.7	01:43.8	03:20.7	01:38.8
<b>Desviación estándar</b>	00:19.6	00:17.2	00:24.1	00:33.8	01:15.1	00:24.1

Fuente: Investigación de los autores

La repetición de los ciclos en gran parte es responsabilidad de quien suministra el bagazo a la cámara, un retardo en la alimentación o un adelanto ostensiblemente altera el desempeño de la cámara; la humedad del bagazo y el exceso de aire también influyen en el tiempo de ciclo de la cámara, por eso es necesario recomendar un tiempo de ciclo manteniendo estas dos últimas variables en un rango deseado.

La tabla anterior permite observar, que las corridas experimentales llevadas a cabo con un ALP 60% reportaron menor cantidad de ciclos; esto se debe como se dijo anteriormente al modo de alimentación: en este caso la alimentación se hizo por lotes, algunos de ellos de mayor masa como en el caso del flujo de 90 kg/h donde tan solo se reportan 22 ciclos, en este caso es importante notar el perfil de temperaturas, pues en estas corridas donde el ciclo fue de mayor duración, se obtuvo menor estabilidad de temperatura en

la cámara y por ende de potencia; en el caso del ALP 40%, la alimentación fue más continua, suministrando a la cámara el bagazo requerido de acuerdo a sus dimensiones, logrando de esta manera tener una mejor respuesta del sistema en cuanto a temperatura y potencia.

Es posible expresar los datos de la tabla 11, en un gráfico de frecuencias como el de la figura 60; en él se observa que el ciclo que se repite mayor número de veces es de 90 y 115 segundos, en especial es las experimentaciones con ALP del 40%, donde la alimentación fue más frecuente y se alcanzaron mayores temperaturas en la cámara.

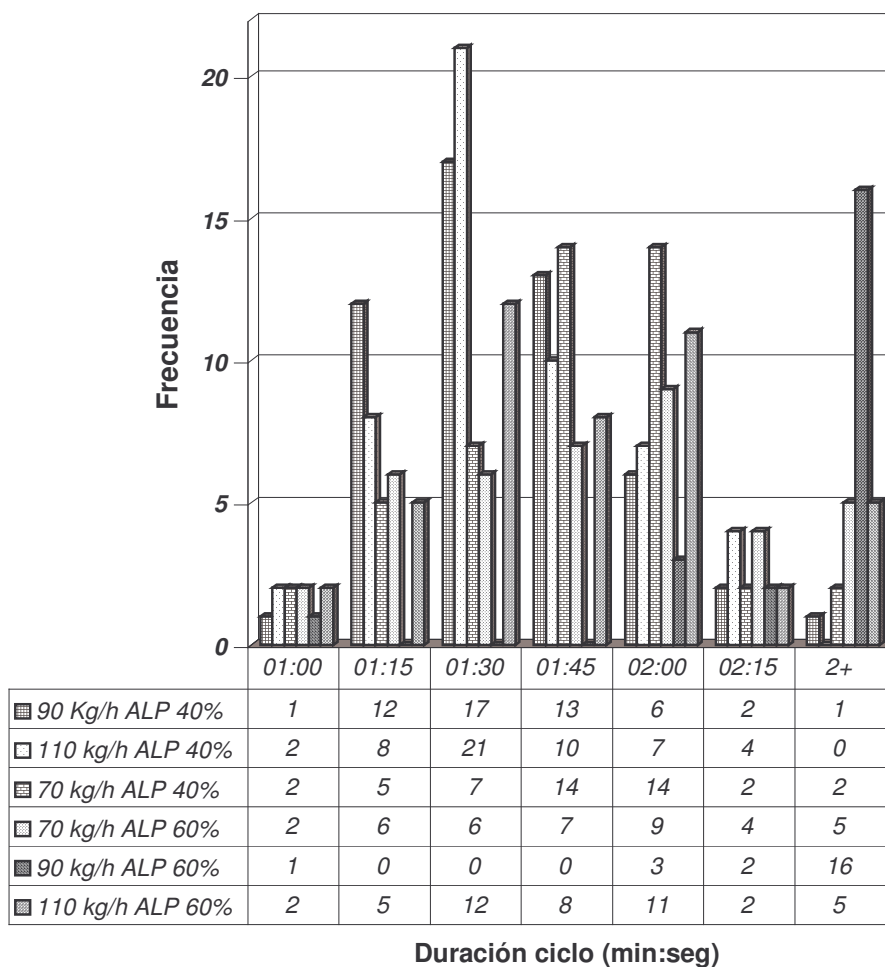


Figura 60. Frecuencia de ciclos en cámara Ward-CIMPA

De acuerdo con lo anterior, para una cámara de combustión Ward-CIMPA es recomendable operar y diseñar con un tiempo de ciclo de 90 segundos.

- **Cámara Plana-CIMPA.** En la tabla 12, se reportan los tiempos de ciclos determinados para las diferentes corridas experimentales llevadas a cabo en la cámara Plana-CIMPA.

Tabla 12. Tiempos de ciclo para la cámara Plana-CIMPA.

Área libre de parrilla	40%		60%	
Flujo de bagazo (kg/h)	220	180	220	180
Humedad Promedio	25.71	29.38	36.7	31.84
	min:seg	min:seg	min:seg	min:seg
1	01:06	01:20	02:26	02:08
2	03:22	00:54	02:58	01:42
3	02:00	01:30	02:04	02:16
4	01:44	01:54	00:36	02:20
5	01:10	02:20	00:46	02:40
6	02:18	02:06	01:56	02:00
7	02:06	01:42	01:46	02:24
8	02:02	02:14	01:24	01:50
9	02:00	01:20	01:30	02:22
10	01:34	02:14	02:24	02:06
11	03:02	02:18	01:06	02:30
12	01:58	02:24	01:26	01:54
13	02:08	02:24	02:58	03:00
14	02:00	01:46	02:00	01:52
15	02:24	02:08	01:26	02:06
16	02:04	02:24	01:54	02:04
17	02:02	01:36	01:06	01:36
18	01:42	02:06	01:32	02:14
19	01:54	02:16	01:22	01:52
20	02:12	02:42	01:58	02:08
21	02:34	02:30	01:00	01:52
22	02:06	01:54	02:06	02:14
23	02:04	02:12	01:18	02:10
24	01:32	00:48	01:32	01:48
25	01:56	01:04	01:54	01:44
26	00:58	01:22	02:12	02:10
27	01:28	01:34	02:18	02:24
28	01:54	02:18	02:54	02:18
29	00:44	01:36	01:28	02:32
30	01:08	02:08	01:50	02:28
31	02:24	01:36	01:40	02:36
32	01:58	01:00	02:14	02:08
33	02:00	01:48	03:54	02:22
34	02:02	01:42	03:16	02:00
35	02:00	01:26	02:26	02:18
36	01:58	01:30	02:54	01:48
37	02:42	02:08	01:24	00:54
38	01:42	01:56	00:54	02:32
39	01:12	01:26	02:04	02:22
40	02:56	02:12	02:18	02:06
41	06:12	02:24	02:02	02:14

Área libre de parrilla	40%	40%	60%	60%
Flujo de bagazo (kg/h)	220	180	220	180
Humedad Promedio	25.71	29.38	36.7	31.84
	min:seg	min:seg	min:seg	min:seg
42	02:16	01:30	02:30	
43	02:02	02:04	02:16	
44	02:04	02:06	02:24	
45		01:08	02:04	
46		03:22	02:26	
47		01:54		
<b>Promedio</b>	02:03.6	01:52.7	01:56.5	02:08.9
<b>Desviación estándar</b>	00:49.5	00:30.8	00:41.5	00:21.3

Fuente: Investigación de los autores

La alimentación llevada a cabo en la cámara Plana-CIMPA fue mas constante durante las corridas, por esta razón el tiempo de ciclo es más regular con respecto a la cámara Ward-CIMPA, pero se obtienen menores temperaturas y con una amplitud y frecuencia mucho más grandes entre ciclo y ciclo. Al igual que en la cámara Ward-CIMPA, es posible expresar los datos de la tabla 11 en un gráfico de frecuencias como el que se presenta en la figura 61, allí se observa que los ciclos con mayor repetición son de 120 y 135 segundos para todas las configuraciones y experimentaciones

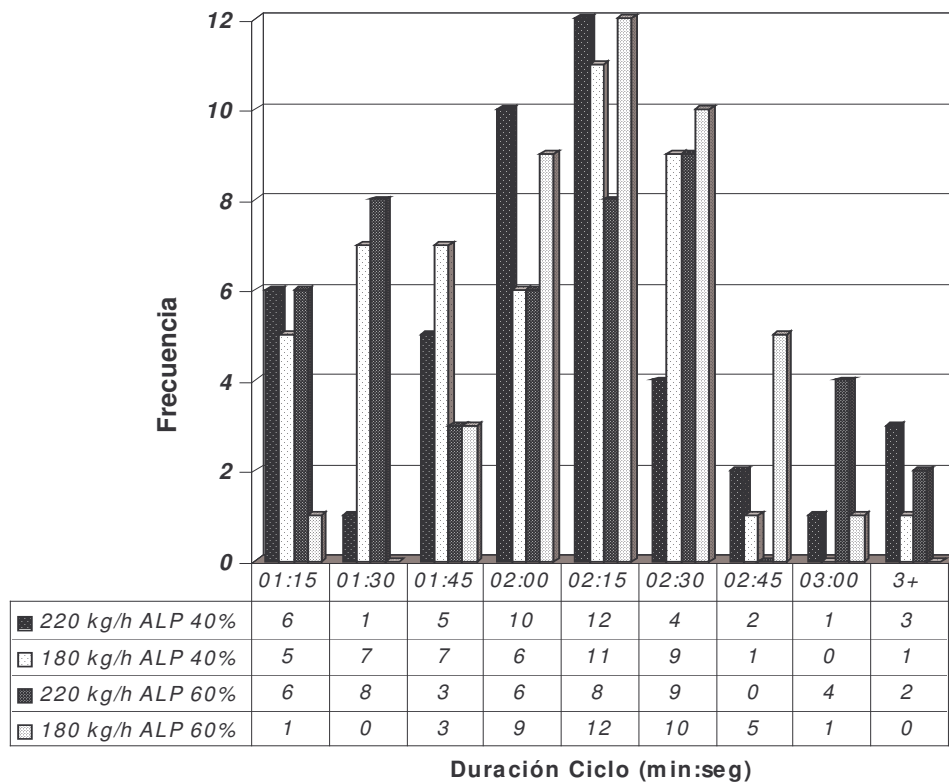


Figura 61. Frecuencia de ciclos en cámara Plana-CIMPA.

De acuerdo con lo anterior, para una cámara de combustión Plana-CIMPA es recomendable operar y diseñar con un tiempo de ciclo de 135 segundos.

Los perfiles de temperatura de las figuras 40 a 59, muestran la diferencia en cuanto al desempeño de cada tipo de cámara; el perfil desarrollado en la cámara Ward-CIMPA en cada cambio de ciclo presenta una menor amplitud, obteniendo una mayor estabilidad de la cámara, pues se desarrolla una potencia más constante, pero en el caso de la Plana-CIMPA, aunque los ciclos se observan más claramente, se presenta una mayor amplitud del perfil de temperatura, desarrollando potencias muy variadas durante el proceso; este comportamiento es debido sin duda alguna al diseño propio de la cámara, pues cuando se abre la puerta de alimentación de una Plana-CIMPA, el lecho incandescente directamente se expone al aire frío reduciendo drásticamente la temperatura del lecho, suceso que ocurre con menor incidencia en la Ward-CIMPA, puesto que la puerta de alimentación se encuentra más arriba del lecho.

#### **4.3. FRENTE DE COMBUSTIÓN.**

La cámara de combustión, es el lugar donde debe llevarse a cabo este proceso; pero el análisis de resultados de los experimentos muestran que la combustión finaliza en el ducto de la hornilla. Un balance de energía antes y después de cada paila, muestra que aun se genera calor debajo de la primera paila en el caso de la cámara Ward-CIMPA y aun después de la segunda paila en el caso de la cámara Plana-CIMPA. Después de estas pailas, puede que aun tengan lugar las reacciones de combustión, pero no son significativas para el dimensionamiento la cámara de combustión.

Una medida cualitativa para determinar donde termina la combustión, es la longitud de la llama; algunos autores han desarrollado fórmulas basados en la longitud de la llama para determinar la energía liberada por la combustión, pero hay casos en los que la combustión tiene lugar sin incandescencia y aplicar este procedimiento podría resultar incorrecto.

Para demostrar lo anterior, se supone que la combustión termina en tres puntos diferentes: antes de la primera paila, después de ella o después de la segunda paila; se hace el balance de energía respectivo y se determinan la potencias entregadas por la cámara al proceso; en aquellos casos en los que se incluyen una o dos pailas, se tiene en cuenta la energía suministrada para la evaporación del agua en el cálculo de la potencia entregada.

En las figuras 62 y 63 se identifica la relación entre el punto donde se supone termina la cámara y la potencia entregada por la cámara, las curvas presentadas corresponden a diferentes excesos:

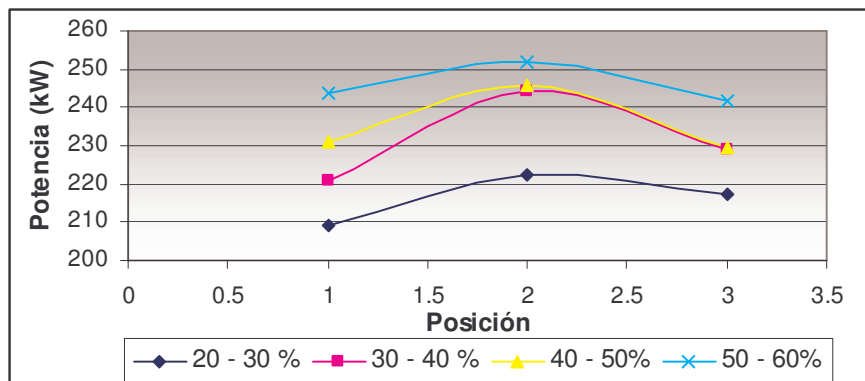


Figura 62. Frente de combustión cámara Ward-CIMPA.

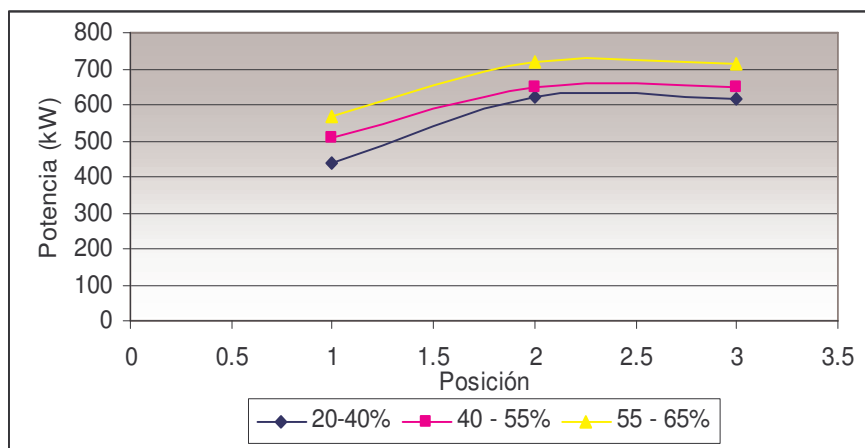


Figura 63. Frente de combustión cámara Plana-CIMPA.

Las posiciones 1, 2 y 3, de ambas figuras, corresponden a los puntos en que se calculó la potencia de la cámara. En los dos tipos de cámara se observa que la combustión tiene lugar más allá de donde termina la cámara: En la posición 2 la potencia aumenta debido a que la combustión todavía tiene lugar debajo de la primera paila y segunda paila, para las cámaras Ward-CIMPA y Plana-CIMPA respectivamente.

En la posición 3, de las dos figuras, la potencia reportada es menor, esto es debido a las pérdidas de calor por radiación y convección en el ducto son mayores que el calor que se pueda estar generando por reacción, de esta manera es posible concluir que la combustión es significativa debajo de la primera paila en caso de la Ward-CIMPA y es hasta ese punto donde se debe dimensionar la cámara; y hasta después de la segunda paila en el caso de la cámara Plana-CIMPA.

#### 4.4. EFICIENCIA ENERGÉTICA DE LAS CÁMARAS DE COMBUSTIÓN

**4.4.1. Balance de energía.** Como se demostró anteriormente, el frente de combustión se desarrolla aun bajo las primeras pailas, por esa razón para el balance de energía de la cámara se debe tener en cuenta la masa de agua evaporada en cada paila. La figura 64, muestra el esquema general del balance de energía utilizado en las cámaras de combustión.

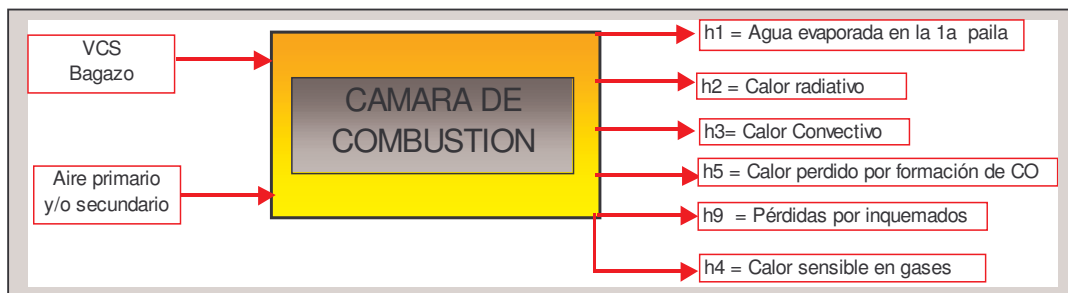


Figura 64. Balance de energía en la cámara de combustión.

Para el balance en la cámara, el término de calor sensible en los gases (h9) incluye el vapor de agua formado por combustión de hidrógeno, el agua contenida en el combustible, y el agua contenida en el aire suministrado al proceso, la energía entregada por la cámara al proceso en ese punto, corresponde al contenido entálpico de los gases húmedos que circulan por allí, así en balance de energía está dado en los siguientes términos:

Así, el balance en la cámara estará dado por:

$$VCS + h_{air} - h1 - h2 - h3 - h4 - h5 - h9 = 0 \quad \text{Ec.4.1}$$

Donde:

VCS = Valor Calórico Superior del bagazo

h's = Contenido calórico de las corrientes involucradas en el proceso, [kJ/kg bagazo]

$$VCS = 19300 - 19.3 * \%Hum_{comb} - 19.3 * \%e \quad \text{Ec.4.2}$$

$$h_{air} = 0.79 \left[ 1.028(T_e - T_{amb}) + 8.19 \cdot 10^{-5} \left( \frac{T_e^2}{2} - \frac{T_{amb}^2}{2} \right) \right] + 0.21 \left[ 0.895(T_e - T_{amb}) + 0.0000752 \left( \frac{T_e^2}{2} - \frac{T_{amb}^2}{2} \right) \right]$$

$$\text{Ec. 4.3}$$

$$h1 = 2.326 * Wg (h_s - h_e) \quad [\text{kJ/Kg}_{\text{agua evaporada}}] \quad \text{Ec. 4.4}$$

$$h_4 = h_{gs} + h_{H_2O} \quad \text{Ec. 4.5}$$

$$h_{gs} = \left[ \begin{aligned} &6.5 \cdot N_2 \left[ (T_g - T_R) + 5 \cdot 10^{-4} (T_g^2 - T_R^2) \right] + 8.27 \cdot O_2 \left[ (T_g - T_R) + 1.29 \cdot 10^{-4} (T_g^2 - T_R^2) + 187700 \left( \frac{1}{T_g} - \frac{1}{T_R} \right) \right] \\ &+ 10.34 \cdot CO_2 \left[ (T_g - T_R) + 1.37 \cdot 10^{-3} (T_g^2 - T_R^2) + 195500 \cdot \left( \frac{1}{T_g} - \frac{1}{T_R} \right) \right] + 6.6 \cdot CO \left[ (T_g - T_R) + 6 \cdot 10^{-4} (T_g^2 - T_R^2) \right] \end{aligned} \right] \cdot (4.1868 \cdot 10^{-3})$$

Ec. 4.6

$$h_{H_2O} = 9H(1089 - T_f + 0.46T_{gf}) + W_{mf}(1089 - T_f + 0.46T_{gf}) + 0.46 \cdot W_{ma}(T_{gf} - T_a)$$

Ec. 4.7

$$h_5 = \frac{\%CO}{\%CO + \%CO_2} \cdot 23702 \cdot C \quad \text{Ec. 4.8}$$

Luego, por el balance obtenemos h10 que corresponde a las pérdidas por radiación, convección e inquemados en la cámara de combustión:

$$h_{10} = h_2 + h_3 + h_9 = VCS + h_{air} - h_1 - h_4 - h_5 - h_6 - h_7 - h_8 \quad \text{Ec. 4.9}$$

Nomenclatura:

$T_e$	=	Temperatura de entrada del aire (°C)
$T_a$	=	Temperatura de entrada del aire (°F)
$T_{amb}$	=	Temperatura ambiente (°C)
$h_{gs}$	=	Contenido calórico de gases secos
$h_{H_2O}$	=	Contenido calórico del agua contenida en los gases de combustión
$T_f$	=	Temperatura de entrada del aire (°F)
$T_g$	=	Temperatura de gases (K)
$T_{gf}$	=	Temperatura de gases (°F)
$T_f$	=	Temperatura de entrada del combustible (°F)
$T_R$	=	Temperatura de referencia = 25 °C
H	=	%hidrógeno en el combustible/100
C	=	kg de carbono / kg de bagazo seco
Wg	=	lb vapor generado / lb de combustible quemado
$W_{mf}$	=	masa humedad / masa de bagazo húmedo
$W_{ma}$	=	lb H <sub>2</sub> O / lb aire x lb aire suministrado / lb combustible quemado
%H <sub>2</sub>	=	porcentaje de hidrógeno en el bagazo seco
N <sub>2</sub> , CO, CO <sub>2</sub> , CO	=	Moles/Kg bagazo húmedo
%CO, %CO <sub>2</sub>	=	Porcentaje en volumen en gases de chimenea

A partir de las ecuaciones anteriores se obtienen las tablas 12 a 16, en donde se reportan para los dos tipos de cámara de combustión, las potencias desarrolladas en cada corrida experimental y su respectiva eficiencia a partir del valor calórico del bagazo húmedo.

- **Cámara Ward-CIMPA.** Las tablas 13, 14 y 15, reportan la masa en kilogramos de gases de combustión emitidos por hora de operación, exceso y potencia para cada medición; las cuales se realizaron a la salida de la cámara de combustión.

Tabla 13. Potencias, eficiencias, composición de gases. Flujo: 90 Kg/h, humedad 24.68%

Registro	*CO	*CO <sub>2</sub>	*O <sub>2</sub>	*N <sub>2</sub>	Total gases secos (Kg)	EXCESO %	Tm °C	Potencia KW	%Ef.	%Pérd
1	11.83	90.94	44.94	433.75	581.47	41.96	884	227.61	64.48	35.52
2	12.07	90.40	44.37	431.34	578.19	41.12	881	226.41	64.14	35.86
3	12.36	90.02	44.03	429.54	575.95	40.55	881	226.11	64.05	35.95
4	12.80	90.26	43.58	426.52	573.16	39.83	864	222.22	62.95	37.05
5	13.25	90.34	41.60	419.05	564.23	37.54	838	215.48	61.04	38.96
6	13.37	89.97	39.56	412.30	555.20	35.22	833	212.98	60.33	39.67
7	13.52	89.67	38.19	407.04	548.42	33.48	837	212.29	60.14	39.86
8	13.37	89.19	37.62	405.99	546.17	32.90	821	209.07	59.22	40.78
9	12.85	88.82	39.81	415.76	557.24	35.74	826	212.33	60.15	39.85
10	12.58	88.93	43.52	428.57	573.60	39.94	846	219.40	62.15	37.85
11	12.67	89.12	45.76	434.97	582.52	42.23	857	223.07	63.19	36.81
12	12.55	88.77	46.90	439.33	587.54	43.52	870	226.79	64.24	35.76
13	12.38	88.87	48.95	446.50	596.71	45.87	895	233.41	66.12	33.88
15	12.14	90.28	47.62	442.13	592.17	44.71	901	233.40	66.12	33.88
16	12.16	91.07	45.68	435.54	584.44	42.72	885	228.40	64.70	35.30
17	12.52	91.81	42.82	424.93	572.08	39.55	879	224.53	63.60	36.40
18	12.94	91.84	40.45	415.13	560.37	36.55	884	222.75	63.10	36.90
19	13.28	91.39	37.98	405.23	547.88	33.34	884	220.19	62.38	37.62
20	13.99	90.75	37.24	400.92	542.91	32.07	882	218.87	62.00	38.00
21	14.81	90.08	36.57	396.67	538.13	30.84	882	217.87	61.72	38.28
22	15.46	89.63	35.83	392.72	533.63	29.69	879	216.46	61.32	38.68
23	14.78	89.98	33.86	388.14	526.77	27.93	863	212.16	60.10	39.90
24	15.16	89.80	31.60	379.35	515.92	25.14	848	207.44	58.76	41.24
25	15.64	89.30	29.63	371.79	506.35	22.69	843	204.71	57.99	42.01
26	16.09	88.77	27.98	365.44	498.28	20.62	836	201.98	57.22	42.78
27	16.60	88.20	26.85	360.65	492.30	19.08	827	199.30	56.46	43.54

Fuente: Investigación de los autores.

\* Kg de gases/hora

Tabla 14. Potencias, eficiencias, composición de gases. Flujo 110 Kg/h, humedad 32%

Registro	*CO	*CO <sub>2</sub>	*O <sub>2</sub>	*N <sub>2</sub>	Total gases secos (Kg)	EXCESO %	Tm °C	Potencia KW	%Ef.	%Pérd
1	14.01	82.38	49.98	409.20	555.59	51.76	800	249.30	64.44	35.55
2	13.76	82.30	45.78	396.32	538.18	46.78	807	246.76	63.79	36.20
3	13.21	82.51	42.76	387.31	525.81	43.24	809	244.41	63.18	36.81
4	12.89	82.40	40.58	381.02	516.9	40.69	819	244.44	63.19	36.80
5	12.69	82.29	38.79	375.78	509.57	38.59	822	243.33	62.90	37.09
6	12.59	82.39	37.76	372.85	505.6	37.46	811	239.98	62.03	37.96
7	12.85	82.28	36.02	366.74	497.92	35.26	791	234.11	60.52	39.47
8	13.62	81.44	33.20	355.65	483.93	31.26	775	227.88	58.90	41.09
9	14.65	80.50	30.54	344.28	469.99	27.27	763	222.46	57.50	42.49
10	15.87	79.37	28.06	332.86	456.17	23.32	766	219.98	56.86	43.13
11	16.94	78.30	25.94	323.11	444.32	19.92	767	217.64	56.26	43.73
12	17.81	77.49	24.47	315.99	435.78	17.48	767	215.83	55.79	44.20
13	18.39	76.89	23.34	310.67	429.32	15.63	759	213.02	55.06	44.93
14	18.61	76.60	22.65	307.92	425.79	14.62	752	210.98	54.54	45.45
15	18.59	76.52	22.45	307.38	424.94	14.38	743	209.15	54.06	45.93
16	18.54	76.45	22.57	308.02	425.6	14.57	734	207.75	53.70	46.29
17	18.70	76.34	22.71	308.03	425.8	14.62	725	206.09	53.27	46.72
18	18.93	76.18	22.70	307.34	425.17	14.44	728	206.54	53.39	46.60
19	19.14	76.07	22.64	306.57	424.43	14.23	732	207.13	53.55	46.45
20	19.39	76.09	22.45	305.03	422.99	13.82	732	206.85	53.47	46.52
21	19.63	75.99	22.15	303.33	421.13	13.29	735	206.86	53.47	46.52
22	19.36	76.17	22.01	303.63	421.19	13.31	738	207.50	53.64	46.35
23	18.19	76.91	22.23	307.80	425.14	14.44	741	208.77	53.96	46.03
24	17.82	77.17	22.48	309.65	427.13	15.01	743	209.70	54.21	45.78
25	17.39	77.27	22.75	311.84	429.27	15.62	757	212.76	55.00	44.99
26	16.87	77.62	23.16	314.57	432.23	16.47	768	215.40	55.68	44.31

Fuente: Investigación de los autores.

\* Kg de gases/hora

Tabla 15. Potencias, eficiencias, composición de gases. Flujo 70 Kg/h, humedad 21%

Registro	*CO	*CO <sub>2</sub>	*O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	Total gases secos(Kg)	Exceso %	Tm °C	Potencia KW	%Ef.	%Pérd
1	15.44	79.04	52.95	407	554.03	69.96	700.05	187.76	65.65	34.35
2	14.53	67.75	17.38	260	359.78	13.09	774.76	157.45	55.05	44.95
3	14.78	67.26	15.58	253	350.46	10.38	732.34	158.65	55.47	44.53
4	13.64	68.52	17.39	263	362.92	14.18	677.29	162.14	56.69	43.31
5	12.61	69.95	21.44	283	386.74	21.25	653.80	167.64	58.61	41.39
6	12.79	71.58	27.55	308	420.38	31.12	656.16	176.05	61.55	38.45
7	12.56	72.66	33.82	332	451.41	40.03	665.84	183.14	64.03	35.97
8	11.32	72.95	37.65	346	467.67	44.52	685.10	183.65	64.21	35.79
9	12.51	72.45	35.7	337	457.97	41.74	717.42	181.27	63.38	36.62
10	13.63	72.01	30.81	318	434.96	35.21	712.36	176.71	61.78	38.22
11	13.38	70.63	24.74	294	402.95	25.90	703.80	170.47	59.60	40.40
12	12.99	69.16	19.74	273	375.13	17.72	690.68	166.17	58.10	41.90

Registro	*CO	*CO <sub>2</sub>	*O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	Total gases secos(Kg)	Exceso %	Tm °C	Potencia KW	%Ef.	%Pérd
13	12.45	69.21	17.98	268	367.44	15.57	701.24	167.70	58.64	41.36
14	11.13	70.52	18.99	275	375.88	18.20	696.64	170.94	59.77	40.23
15	9.94	72.53	23.39	296	401.64	25.84	724.48	178.85	62.53	37.47
16	9.41	73.70	26.81	310	420.19	31.27	740.62	183.07	64.01	35.99
17	9.54	73.52	26.91	310	420.36	31.29	757.07	180.50	63.11	36.89
18	9.84	73.33	27.01	310	420.17	31.20	757.10	179.15	62.64	37.36
19	10.3	72.95	25.65	304	413.21	29.19	771.15	177.19	61.95	38.05
20	10.28	72.37	23.17	294	399.88	25.29	773.63	173.81	60.77	39.23
21	10.24	71.57	20.43	283	384.83	20.88	774.18	172.11	60.18	39.82
22	9.61	71.43	20.98	287	388.99	22.17	773.69	175.15	61.24	38.76
23	8.76	72.68	23.93	300	405.78	27.13	781.53	180.38	63.07	36.93
24	8.11	73.99	28.8	321	431.53	34.62	785.50	185.93	65.01	34.99
25	7.84	74.83	32.16	334	448.75	39.60	781.20	187.38	65.52	34.48
26	7.50	75.33	35.97	348	466.86	44.75	776.06	187.50	65.56	34.44
27	7.58	76.27	38.37	355	476.93	47.51	771.36	188.73	65.99	34.01
28	7.63	76.16	38.05	354	475.4	47.08	789.10	186.06	65.05	34.95
29	7.86	76.62	41.4	367	492.43	52.00	789.28	189.72	66.33	33.67

Fuente: Investigación de los autores.  
\*Kg de gases/ hora

- **Cámara Plana-CIMPA.** Las tablas 16 y 17, reportan la masa en kilogramos de gases de combustión emitidos por hora de operación, exceso y potencia para cada medición; las cuales se realizaron a la salida de la cámara de combustión.

Tabla 16. Potencias, eficiencias, composición de gases. Flujo 220 Kg/h, humedad 25.71%

Registro	*CO	*CO <sub>2</sub>	*O <sub>2</sub>	*N <sub>2</sub>	Total gases secos (Kg)	Exceso %	T °C	Potencia kW	Efic.%	Pérd%
1	21.20	217.36	108.44	943.58	1290.58	53.96	795	497.55	68.61	31.39
2	22.10	217.32	102.27	924.69	1266.39	50.93	799	494.77	68.22	31.78
3	21.05	214.53	88.70	874.94	1199.21	42.54	828	493.56	68.06	31.94
4	21.01	213.73	84.36	861.27	1180.37	40.19	835	492.47	67.91	32.09
5	21.08	210.91	70.50	810.56	1113.06	31.79	838	480.23	66.22	33.78
6	19.85	211.72	76.66	834.40	1142.63	35.48	857	493.82	68.09	31.91
7	19.56	212.31	90.49	883.69	1206.05	43.40	848	503.59	69.44	30.56
8	19.98	214.15	100.54	919.92	1254.58	49.46	829	505.34	69.68	30.32
9	22.11	210.95	105.67	931.01	1269.74	51.35	832	510.28	70.36	29.64
10	24.63	207.53	109.89	937.10	1279.15	52.53	833	512.78	70.71	29.29
11	27.89	204.83	105.82	918.17	1256.71	49.73	830	507.24	69.94	30.06
12	28.52	203.26	99.39	894.00	1225.17	45.79	840	505.22	69.67	30.33
13	28.48	200.73	89.28	855.38	1173.87	39.38	862	503.96	69.49	30.51
14	27.91	201.34	85.37	843.61	1158.23	37.43	872	504.53	69.57	30.43
15	25.47	203.80	90.69	868.13	1188.10	41.16	867	508.70	70.15	29.85
16	23.14	205.82	98.92	900.45	1228.33	46.18	868	517.33	71.33	28.67
17	22.43	206.41	99.88	905.60	1234.32	46.93	868	518.28	71.47	28.53

Registro	*CO	*CO <sub>2</sub>	*O <sub>2</sub>	*N <sub>2</sub>	Total gases secos (Kg)	Exceso %	T°C	Potencia kW	Efic.%	Pérd%
18	22.13	207.61	108.47	936.58	1274.79	51.98	844	516.71	71.25	28.75
19	21.33	208.26	120.83	977.80	1328.22	58.66	842	526.51	72.60	27.40
20	21.79	207.91	123.68	985.57	1338.95	60.00	848	531.55	73.30	26.70
21	22.65	206.74	122.94	981.46	1333.79	59.35	819	517.71	71.39	28.61
22	23.64	205.73	133.71	1014.69	1377.78	64.84	778	508.33	70.09	29.91
23	24.84	205.87	144.86	1052.79	1428.36	71.16	771	514.65	70.97	29.03
24	26.45	205.78	160.39	1104.55	1497.16	79.75	772	528.04	72.81	27.19
25	26.26	191.70	164.93	1130.14	1513.04	81.74	773	534.27	73.67	26.33
26	25.22	191.88	171.40	1150.38	1538.88	84.96	782	543.41	74.93	25.07
27	24.74	192.87	175.52	1164.48	1557.61	87.30	805	558.65	77.03	22.97
28	23.70	194.40	167.90	1140.38	1526.37	83.40	834	566.42	78.10	21.90
29	22.00	196.05	148.55	1077.80	1444.40	73.16	836	550.53	75.91	24.09
30	21.42	210.50	140.20	1042.72	1414.85	69.47	840	543.13	74.89	25.11

Fuente: Investigación de los autores.

\*Kg de gases/hora

Tabla 17. Potencias, eficiencias, composición de gases. Flujo 180 Kg/h, humedad 27%

Registro	*CO	*CO <sub>2</sub>	*O <sub>2</sub>	*N <sub>2</sub>	Total gases secos (Kg)	Exceso %	T°C	Potencia kW	Efic. %	Pérd %
1	19.48	187.41	120.05	852.72	1179.67	57.95	795	432.55	67.70	32.30
2	18.80	187.80	116.58	845.18	1168.34	56.40	771	421.70	66.00	34.00
3	18.64	187.21	129.12	882.16	1217.13	63.10	733	415.75	65.07	34.93
4	19.30	188.24	143.95	928.73	1280.22	71.78	697	412.51	64.57	35.43
5	20.29	189.57	161.54	986.22	1357.62	82.45	650	405.47	63.46	36.54
6	26.76	189.27	166.38	997.23	1379.64	85.49	787	466.79	73.06	26.94
7	24.99	183.45	138.53	902.56	1249.54	67.53	793	445.56	69.74	30.26
8	24.66	181.52	128.22	867.61	1202.00	60.97	776	430.29	67.35	32.65
9	25.86	184.76	145.41	926.10	1282.13	72.03	753	435.49	68.16	31.84
10	23.73	186.00	169.13	994.53	1373.39	84.55	740	445.34	69.70	30.30
11	22.10	186.71	179.41	1021.60	1409.82	89.54	735	449.16	70.30	29.70
12	20.97	188.28	178.47	1021.49	1409.21	89.47	714	439.71	68.82	31.18
13	20.69	189.10	190.49	1056.67	1456.95	96.02	714	447.53	70.05	29.95
14	20.25	188.29	182.00	1030.31	1420.85	91.05	732	449.53	70.36	29.64
15	19.90	186.11	174.66	1011.86	1392.53	87.17	741	449.03	70.28	29.72
16	20.12	185.23	178.96	1023.08	1407.40	89.20	746	453.61	71.00	29.00
17	20.68	185.19	188.13	1046.29	1440.29	93.70	776	472.40	73.94	26.06
18	20.80	185.10	172.30	1000.90	1379.09	85.30	799	471.31	73.77	26.23
19	21.51	184.44	153.16	944.37	1303.48	74.92	797	456.47	71.45	28.55
20	22.50	185.23	140.71	907.03	1255.47	68.33	784	442.27	69.22	30.78
21	23.02	183.95	136.57	893.57	1237.11	65.80	798	444.61	69.59	30.41
22	23.15	182.66	132.20	878.75	1216.76	62.99	801	442.20	69.21	30.79
23	22.55	183.23	131.97	879.64	1217.39	63.09	790	437.90	68.54	31.46
24	21.19	183.98	135.85	894.37	1235.38	65.57	775	435.53	68.17	31.83
25	20.21	184.47	148.13	930.89	1283.70	72.21	772	442.79	69.30	30.70

Registro	*CO	*CO <sub>2</sub>	*O <sub>2</sub>	*N <sub>2</sub>	Total gases secos (Kg)	Exceso %	T °C	Potencia kW	Efic. %	Pérd %
26	20.04	186.24	159.32	964.24	1329.84	78.55	755	443.94	69.48	30.52
27	19.91	187.21	167.40	989.39	1363.90	83.24	726	437.55	68.48	31.52
28	20.58	186.84	186.07	1042.60	1436.10	93.14	713	444.02	69.50	30.50
29	20.73	187.17	191.20	1054.42	1453.52	95.52	732	454.80	71.18	28.82
30	20.25	189.56	181.36	1030.26	1421.44	91.15	765	463.53	72.55	27.45

Fuente: Investigación de los autores.  
\*Kg de gases/hora

De las tablas anteriores, se establece el comportamiento de la potencia en función del aire exceso por medio de un polinomio para cada tipo de cámara en donde en todos los casos Y representa la potencia en kilowatios y X el exceso en %.

- Ward-CIMPA, bagazo seco:

$$Y = -8E-08X^6 + 2E-05X^5 - 0.0027X^4 + 0.1545X^3 - 4.6307X^2 + 68.623X - 179.03$$

- Ward-CIMPA, bagazo húmedo:

$$Y = 2E-08X^6 - 5E-06X^5 + 0.0006X^4 - 0.0361X^3 + 1.0963X^2 - 15.407X + 248.35$$

- Plana-CIMPA, bagazo seco:

$$Y = 2E-07X^6 - 5E-05X^5 + 0.008X^4 - 0.5887X^3 + 23.053X^2 - 446.88X + 3760.2$$

De acuerdo a los resultados de potencia obtenidos experimentalmente, se lograron determinar nuevos factores de Parrilla, para los dos tipos de cámara de combustión con área libre de parrilla de 40 y 60%, como se puede apreciar en la tabla 18.

Tabla 18. Nuevos factores de parrilla experimentales.

	Área de la parrilla utilizada (m <sup>2</sup> )	Potencia experimental promedio- Tiro natural (KW)	Factor de Parrilla (Kw/m <sup>2</sup> )
<b>WARD-CIMPA</b>			
ALP 40%	0.2585	233	901
ALP 60%	0.2585	226	874
<b>PLANA- CIMPA</b>			
ALP 40 %	0.975	497	510
ALP 60 %	0.975	508	521

Fuente: Investigación de los autores

#### 4.5. EFICIENCIA EXERGÉTICA DE CÁMARAS DE COMBUSTIÓN.

Los sistemas de control para el análisis exergético son los dos tipos de cámara de combustión, en los cuales se incluyen el área de transferencia de calor de la primera paila para la Ward-CIMPA y de las dos primeras pailas para la Plana-CIMPA, el montaje del sistema de variación de velocidad del ventilador que se operó a tres regímenes: alta VVA, baja VVB y apagado que equivaldría a trabajar a tiro natural.

Los flujos de exergía que entran al sistema son los de bagazo, aire y la potencia del motor del ventilador cuando es operado y los flujos exergéticos de salida del sistema son los de los gases de combustión y los de pérdidas por inquemados y transferencia de calor.

Para el balance exergético se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones: los gases de combustión que salen de la cámara continúan en el proceso sin que todavía se vierten a la atmósfera, el calor transferido a las primeras pailas no se considera pérdida exergética por ser energía aprovechada para la evaporación del agua suministrada a la paila, las pérdidas por radiación, convección e inquemados no se tienen en cuenta en el cálculo de la eficiencia exergética pues es energía que no se aprovecha en el sistema, igual ocurre con la exergía del vapor producido, pues el vapor no es aprovechado en el proceso, donde exergía = 0.

La expresión  $E$ , es el flujo de exergía y es igual al flujo correspondiente por la exergía específica, entonces la expresión del balance exergético para los dos tipos de cámaras de combustión es:

$$E_A + E_B + E_{VTF} = E_G + E_{CT} + I \quad \text{Ec. 4.10}$$

Donde:

$E_B$  = Exergía del bagazo = Flujo de bagazo \*  $e_B$  = [Kcal/h] → 100%

$e_B$  = Exergía específica del bagazo = VCS = 4609,73 kcal/Kg.

$E_A$  = Exergía del aire = Flujo de aire \*  $e_A$  = [Kcal/h].

$e_A$  = Exergía específica del aire (25 °C, humedad despreciable) = 1.5 Kcal/Kg aire.

$E_{VTF}$  = Exergía del Ventilador = Potencia del motor del ventilador 1.8 HP = 1154,97 Kcal/h.

$E_G$  = Exergía de los gases de combustión = Flujo de gases \*  $e_G$  = [Kcal/h].

$e_G$  = Exergía específica de los gases =  $(h-h_0) - T_0(S-S_0)$  = [Kcal/Kg gases].

$E_{QT}$  = Exergía del calor transmitido a la primera o segunda paila =

$$Q_T (T_{H_2O} - T_0) / T_{H_2O} = [\text{Kcal/h}].$$

$Q_T$  = Calor transmitido a la paila =  $U \cdot A \cdot (\Delta T)$  = [Kcal/h].

Para el cálculo de la exergía específica de los gases de combustión se determinó el dato de entalpía y entropía a temperatura de referencia de

25°C, utilizando un software de simulación de procesos, de tal forma que se definía para cada configuración experimental una corriente de gases de combustión compuesta por las fracciones molares promedio de O<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, y H<sub>2</sub>O. Los cálculos de la exergía se encuentran en el anexo L, en donde reincluyen los cálculos del calor transmitido a la primera paila para cada cámara de combustión junto con los datos de coeficientes de transferencia calor y el área de las pailas semiesféricas utilizadas.

Despejando de la ecuación 4.10 el valor de la pérdida de exergía (*I*), se calcula la **eficiencia exergética E<sub>f</sub>**. Los cálculos de eficiencia exergética promedios para las distintas configuraciones experimentales en la cámara Ward-Cimpa y Plana-Cimpa respectivamente se pueden apreciar en las tablas 19 y 20.

Tabla 19. Eficiencia exergética para las distintas configuraciones en la cámara Ward-CIMPA.

%ALP	Alimentación Kg/h	Régimen del Ventilador*	Eficiencia Exergética, %
40	70	0	38,4
		1	36,2
		2	33,3
	90	0	31,1
		1	28,4
		2	30,5
	110	0	25,8
		1	23,3
		2	24,0
60	110	0	28,8
		1	27,0
		2	26,2
	90	0	32,8
		1	33,8
		2	34,2
	70	0	41,8
		1	41,8
		2	41,7
		<b>PROMEDIO</b>	<b>40,1</b>

Fuente: investigación de los autores  
 \*0:apagado;1:velocidad baja;2:velocidad alta

Tabla 20. Eficiencia exergética para las distintas configuraciones en la cámara Plana-CIMPA.

%ALP	Alimentación Kg/h	Régimen del Ventilador*	Eficiencia Exergética, %
40	180	0	34.8
		1	43.7
		2	43.6
	220	0	37.1
		1	34.5
		2	33.5
60	180	0	38.6
		1	44.9
		2	44.3
	220	0	34.2
		1	37.0
		2	35.3
		<b>PROMEDIO</b>	<b>35.01</b>

Fuente: investigación de los autores  
 \*0:apagado;1:velocidad baja;2:velocidad alta

La eficiencia exergética que resulta de las experimentaciones realizadas se encuentra dentro de rango teórico esperado, entre el 20% y 40% (CENICAÑA. Manual auditoria energética. 1998), esto al tener en cuenta que se estudió el proceso de combustión el cual es altamente irreversible con grandes pérdidas de exergía, las cuales son debidas principalmente a las irreversibilidades intrínsecas de la combustión adiabática, las irreversibilidades debidas a la transferencia de calor: radiación, convección, inquemados e irreversibilidades debidas a la disipación de la exergía de los productos.

Se plantea entonces un alto gasto y poco beneficio exergético, que se manifiesta en una alta pérdida de la capacidad de trabajo, esto se ve disminuido por consideraciones como hacer parte de la cámara de combustión el área de transferencia de calor de la primera paila de la hornilla y considerar para el balance exergético a los gases de combustión cómo un flujo exergético positivo para el balance, los cuales salen con todo un potencial de transferencia de calor que no es problema del sistema de la cámara si se aprovecha o no. En la figura 65, se pueden apreciar histogramas en el cuales se diferencian para los dos tipos de cámaras de combustión los porcentajes de exergía de entrada y salidas promedios y la proporción de las pérdidas exergéticas.

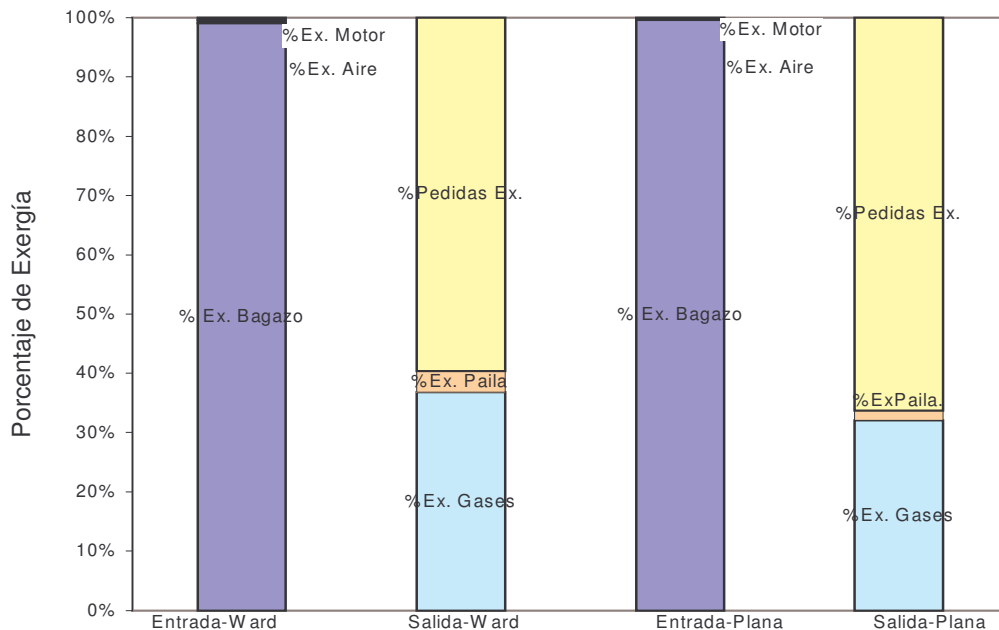


Figura 65. Histogramas con los porcentajes exergeticos de entrada y salida para los dos tipos de cámara.

Existe una diferencia ente el porcentaje de perdidas exergeticas entre la cámara Ward-CIMPA 59,56% y la Plana-CIMPA 66,36%, debido principalmente a la relación de flujos de alimentación de bagazo, al contenido energético de los gases de combustión pues en la Ward-CIMPA se desarrollan temperaturas de cámara mas elevadas que aumentan la entalpía de los gases.

#### 4.6. FACTORES DE EMISIÓN DE GASES DE COMBUSTIÓN.

Estos factores se calculan para cuantificar las emisiones de monóxido de carbono, en el tiempo de muestreo llevado a cabo en las corridas experimentales. La norma establece un muestreo continuo durante 24 horas de operación o mínimo de una hora; en nuestro caso el muestreo de gases no superó los 40 minutos. Por esta razón, en esta sección solo se reportan las emisiones en kilogramos de monóxido de carbono emitido por kW producido, como lo recomienda la Agencia de Protección Ambiental (EPA), estos resultados se pueden apreciar en las tablas de la 21 a la 25.

Hugot (1982), establece que es normal encontrar hornos que queman bagazo con emisiones cercanas a 18 kg de CO por hora de operación y de 125 kg de CO<sub>2</sub> por hora de operación aproximadamente. Como se puede apreciar en las tablas de la 21 a la 25, los resultados experimentales de Kg por hora de CO y CO<sub>2</sub> no superan lo establecido en emisiones para un buen comportamiento en las cámaras de combustión.

- **Cámara Ward-CIMPA.** En las tablas de la 21 a la 23 se encuentran factores de emisión de Kg de monóxido de carbono emitido por KW, para la cámara Ward-Cimpa a regímenes de tiro natural.

Tabla 21. Factores de emisión experimento CW01.

*CO	*CO <sub>2</sub>	*O <sub>2</sub>	*N <sub>2</sub>	EPA KgCO/kW
12,07	90,40	44,37	431,34	0,05
12,36	90,02	44,03	429,54	0,05
12,80	90,26	43,58	426,52	0,06
13,25	90,34	41,60	419,05	0,06
13,37	89,97	39,56	412,30	0,06
13,52	89,67	38,19	407,04	0,06
13,37	89,19	37,62	405,99	0,06
12,85	88,82	39,81	415,76	0,06
12,58	88,93	43,52	428,57	0,06
12,67	89,12	45,76	434,97	0,06
12,55	88,77	46,90	439,33	0,05
12,38	88,87	48,95	446,50	0,05
12,26	89,62	49,87	449,37	0,05
12,14	90,28	47,62	442,13	0,05
12,16	91,07	45,68	435,54	0,05
12,52	91,81	42,82	424,93	0,05
12,94	91,84	40,45	415,13	0,06
13,28	91,39	37,98	405,23	0,06
13,99	90,75	37,24	400,92	0,06
14,81	90,08	36,57	396,67	0,06
15,46	89,63	35,83	392,72	0,07
14,78	89,98	33,86	388,14	0,06
15,16	89,80	31,60	379,35	0,07
15,64	89,30	29,63	371,79	0,07
16,09	88,77	27,98	365,44	0,07
16,60	88,20	26,85	360,65	0,07
18,25	86,92	25,57	351,79	0,08
19,25	85,94	24,41	345,38	0,08
20,06	85,26	23,51	340,34	0,09
20,90	84,58	22,70	335,53	0,09
21,68	84,07	21,96	330,96	0,09
22,40	83,56	21,34	326,91	0,10
22,86	83,18	20,84	324,02	0,10
23,00	83,04	20,53	322,64	0,10
23,03	83,04	20,41	322,15	0,10
23,32	82,73	20,35	321,25	0,10
23,65	82,48	20,30	320,23	0,10
24,07	82,17	20,20	318,81	0,11

Fuente: Investigación de los autores  
\*Kg de gas seco/ hora

Tabla 22. Factores de emisión experimento CW04.

*CO	*CO <sub>2</sub>	*O <sub>2</sub>	*N <sub>2</sub>	EPA KgCO/kW
12,9735	81,3415	49,0022	409,6905	0,0505
13,5185	80,9158	51,7686	417,3637	0,0519
13,7928	80,9958	53,1728	420,6962	0,0534
13,8508	81,7764	52,8823	418,9446	0,0547
14,0125	82,3865	49,9823	409,2074	0,0562
13,7689	82,3031	45,7887	396,3220	0,0558
13,2125	82,5141	42,7611	387,3196	0,0541
12,8941	82,4002	40,5804	381,0221	0,0527
12,6955	82,2955	38,7918	375,7841	0,0522
12,5920	82,3940	37,7654	372,8521	0,0525
12,8568	82,2886	36,0260	366,7481	0,0549
13,6213	81,4491	33,2001	355,6579	0,0598
14,6530	80,5047	30,5450	344,2879	0,0659
15,8750	79,3702	28,0608	332,8668	0,0722
16,9489	78,3091	25,9427	323,1180	0,0779
17,8152	77,4911	24,4746	315,9962	0,0825
18,3991	76,8981	23,3408	310,6799	0,0864
18,6087	76,6028	22,6581	307,9242	0,0882
18,5869	76,5223	22,4502	307,3804	0,0889
18,5394	76,4535	22,5785	308,0283	0,0892
18,6998	76,3465	22,7173	308,0316	0,0907
18,9335	76,1877	22,7028	307,3461	0,0917
19,1366	76,0789	22,6451	306,5712	0,0924
19,3971	76,0996	22,4555	305,0377	0,0938
19,6368	75,9982	22,1567	303,3345	0,0949
19,3643	76,1738	22,0150	303,6385	0,0933
18,1888	76,9113	22,2390	307,8048	0,0871
17,8149	77,1741	22,4886	309,6512	0,085
17,3900	77,2763	22,7515	311,8483	0,0817
16,8781	77,6159	23,1675	314,5702	0,0784
16,5746	77,8854	23,6389	316,8621	0,0768
17,1149	77,6290	23,9332	316,2132	0,0802
16,5842	78,1077	24,4708	319,3893	0,0782
16,5457	78,0414	24,8510	320,8003	0,0793
16,8317	77,8113	24,9014	320,2180	0,0812
17,2088	77,4980	24,7256	318,6839	0,0826
17,5003	77,2197	24,4540	317,0786	0,0831
18,0229	76,7598	23,9403	313,9583	0,0843
17,9641	76,8523	23,5588	312,8013	0,0827
17,5442	77,1989	23,3635	313,2731	0,0794
17,0668	77,5538	23,0823	313,6544	0,0762

Fuente: Investigación de los autores  
\*Kg gas seco/hora

Tabla 23. Factores de emisión experimento CW07.

*CO	*CO <sub>2</sub>	*O <sub>2</sub>	*N <sub>2</sub>	EPA KgCO/kW
9,046	77,716	33,661	341,573	0,054
9,625	80,454	45,409	386,572	0,054
10,136	80,726	60,897	439,106	0,053
10,317	79,397	74,931	479,800	0,051
12,844	79,399	68,882	460,176	0,063
15,445	79,046	52,947	406,590	0,082
16,444	76,104	37,572	350,089	0,094
15,359	72,166	25,676	299,272	0,094
14,530	67,757	17,383	260,110	0,092
14,789	67,266	15,585	252,817	0,093
13,641	68,529	17,394	263,359	0,084
12,616	69,958	21,443	282,726	0,075
12,790	71,588	27,553	308,452	0,073
12,563	72,666	33,820	332,364	0,069
11,329	72,959	37,652	345,729	0,062
12,515	72,456	35,700	337,299	0,069
13,637	72,017	30,807	318,500	0,077
13,380	70,639	24,740	294,192	0,078
12,996	69,166	19,738	273,228	0,078
12,451	69,214	17,977	267,797	0,074
11,131	70,525	18,995	275,228	0,065
9,941	72,539	23,394	295,762	0,056
9,415	73,709	26,805	310,263	0,051
9,545	73,529	26,910	310,374	0,053
9,846	73,332	27,007	309,980	0,055
10,300	72,951	25,654	304,308	0,058
10,289	72,376	23,170	294,042	0,059
10,245	71,577	20,430	282,581	0,060
9,615	71,435	20,980	286,958	0,055
8,769	72,684	23,931	300,398	0,049
8,116	73,995	28,797	320,621	0,044
7,841	74,834	32,157	333,917	0,042
7,507	75,338	35,965	348,049	0,040
7,581	76,274	38,370	354,709	0,040
7,636	76,164	38,053	353,551	0,041
7,865	76,624	41,396	366,546	0,041
8,213	77,127	46,221	384,852	0,042
8,731	77,562	53,082	409,694	0,044
9,526	77,083	52,567	406,482	0,049
11,077	76,768	49,121	393,842	0,058
12,800	75,914	37,964	353,554	0,072
13,657	73,289	26,977	309,679	0,081
13,499	68,865	17,337	264,153	0,084

Fuente: Investigación de los autores  
\*Kg gas seco/hora

- **Cámara Plana-CIMPA.** En las tablas 24 y 25, se encuentran factores de emisión para la cámara Plana-Cimpa a regímenes de tiro natural.

Tabla 24. Factores de emisión experimento CP01.

*CO	*CO <sub>2</sub>	*O <sub>2</sub>	*N <sub>2</sub>	EPA KgCO/kW
33,1338	217,5881	176,9346	1255,9487	0,05122
34,1677	217,7947	174,2719	1243,5582	0,05329
34,9527	217,9148	171,0805	1230,1798	0,05486
34,0865	218,4175	161,0947	1200,9654	0,05456
32,3967	217,4306	153,0673	1181,4372	0,05337
31,0805	216,7844	147,1815	1166,9111	0,05189
30,3662	216,6810	142,7320	1154,2919	0,05079
30,3427	216,8661	137,7439	1137,0521	0,05146
31,6212	216,8007	137,8002	1132,9828	0,05378
32,8330	216,7385	135,9620	1123,1023	0,0555
33,6705	216,4509	133,2073	1111,5172	0,05708
33,3723	216,6430	130,9595	1104,7320	0,05659
32,3433	217,0449	129,5454	1103,1679	0,05447
31,7070	217,7823	126,5906	1095,1578	0,05334
31,7323	218,7762	123,0996	1083,2822	0,05335
31,8872	218,8777	118,2394	1067,4696	0,05389
32,1923	218,1041	113,5319	1051,2455	0,05514
32,0707	218,2052	109,6460	1037,9258	0,05538
31,4009	218,5057	108,0939	1034,7212	0,05448
30,5361	218,7823	107,5348	1035,6019	0,0535
29,5828	219,4517	108,2424	1040,4596	0,0523
28,8844	220,3051	108,5204	1043,0028	0,05051
28,2833	220,0431	110,4120	1051,8534	0,0493
28,0726	220,0809	112,9301	1061,0503	0,04864
27,1583	220,5601	115,4675	1071,9893	0,04704
26,0148	222,1342	117,7670	1081,7520	0,04673
24,9029	222,6938	119,6498	1091,0416	0,04915
24,4031	223,1763	120,7026	1095,8945	0,05416
24,3998	223,4114	120,3014	1094,3826	0,06309
25,3116	222,6940	118,0187	1084,7680	0,07992
25,9881	220,7426	116,9072	1080,6245	0,09487
26,7979	220,5711	119,9091	1088,2681	0,10454
27,3624	220,7490	118,9090	1082,7371	0,11031
27,3641	221,2000	117,3449	1077,2271	0,1074
26,8096	221,4542	115,4597	1073,1097	0,09816
26,6440	222,4515	117,0097	1077,8406	0,09291
26,7198	222,6745	114,2251	1067,6692	0,09064
26,6501	223,1271	113,0836	1063,6359	0,08977
25,9897	223,4049	111,7888	1061,4352	0,0884
25,2320	223,2671	117,0303	1081,0867	0,08649
24,9767	224,4835	122,5570	1100,3484	0,08614

*CO	*CO <sub>2</sub>	*O <sub>2</sub>	*N <sub>2</sub>	EPA KgCO/kW
24,7859	225,0278	125,4393	1110,0903	0,08617
24,8329	224,8179	123,7655	1104,9938	0,086
25,5908	224,0741	123,9426	1103,7149	0,08865
26,0164	224,9111	122,2725	1096,0928	0,09038
25,7852	225,2088	115,1325	1071,7908	0,09025
25,8037	225,1656	107,2709	1045,5983	0,09122
26,0363	225,2814	103,8391	1033,8435	0,0928
26,3062	225,5015	100,1172	1020,8807	0,09529
27,3287	224,8223	93,7196	996,6747	0,10273
28,3670	223,1230	89,8850	981,1828	0,1172
28,8440	222,3259	88,9730	977,1922	0,09913
28,9382	223,8602	96,3037	1002,5685	0,08276
28,4118	225,2607	101,9777	1022,3355	0,06845
27,1707	227,4366	108,6258	1045,6889	0,0553
26,2672	231,2354	111,2598	1053,2286	0,04504
25,5125	232,9135	112,2120	1056,9092	0,04328
24,8840	232,9550	104,7499	1034,0089	0,043
24,1984	233,1292	101,0116	1023,5248	0,04321
23,8174	234,6466	101,5425	1025,4860	0,0448
23,2363	232,7047	105,8835	1044,4315	0,04618

Fuente: Investigación de los autores  
\*Kg gas seco/hora

Tabla 25. Factores de emisión experimento CP04.

*CO	*CO <sub>2</sub>	*O <sub>2</sub>	*N <sub>2</sub>	EPA KgCO/kW
21,204	217,360	108,445	943,576	0,04262
22,105	217,319	102,273	924,688	0,04468
21,047	214,531	88,696	874,936	0,04264
21,011	213,728	84,362	861,267	0,04267
21,085	210,910	70,501	810,562	0,04391
19,853	211,717	76,656	834,402	0,0402
19,556	212,313	90,488	883,689	0,03883
19,976	214,145	100,540	919,920	0,03953
22,109	210,949	105,668	931,010	0,04333
24,631	207,526	109,892	937,105	0,04803
27,892	204,827	105,821	918,173	0,05499
28,515	203,263	99,395	893,998	0,05644
28,484	200,729	89,282	855,377	0,05652
27,910	201,339	85,371	843,605	0,05532
25,470	203,804	90,695	868,131	0,05007
23,141	205,823	98,917	900,453	0,04473
22,430	206,409	99,878	905,598	0,04328
22,125	207,610	108,473	936,578	0,04282
21,332	208,255	120,832	977,801	0,04052
21,787	207,905	123,682	985,574	0,04099
22,651	206,741	122,938	981,458	0,04375

*CO	*CO <sub>2</sub>	*O <sub>2</sub>	*N <sub>2</sub>	EPA KgCO/kW
23,641	205,729	133,715	1014,694	0,04651
24,838	205,867	144,864	1052,790	0,04826
26,446	205,781	160,387	1104,547	0,05008
26,262	191,700	164,934	1130,139	0,04916
25,218	191,881	171,401	1150,383	0,04641
24,738	192,866	175,524	1164,482	0,04428
23,701	194,397	167,897	1140,378	0,04184
21,997	196,050	148,551	1077,802	0,03996
21,422	210,504	140,201	1042,720	0,03944
21,279	211,078	135,502	1028,133	0,03915
20,753	210,241	126,330	997,299	0,03869
20,676	209,721	124,315	990,204	0,03872
20,659	210,088	123,723	988,002	0,03866
20,774	209,818	125,180	992,224	0,03884
20,990	209,694	126,643	996,233	0,03884
21,096	209,856	123,494	985,597	0,03865
22,163	208,416	110,873	941,098	0,04135
23,096	204,961	99,770	907,121	0,04432
23,441	204,413	98,407	901,632	0,04587
23,818	203,952	99,420	904,519	0,04662

Fuente: Investigación de los autores

\* Kg gas seco/hora

#### 4.7. FORMACIÓN DE ESCORIA EN LAS PARRILLAS DE LAS CÁMARAS DE COMBUSTIÓN.

**4.7.1. Caudales de aire primario y secundario en la cámara Ward-CIMPA.** En las figuras 66 y 67, se pueden apreciar las tendencias con respecto al tiempo de la relación de los caudales de aire primario y secundario en la cámara Ward-CIMPA con parrilla de 40% área libre, operación a tiro natural y a velocidad de ventilador baja, para alimentaciones de 110, 90 y 70 Kg/h.

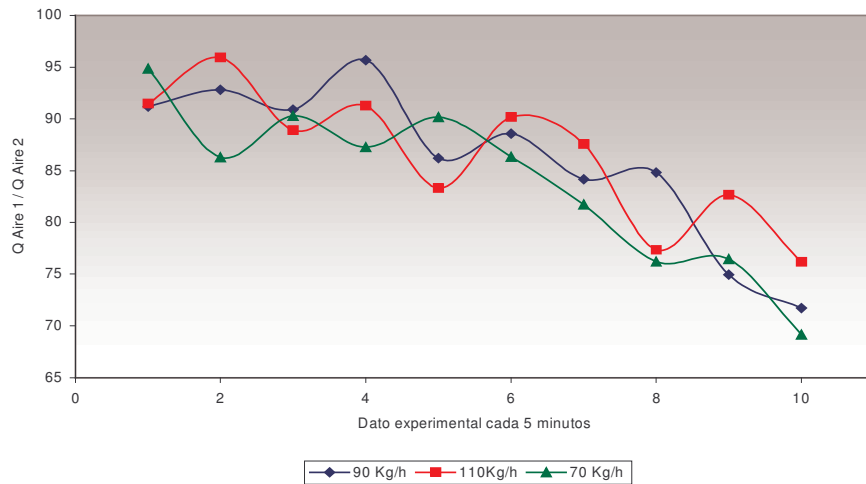


Figura 66. Relaciones de caudales de aire 1 y 2 para tiro natural.

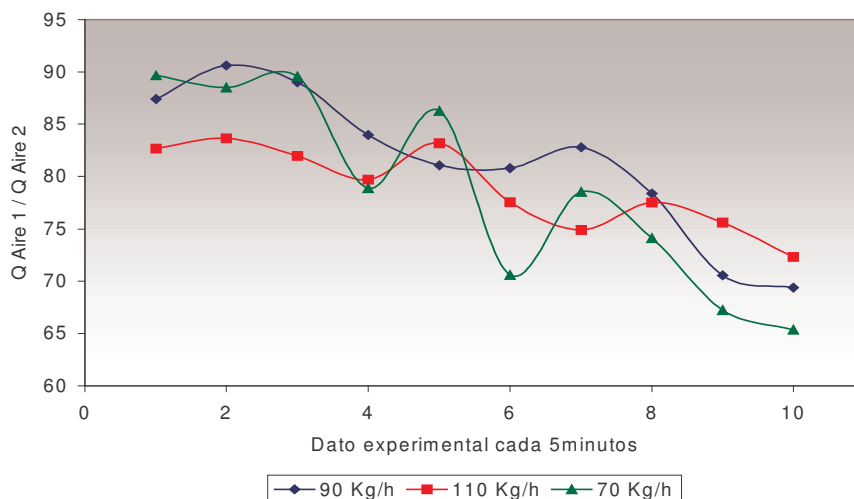


Figura 67. Relaciones de caudales de aire 1 y 2 para velocidad del ventilador baja.

Se puede apreciar en ambos casos un decrecimiento de la relación de los caudales, debido a que se presenta variación de las velocidades de entrada de aire primario y secundario a la cámara, mientras la del primario decrece la del secundario se incrementa; este fenómeno es debido al taponamiento de la superficie de la parrilla por la acumulación de escoria.

Experimentalmente se observó que incrementar el caudal de aire de entrada a la cámara de combustión eleva su temperatura, este fenómeno es debido al incremento en la velocidad de ignición del bagazo suministrado, pues el oxígeno al pasar por el combustible, produce una agitación que favorece el intercambio de  $O_2$  y  $CO_2$  con las superficies sólidas, acelerando la combustión.

El incrementar excesivamente el caudal de aire por medio del ventilador, desestabiliza la normal operación de la cámara, ya que se dificulta el cumplimiento en los regímenes de alimentación de bagazo por el aumento excesivo en la velocidad de ignición, además se disminuye la temperatura de la cámara drásticamente al enfriarse la masa de lecho en combustión y se presentaba irregularidad en la relación de los caudales de aire primario y secundario por el rompiendo de la capa de escoria formada, debido al incremento de la presión con la cual entra el aire a la parrilla.

**4.7.2. Peso de la escoria con respecto al régimen del ventilador, flujo y humedad del bagazo.** De acuerdo a la experimentación realizada se pueden observar en tabla 26, los resultados del peso de la escoria acumulada en la parrilla.

Tabla 26. Peso de escoria Vs Alimentación de bagazo.

Alimentación (Kg/h)	Régimen Ventilador*	Peso de la escoria (gr)
70	0	423.62
	1	343.41
110	0	503.76
	1	431.38

Fuente: Investigación de los autores

\*0 = apagado; 1 = velocidad baja

Se determinó que existe una relación directa entre el flujo de alimentación y la formación de la capa de escoria, además que el implementar el sistema de ventilador disminuye la formación de la escoria por el incremento en la presión de entrada del aire primario. La relación de la humedad con la formación de la escoria también se logró determinar, esta relación resultó ser directamente proporcional como se muestra en la figura 68.

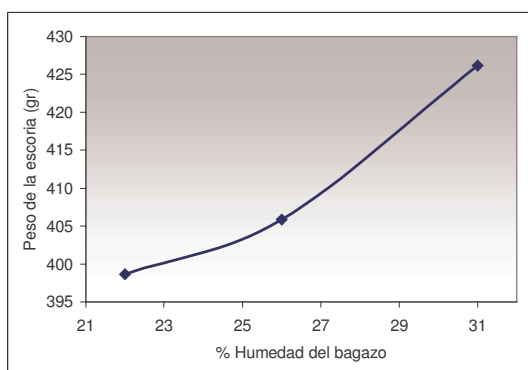


Figura 68. Humedad del bagazo Vs Peso de la escoria.

#### 4.8. CONTROL DE TEMPERATURA EN LA CÁMARA WARD-CIMPA.

Los distintos perfiles de temperatura de la cámara de combustión trabajados en lazo abierto a tiro natural y en lazo cerrado con un controlador On/Off para el motor del ventilador a velocidad baja, ambos a dos regímenes de alimentación, se pueden observar en las figuras 69 y 70.

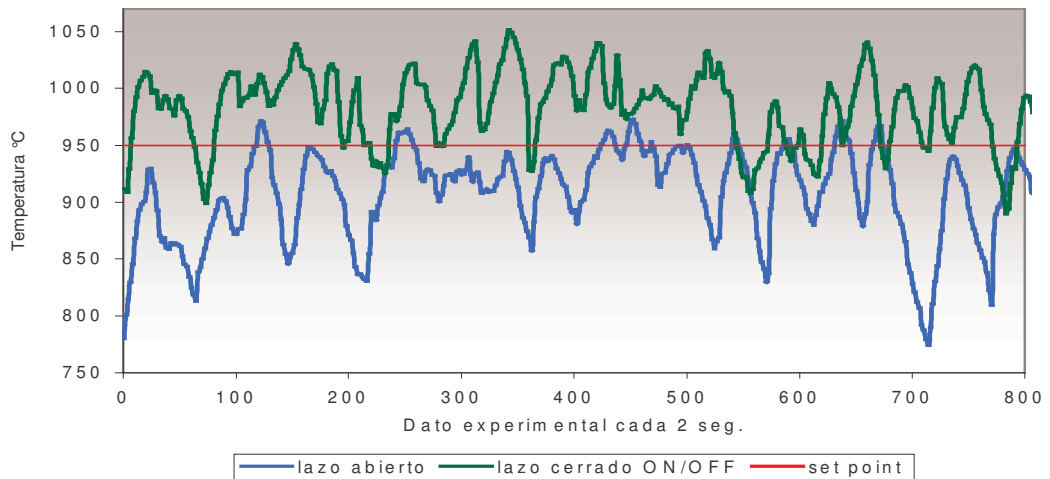


Figura 69. Perfil de temperatura, para una alimentación de 70 Kg/h, a lazo abierto y lazo cerrado con control On/Off.

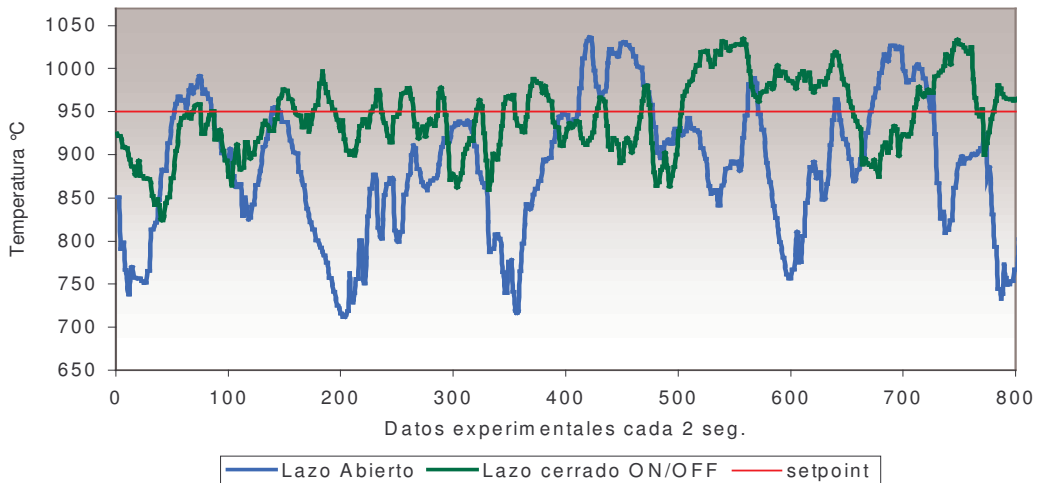


Figura 70. Perfil de temperatura, para una alimentación de 110 Kg/h, a lazo abierto y lazo cerrado con control On/Off.

Se puede observar para los dos tipos de alimentación, que al implementar el lazo de control On/Off, se eleva la temperatura promedio de trabajo y se disminuyen las caídas de temperatura en cada ciclo de alimentación, lo anterior debido a la acción del ventilador el cual como ya se menciona

incrementa la velocidad de ignición y por ende la temperatura hasta el setpoint, instante en el cual se apagaba el motor del ventilador.

Las activaciones del motor del ventilador y el perfil de temperatura desarrollado cuando el lazo de control se cerraba, se pueden apreciar en las figuras 71 y 72, para los dos tipos de alimentación,

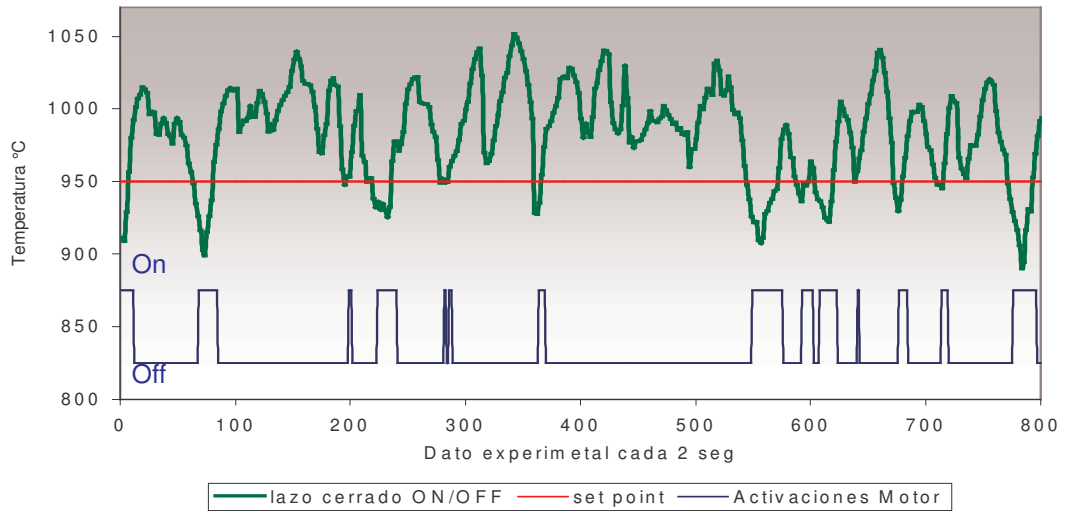


Figura 71. Activaciones del motor del ventilador y perfil de temperatura, para 70 Kg/h, en lazo cerrado.

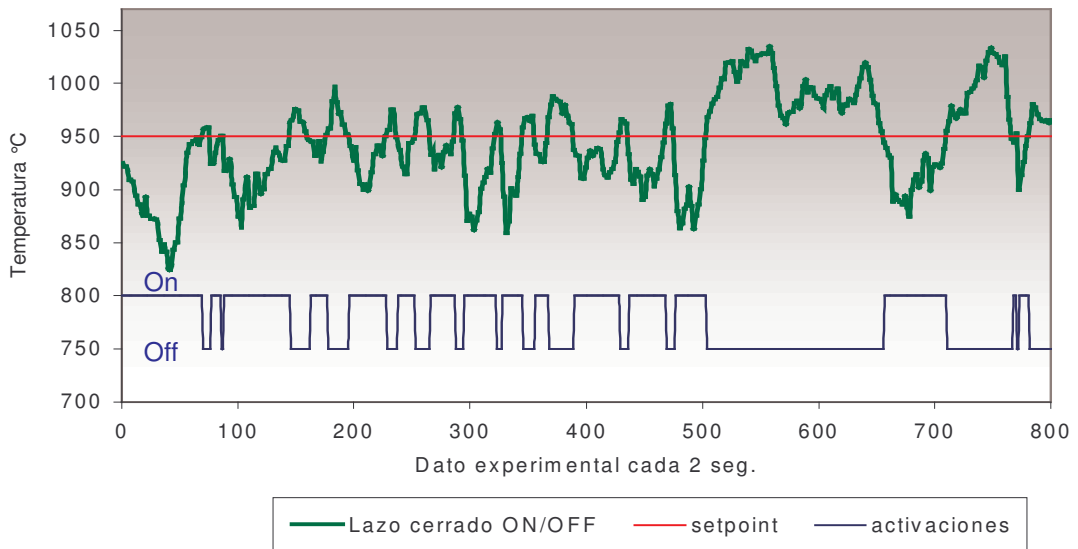


Figura 72. Activaciones del motor del ventilador y perfil de temperatura, para 110 Kg/h, en lazo cerrado.

En la figura 73, se representa el diagrama de bloques del proceso de combustión, junto con el lazo de control On/Off, el cual fue elaborado utilizando la matriz de Vester, en donde se identificaron las interrelaciones del lazo de control en las distintas variables que involucran el proceso de la

combustión del bagazo. el desarrollo de la matriz se encuentra en el anexo K.

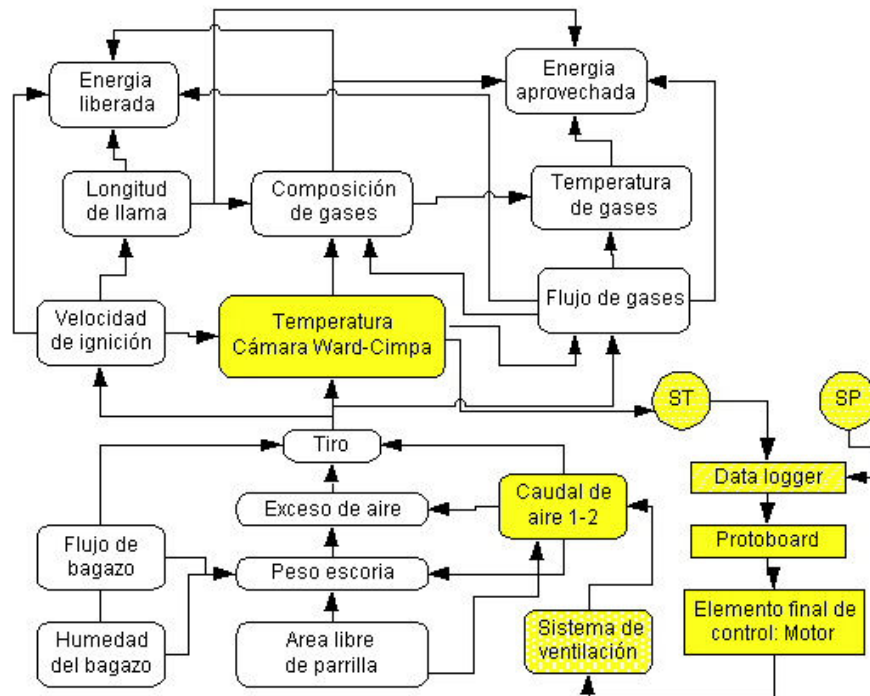


Figura 73. Diagrama de bloques del proceso junto con el lazo de control.

## 5. DISEÑO DE CÁMARAS DE COMBUSTIÓN

El diseño actual de cámaras de combustión para hornillas paneleras parte de la suposición de la eficiencia de la cámara, un valor que durante el proceso no es constante y que puede estar subvalorada o sobrevalorada en distintos casos. Con base en los parámetros y condiciones halladas en el análisis de resultados, en este capítulo se presenta una propuesta para el diseño de cámaras más riguroso que el existente.

### 5.1. HUMEDAD DEL BAGAZO.

Es importante tener en cuenta, que una cámara se diseña para un rango específico de humedad, suministrar bagazo con una humedad diferente a la recomendada en el diseño, afecta el desempeño de la cámara y por ende de la hornilla.

En la experimentación se identificaron dos tipos de bagazo según el contenido de humedad: uno denominado *bagazo seco* que por lo general contiene entre un 20 y 35% de humedad en peso, y un *bagazo húmedo* que por lo general contiene entre un 35 y 55% de humedad en peso. En el caso de la hornilla con cámara Ward-CIMPA, la humedad del bagazo no afectó el desempeño de la cámara, debido a la rampa de presecado con cuenta este tipo de cámara; esto se aprecia claramente en los experimentos representados por las figuras 23, 26 y 29, en los cuales se opera a tiro natural, allí la producción de monóxido independientemente del tipo de bagazo alimentado se mantiene en el rango comprendido entre 4 y 8 gmoles por kilogramo de bagazo seco; en el caso de la hornilla con cámara Plana-CIMPA, el desempeño más eficiente se presenta cuando suministra bagazo seco a la cámara, obteniendo producciones de monóxido de carbono entre 5 y 9 gmoles por kilogramo de bagazo seco, según se observa en las figuras 32, 34, 36 y 38.

En el diseño de la cámara, es necesario tener en cuenta qué tipo de bagazo se alimentará y cuál es su contenido aproximado de humedad, puesto que la masa de gases producidos y la potencia desarrollada por kilogramo de bagazo es función de la humedad del mismo.

### 5.2. FLUJO DE BAGAZO POR HORA DE OPERACIÓN.

El diseño actual de hornillas paneleras determina el flujo de bagazo requerido a partir de una eficiencia empírica, de la energía requerida para concentrar los jugos y del valor calórico neto del bagazo de caña; este procedimiento es aproximado, pero en muchos casos ocasiona que el desempeño de la hornilla no sea el estipulado por el diseño.

La estimación de la composición de los gases de combustión a partir del modelo matemático, facilita la determinación del flujo de bagazo requerido para el proceso, puesto que con la composición y la temperatura adiabática de los gases, es posible encontrar el flujo de bagazo real, mediante una secuencia iterativa representada en la figura 74; este procedimiento elimina el error de suponer la eficiencia de la hornilla en los cálculos de diseño.

Para las iteraciones se requieren los siguientes datos de entrada:

- Potencia requerida de la hornilla ( $E_{req}$ ): esta corresponde a la energía necesaria para concentrar los jugos, desde 18 °Brix hasta el punto de panela; se debe reportar en kJ/h.
- Humedad del bagazo (%Hum): este dato es función del grado de extracción del molino y del tiempo de permanencia del bagazo en la bagacera, con estos datos se debe estimar la humedad promedio; este valor se reporta en porcentaje peso, %w/w.
- Exceso de aire (%): por lo general se debe suministrar el exceso óptimo hallado para cada tipo de cámara de combustión.
- Humedad Relativa: este dato depende la región donde se encuentre.

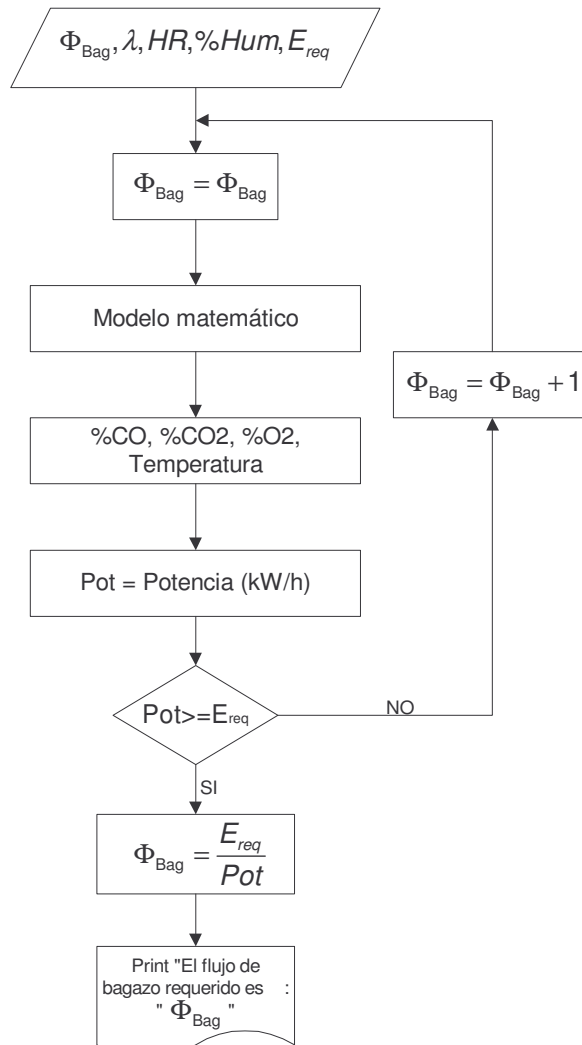
Además de los datos anteriores, se debe suponer un flujo inicial de bagazo; si el proceso de transferencia y de generación de calor fuese 100% eficiente, el flujo de bagazo se determinaría según la siguiente ecuación:

$$\Phi_{Bag} = \frac{\text{Energía requerida}}{\text{Valor calórico superior del bagazo}} \quad \text{Ec. 5.1}$$

Este valor corresponde al flujo de bagazo mínimo en condiciones ideales, y por esta razón se toma como punto de partida para la secuencia iterativa de la figura 74; al final de cada iteración el programa compara el valor de la potencia calculada (Pot), con el dato de energía requerida; si es menor, automáticamente se suma un kilogramo de bagazo y se efectúan nuevamente los cálculos; si es mayor la operación habrá terminado y en ese momento queda determinado el flujo de bagazo por hora que se debe alimentar la cámara ( $\Phi_{Bag}$ )

Finalmente, con la energía correspondiente al flujo de bagazo determinado, es posible estimar una eficiencia del proceso, mediante la siguiente relación:

$$\eta = \frac{E_{req}}{Pot} \quad \text{Ec. 5.2}$$



Fuente: Investigación de los autores

Figura 74. Algoritmo de calculo flujo de bagazo

### 5.3. VOLUMEN DE LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN.

Tanto los gases ideales como los gases reales, aumentan su volumen al aumentar la temperatura a presión constante; por esta razón, la cámara debe diseñarse para las condiciones ideales de operación, así a las condiciones reales de operación la combustión ocurre en el lugar destinado para ella.

En el caso de la combustión de hornillas paneleras, lo gases alcanzan un volumen máximo a la temperatura adiabática de llama para una masa específica de bagazo. Así, con el tiempo de ciclo, la masa y humedad de bagazo, el exceso de aire y la temperatura adiabática, se define el volumen de la cámara de combustión.

La masa de bagazo se determina a partir de la siguiente relación:

$$M_{Bag} = \frac{\phi_{Bag} * \theta_C}{3600} \quad \text{Ec. 5.3}$$

Donde:

$M_{Bag}$  = Masa de bagazo, [kg]  
 $\Phi_{-bag}$  = Flujo de bagazo, [kg/h]  
 $\theta_C$  = Tiempo de ciclo, [s]

En la cámara de combustión los gases alcanzan temperaturas entre 900 y 1200 °C a presión atmosférica, en estas condiciones el flujo de gases puede considerarse como ideal; con relación a esto, es posible despejar el volumen de los gases por la ecuación de gas ideal, a partir de la composición de los gases y la temperatura adiabática estimada por el modelo matemático; este volumen, finalmente corresponde a la cámara de combustión.

Es importante tener en cuenta que las corridas experimentales se llevaron a cabo en hornillas construidas con tecnología CIMPA; esto quiere decir, que en ningún momento se alteró la geometría de las cámaras en el desarrollo de la investigación, y que los resultados obtenidos se ajustan para las cámaras que se construyan con este tipo de tecnología; por esta razón, el dimensionamiento de la parrilla, está sujeto a los parámetros propuestos por CIMPA a partir de la energía requerida por la hornilla.

En el anexo A y B, se muestran los planos de una hornilla con cámara Plana-CIMPA y con cámara Ward-CIMPA respectivamente.

#### 5.4. CASO DE DISEÑO.

Como se describió anteriormente el proceso de diseño propuesto es más riguroso que el existente, por esa razón con el objeto de comparar los resultados se presenta un ejemplo de diseño de la cámara de combustión, en un primer caso se desarrolla por el método tradicional con tecnología CIMPA y en un segundo caso por el método propuesto en esta investigación.

*Caso de diseño:* Se requiere construir una hornilla panelera con capacidad de producción de 100 kg/h. El trapiche se alimentará con cultivos de caña Republica Dominicana (RD 80), cuyo jugo tiene un una concentración de sólidos solubles promedio de 18 °Brix, la panela se obtendrá a 92 °Brix. La humedad promedio del bagazo es del 30% luego de un mes de almacenamiento en la bagacera; además, requiere que la hornilla suministre por tiro natural un 60% de aire en exceso. En la zona se tiene una presión atmosférica de 960 mmHg, y una temperatura ambiente de 25 °C.

**5.4.1. Diseño de una cámara con tecnología CIMPA.** En todas las operaciones se asume una base de cálculo de una hora de operación.

- **Masa de jugos.** En primera instancia se debe averiguar la masa de jugos que se procesarán en la hornilla, para determinar la energía requerida en la producción de panela:

$$m_p B_p = m_j B_j \quad \text{Ec. 5.4}$$

Donde:

- $m_p$  = capacidad de producción de panela, [kg/h]
- $m_j$  = masa de jugos por procesar, [kg/h]
- $B_p$  = Brix de la panela, [°Brix]
- $B_j$  = Brix del jugo, [°Brix]

Reemplazando los datos del problema se obtiene:

$$m_j = 100 \cdot 92 / 18 = 512 \text{ [kg/h]}$$

- **Masa de agua a evaporar.** Por la ecuación de balance se determina la masa de agua que se requiere para concentrar los jugos de la caña hasta el punto de panela:

$$m_{H_2O \text{ Evap}} = m_j - m_p \quad \text{Ec. 5.5}$$

Donde:

- $m_p$  = producción de panela, [kg/h]
- $m_j$  = masa de jugos por procesar, [kg/h]
- $m_{H_2O \text{ Evap}}$  = masa de agua a evaporar, [kg/h]

Reemplazando los datos del caso de diseño, se obtiene:

$$m_{H_2O \text{ Evap}} = 412 \text{ [kg/h]}$$

- **Energía requerida.** Este valor corresponde a la energía que se le debe suministrar a los jugos para lograr concentrarlos hasta punto de panela. Para su determinación se debe tener en cuenta el calor latente que se le debe suministrar al agua contenida en los jugos para evaporarla:

$$E_{req} = m C_p \Delta T + m \lambda \quad \text{Ec. 5.6}$$

Donde:

- $E_{req}$  = Energía requerida para el proceso, [kJ]
- $m$  = masa de agua evaporada por hora de operación, [kg/h]
- $C_p$  = calor específico a presión constante del agua, [kJ/(kg\*°C)]
- $\lambda$  = calor latente de vaporización del agua, [kJ/kg]

Reemplazando,

$$E_{req} = (412) * (4.1868) * (95 - 25) + (412) * (2208)$$

$$E_{req} = 1030.5 \text{ MJ} = 286.23 \text{ kW}$$

Generalmente se supone una eficiencia del proceso del 65 %, con este valor y con la energía requerida se calcula la energía que se debe realmente suministrar al proceso,  $E_{sum}$ :

$$E_{Sum} = \frac{E_{req}}{\eta} \quad \text{Ec. 5.7}$$

$$E_{sum} = 1030.5 \text{ MJ} / 0.65 = 1585.4 \text{ MJ}$$

$$E_{sum} = 286.23 \text{ kW} / 0.65 = 440.4 \text{ kW}$$

- **Flujo de bagazo requerido.** Este valor se determina a partir del valor calórico neto del bagazo (VCN):

$$\Phi_{Bag} = \frac{E_{Sum}}{VCN} \quad \text{Ec. 5.8}$$

$$VCN = 17,85-20,35 * (\%Hum/100) \quad \text{Ec. 5.9}$$

Donde:

- $\Phi_{Bag}$  = flujo de bagazo, [kg/h]
- $\%Hum$  = porcentaje de humedad del bagazo en peso
- $E_{sum}$  = energía que se debe suministrar al proceso, [MJ]
- $VCN$  = Valor calórico neto del bagazo, [MJ/kg]

Reemplazando los datos proporcionados en el caso de diseño, según la ecuación 5.8, se obtiene:

$$\Phi_{Bag} = \frac{1585.4}{11.745} = 135$$

- **Volumen de la cámara.** Este valor se determina el a partir del parámetro establecido por CIMPA, como factor de volumen ( $F_v$ )

equivalente a 300 kW/m<sup>3</sup>, con este valor el volumen de la cámara se determina como sigue:

$$V_c = \frac{E_{sum}}{F_v} \quad \text{Ec. 5.10}$$

Donde:

$V_c$  = volumen de la cámara de combustión, [m<sup>3</sup>]  
 $E_{sum}$  = energía requerida de la hornilla, [kW]  
 $F_v$  = Factor de volumen, [kW/m<sup>3</sup>]

Reemplazando los datos del caso de diseño propuesto se obtiene:

$$V_c = \frac{440.4}{300} = 1.468 \quad [\text{m}^3]$$

- **Área de parrilla.** Este valor se determina el a partir del parámetro establecido por CIMPA, como factor de parrilla ( $F_p$ ) equivalente a 1000 kW/m<sup>2</sup>, con este valor el área de la parrilla se determina como sigue:

$$A_p = \frac{E_{sum}}{F_p} \quad \text{Ec. 5.11}$$

Donde:

$A_p$  = área de la parrilla de la cámara de combustión, [m<sup>2</sup>]  
 $E_{req}$  = energía requerida de la hornilla, [kW]  
 $F_p$  = Factor de parrilla, [kW/m<sup>2</sup>]

Reemplazando los datos del caso de diseño propuesto se obtiene:

$$A_p = \frac{440.4}{1000} = 0.44 \quad [\text{m}^2]$$

**5.4.2. Diseño de cámara propuesto.** En este caso, para todas las operaciones se asume una base de cálculo de una hora de operación. La masa de jugos, la masa de agua a evaporar y la energía requerida para el proceso se calculan de manera idéntica que el método de diseño tradicional descrito en el numeral anterior, luego con estos datos se prosigue según se describe en esta sección.

- **Flujo de bagazo requerido.** Este valor se determina por medio de la secuencia iterativa de la figura 74. Los datos de entrada que se requieren para la secuencia son los siguientes:

Potencia requerida de la hornilla ( $E_{req}$ )	1030.5 [MJ] = 287 kW
Humedad del bagazo (%Hum)	30 % w/w
Exceso de aire (%):	60%
Humedad Relativa:	0.014 $kg_{agua}/kg_{aire}$
Flujo inicial de bagazo ( $\Phi_{bag}$ ):	54 kg/h

Las tabla 27, muestra los resultados obtenidos en algunas de las iteraciones efectuadas.

Tabla 27. Composiciones finales, temperatura y potencia para cada iteración.

ITERACIÓN	1	2	3	4	10	20	40	67	93	94
Flujo bagazo Kg/h	54	55	56	57	63	83	93	120	146	<b>147</b>
C *	0	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>
H <sub>2</sub> *	0	0	0	0	0	0	0	0	0	<b>0</b>
O <sub>2</sub> *	12,51	12,74	12,97	13,21	14,60	19,25	21,57	27,84	33,89	<b>34,12</b>
N <sub>2</sub> *	109,3	111,4	113,42	115,4	127,6	168,1	188,3	243,0	295,7	<b>297,7</b>
H <sub>2</sub> O*	27,90	28,42	28,93	29,45	32,55	42,88	48,05	62,00	75,43	<b>75,95</b>
CO*	3,024	3,08	3,138	3,20	3,55	4,71	5,29	6,86	8,38	<b>8,43</b>
CO <sub>2</sub> *	13,67	13,91	14,17	14,42	15,93	20,96	23,47	30,25	36,79	<b>37,04</b>
Temp. °C	1485,37	1486,62	1487,83	1488,99	1495,18	1509,34	1514,13	1523,07	1528,55	<b>1528,72</b>
Poten. KW	161,4	162,8	164,2	165,5	173,8	201,1	214,6	250,9	285,8	<b>287,1</b>

Fuente: Investigación de los autores  
\*gmol/Kg bagazo

En la iteración 94 el programa encuentra la solución, puesto que la potencia desarrollada es mayor que la requerida; con los datos estimados encontramos que el flujo de bagazo requerido es de 147 kg/h, con un porcentaje de humedad en peso del 30%

- **Energía suministrada ( $E_{sum}$ ).** Con el flujo de bagazo requerido y el poder calórico del bagazo se determina la energía real que se le suministra al proceso.

$$E_{sum} = VCN * \Phi_{Bag} \quad \text{Ec. 5.12}$$

$$VCN = 17850 - 20350 * (\%Hum/100) - 20350 * (\%E) \quad \text{Ec. 5.13}$$

Donde:

$E_{sum}$	= energía suministrada al proceso, [kW]
VCN	= valor calórico neto del bagazo. [kJ/kg]
% Hum	= porcentaje humedad del bagazo, [%w/w]

% ε = porcentaje de cenizas en el combustible, [%w/w]  
 $\Phi_{\text{Bag}}$  = flujo de bagazo requerido, [kg/h]

Reemplazando los datos del caso de diseño y los resultados hallados, se obtiene:

$$E_{\text{sum}} = 458.82 \text{ kW}$$

• **Velocidad de ignición ( $V_{\text{ign}}$ ).** Este valor corresponde al tiempo que tarda el bagazo en quemarse dentro de la cámara, se calcula a partir del flujo de bagazo requerido en un ciclo, como se muestra a continuación:

$$V_{\text{ing}} = \frac{m_{\text{bag.ciclo}}}{\theta_c} \quad \text{Ec. 5.14}$$

Donde:

$m_{\text{Bag}}$  = masa de bagazo alimentado a la cámara en un ciclo, [kg]

$\theta_c$  = Tiempo de ciclo, [s]

$V_{\text{ign}}$  = velocidad de ignición del bagazo, [kg/s]

Como se determinó en el capítulo anterior la cámara Ward-CIMPA presenta un tiempo de ciclo de 90 segundos y la Plana-CIMPA un tiempo de ciclo de 120 segundos, así la velocidad de ignición para este caso es:

$$V_{\text{ign}} = 0,040833333 \text{ [kg/s]}$$

Este resultado de velocidad de ignición es igual a el flujo de bagazo resultado de las iteraciones de 147 Kg/h en segundos 0.0408333 Kg/s.

• **Volumen de la cámara.** En la última iteración de determinación de flujo de bagazo, se reportan los valores estimados de la composición de gases y la temperatura adiabática, los cuales por medio de la ley de gas ideal permiten dimensionar la cámara de combustión.

$$PV_T = n_T RT \quad \text{Ec. 5.15}$$

Donde:

$n_T$  = moles totales

P = presión atmosférica

R = constante de los gases ideales

T = Temperatura adiabática

$V_T$  = Volumen total de los gases

Las moles totales corresponden a las moles emitidas con relación a la velocidad con que se quema el bagazo, las cuales se obtienen al tenerse en

cuanta que para la cámara Ward-CIMPA estudiada, la distancia recorrida desde la parrilla hasta después de la primera paila es de aproximadamente 2 m y que la velocidad de los gases de combustión en ese punto es de aproximadamente 2 m/s de acuerdo con la geometría y a la mejor transferencia de calor simulada en un software de elementos finitos, de esta forma las moles totales emitidas hasta después de primera paila transcurrido 1 segundo, se obtienen de acuerdo a la ecuación 6.16.

$$n_T = V_{ign} * n * t \quad \text{Ec. 5.16}$$

$$n_T = 453,2624699 * 0,040833333 * 1 = 18,50821752$$

Donde:

$V_{ign}$  = velocidad de ignición, [kg/s]  
 $n$  = moles estimadas totales, [gmol/Kg bagazo]  
 $t$  = tiempo transcurrido. [s]

Luego, reemplazando los datos del caso de diseño, se obtiene:

$$V_T = \frac{(18,51)(1528.72)(0.082)}{0.895} = 2,61 \text{ [m}^3\text{]}$$

- **Área de parrilla.** El dimensionamiento de la parrilla se lleva a cabo con el factor de parrilla experimental encontrado para una área libre de parrilla de 60%,  $F_p = 874 \text{ kw/m}^2$ . según la tabla 18, y con la potencia entregada por la cámara, determinada en la última iteración 287.14 Kw, siendo un valor de potencia mas riguroso, tal como se observa en la ecuación 5.18.

$$A_p = \frac{P_{rigurosa}}{F_{p_{exp.}}} \quad \text{Ec. 5.18}$$

Donde:

$A_p$  = Área de la parrilla, [m<sup>2</sup>]  
 $F_{p_{exp.}}$  = Factor de parrilla experimental. [Kw/m<sup>2</sup>]  
 $P_{rigurosa}$  = Potencia de la cámara rigurosa, [kW]

De esta forma el área de parrilla es de 0.3285 m<sup>2</sup>.

Es posible expresar un polinomio característico del perfil de potencia desarrollado en la cámara para 147 Kg/h en un tiempo de ciclo y se puede apreciar en la figura 75, ( $R^2 = 0,9812$ ).

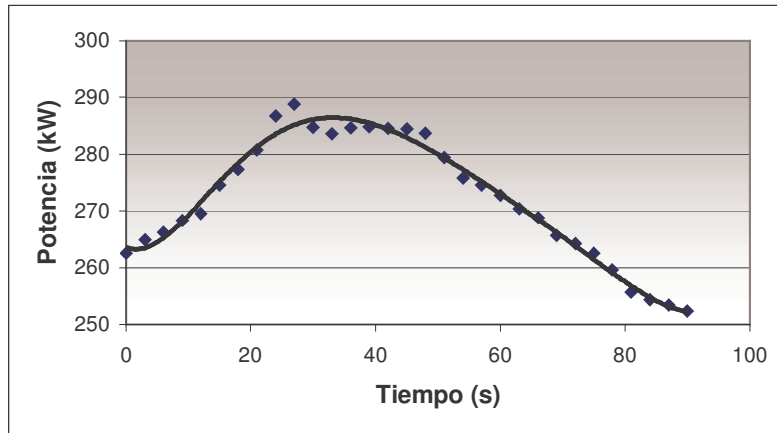


Figura 75. Potencia desarrollada en un ciclo.

$$\text{Pot} = 2 * 10^{-7} * t^6 - 5 * 10^{-5} * t^5 + 0,0061 * t^4 - 0,353 * t^3 + 9,0628 * t^2 - 59,396 * t + 10772 \quad \text{Ec. 5.19}$$

Donde:

Pot = Potencia desarrollada entregada por la cámara, [kW]

t = tiempo dentro del ciclo, [s]

**5.4.3. Comparación de resultados.** En la tabla 28, se presentan los resultados del diseño por los dos métodos: el tradicional y el propuesto.

Para el caso de diseño propuesto, los resultados de los dos tipos de diseño son muy parecidos, esto se debe a que la eficiencia supuesta fue cercana a la real, pero en la mayoría de los casos este valor supuesto varía según el diseñador y los variables pueden variar significativamente. En el caso del flujo de bagazo requerido, se observa que el valor hallado por método propuesto es superior al calculado por el método tradicional, esto se debe a que en el diseño actual de cámaras se sobrevalora el poder calorífico del bagazo, ocasionando que las hornillas construidas no desarrollen la capacidad para la cual fueron construidas.

El volumen de la cámara por el método propuesto es mayor, esto demuestra que la combustión en una cámara diseñada por el método actual tiene lugar aún fuera de la cámara. Los resultados de la tabla 28, demuestran, que el diseño por el método propuesto basado en el modelo de estimación de composición de los gases de combustión, es más riguroso y preciso, debido a que en ningún momento se supone la eficiencia de la hornilla, el flujo de bagazo se obtiene de manera iterativa, y el poder calorífico del bagazo tiene en cuenta la humedad y las cenizas presentes en el combustible.

Tabla 28. Resultados del caso de diseño

<b>Variable</b>	<b>Unidades</b>	<b>Diseño actual</b>	<b>Diseño propuesto</b>
Capacidad	Kg/h	100	100
Masa de jugos	Kg/h	512	512
Masa de agua a evaporar	Kg/h	412	412
Energía requerida	kW	287	287
Energía suministrada	kW	440.4	458.82
Bagazo requerido	Kg/h	135	147
Eficiencia	-----	65%	63 %
Velocidad de ignición	Kg/s	----	0.0041
Volumen de cámara	m <sup>3</sup>	1.468	2.61
Área de parrilla	m <sup>2</sup>	0.44	0.3285

Fuente: Investigación de los autores.

## CONCLUSIONES.

- Para la cámara Ward-CIMPA, se observó un rango de exceso de aire óptimo del 55 – 60%, en el cual las emisiones de monóxido fueron mínimas (5 gmol CO/kg bagazo seco).
- Para la cámara Plana-CIMPA, se observó un rango de exceso de aire óptimo del 60 – 65%, en el cual las emisiones de monóxido fueron mínimas (6 gmol CO/kg bagazo seco).
- La alimentación discontinua de bagazo a la cámara de combustión, provoca un comportamiento cíclico en las variables dependientes del proceso, en especial la temperatura que es sensible a cualquier modificación de las condiciones de operación, este comportamiento se denomina tiempo de ciclo ( $\theta_c$ ) y corresponde al tiempo que tarda en quemarse el bagazo de cada atizamiento dentro de la cámara.
- El tiempo de ciclo de la cámara Ward-CIMPA es de 90 segundos y para la cámara Plana-CIMPA de 135 segundos.
- La determinación del flujo de bagazo por medio del diseño propuesto es más exacto y riguroso que el diseño actual, garantiza al diseñador que la hornilla construida no quedará sub o sobrediseñada.
- El método propuesto es más ventajoso debido a que el diseñador, no debe suponer la eficiencia como parámetro de entrada, por el contrario ésta se calcula.
- Debido que la combustión del bagazo, no se lleva a cabo completamente en lugar destinado para ello, es necesario tener en cuenta en el volumen total hasta debajo de la primera paila en el caso de la Ward-CIMPA y hasta debajo de la segunda paila en el caso de la Plana-CIMPA.
- Los resultados obtenidos son válidos y aplicables al diseño de cámaras de combustión siempre y cuando se conserven las proporciones geométricas de las diseñadas por CIMPA, por esta razón, se debe tener en cuenta para el método de diseño propuesto, que el volumen hallado de la cámara incluye el espacio del ducto hasta después de la primera paila en el caso de la cámara Ward-CIMPA y hasta después de la segunda paila en el caso de la cámara Plana-CIMPA.
- La formación de escoria sobre la parrilla obstruye la entrada de aire primario; así, se aumenta la tasa de producción de monóxido de carbono, disminuye el calor liberado por kilogramo de bagazo, afecta la potencia de la cámara y por ende disminuye la eficiencia del proceso.

- La razón másica entre el aire primario y el secundario disminuye durante el proceso, debido a la obstrucción ocasionada por la acumulación de escoria sobre la parrilla.
- Se observó que la formación de escoria aumenta proporcionalmente con la humedad y flujo del bagazo, posiblemente la sacarosa remanente polimeriza y al enfriarse produce este material denominado escoria.
- La cámara Ward-CIMPA presentó una eficiencia exergética del 40% y la cámara Plana-CIMPA del 35%; las pérdidas exergéticas que presentan las cámaras se deben a las irreversibilidades intrínsecas de la combustión y a pérdidas por transferencia de calor.
- El implementar un control de temperatura en la cámara Ward-CIMPA, estabiliza la temperatura dentro de la cámara en un rango de variación no mayor a 100 °C proporcionando una potencia mucho más constante de la hornilla durante el proceso; esto se debe principalmente a que se favorece el intercambio de O<sub>2</sub> y a que se disminuye la zona de reducción por implementar el sistema de ventilación.

## RECOMENDACIONES

- Estudiar la composición de la escoria que se forma sobre la parrilla durante el proceso de combustión, pues es factible que se pueda obtener un producto de mayor valor agregado.
- Aumentar el área de entrada de aire secundario y disminuir el área de entrada del primario.
- Ubicar suficientes termocuplas en las paredes de la cámara, para facilitar y precisar las pérdidas por convección.
- Recircular los gases de combustión para el secado de bagazo o para el precalentamiento del aire primario y recuperar el vapor producido en aras de aumentar la eficiencia energética del proceso.
- Se debe limpiar la parrilla periódicamente para extraer la escoria, especialmente en la cámara Ward-CIMPA, el tiempo recomendado es cada 30 minutos de operación
- Implementar el sistema de control de temperatura, acompañado de un alimentador mecánico de bagazo para automatizar y mejorar la eficiencia del proceso.

## BIBLIOGRAFÍA

**AHERN, Hohn E.** The Exergy Method of Energy Systems Analysis. Ed John Wiley & Sons. New York, 1980

**ASHRAE**, HANDBOOK OF FUNDAMENTALS. American society of Heating, Refrigerating and air-conditioning Engineers, INC. 1a Edición. New York, 1968

**BEDAUX, Michael.** Diseño de la cámara de Combustión. Barbosa, 1991

**BORMAN, Gary L. and RAGLAND, Kenneth W.** Combustion Engineering. Ed. Mc Graw Hill. Singapore, 1998

**CALA T. Severiano y MARTÍNEZ Pablo E.** Evaluación del impacto ambiental generado por la operación de trapiches con tecnología CIMPA en el área de Socorro Santander. Trabajo de grado (Especialización en Ing. Ambiental). Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, 1999

**CALDERON, Eliana.** Descripción y análisis del perfil tecnológico ambiental de la industria de la panela en Colombia. Tesis de Grado (Ingeniería Química) Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingeniería Química. Bucaramanga, 1998

**CASTILLO M., Edgar F., PEDRAZA F., Eder y otros.** Sistema de Información para la Evaluación Ambiental de Sectores Productivos. Convenio CEIAM – IDEAM. Ed. CEIAM. Bucaramanga, mayo de 1999.

**CIMPA** (Centro de Investigación para le Mejoramiento de la Agroindustria Panelera). Investigación Básica del proyecto de hornillas paneleras. Barbosa, 1991

\_\_\_\_\_. Mejoramiento de hornillas paneleras. Memorias II curso. Barbosa, 1991

\_\_\_\_\_. Manual de Elaboración de Panela y otros derivados de la caña. Barbosa, 1991.

**ELLIS, E.L.** 1964, Inorganic Elements in Wood in Celular Ultrastructure of Woody Plants. Proc Advanced Science Seminar Pinebrook Conference Center, Upper Saranac Lake, N.Y.

**FAO.** Anuario de producción en 1986. Vol 40. Roma

**FEDESARROLLO.** Las Industrias azucareras y panelera en Colombia. Bogotá, 1975

**GARCIA B. Hugo y RODRIGUEZ M.** Determinación de los parámetros de diseño de la cámara de combustión, pailas y ductos en las hornillas paneleras, CIMPA. Barbosa, 1989.

**GARCÍA, Hugo y GORDILLO, Gerardo.** Manual para el diseño y operación de hornillas paneleras. Barbosa. 1992

**HELLWING, M.** Basic of the combustión of wood and straw. Energy from Biomass Conference. EEC/Elsevier, 1982.

**HERNÁNDEZ, Leonel.** Determinación de los parámetros de desempeño para la combustión en las hornillas paneleras con cámaras Ward-CIMPA

**HIMMEBLAU, David M.** Principios y cálculos básicos de la Ingeniería Química. 2ª Edición Compañía editorial continental, S.A.. México, 1970.

**HOUGEN, O.A., K.M. Watson, and R. A. Ragatz.** Chemical Process Principles. Part I: Material and Energy Balances, 2nd. Ed John Willey & Sons, New York

**HUGOT, E.** Manual para ingenieros azucareros. Segunda Edición. Editorial Continental. México 1982.

**INSTITUTO DE INVESTIGACIONES TECNOLÓGICAS.** La industria panelera en Colombia. Bogotá. 1964

\_\_\_\_\_. Elaboración de panela. Bogotá. 1978.

**JOHNSON, Allen and AUTH, George.** Fuels and Combustion Handbook. First edition. Mc Graw Hill Book Company. NY. 1951

**KHAVKIN, Yuri I.** Combustion System Design A New Approach. PennWell Publishing Company. Tulsa, Oklahoma, 1996.

**KUAN-YUN KUO, Kenneth.** Principles of combustion. First Edition. John Wiley & Sons. Singapore. 1986

**LEON H. Y RAMÍREZ J.** Desarrollo de un sistema de alimentación de bagazo para las hornillas paneleras tipo ward. Proyecto de grado (Ingeniería Agrícola) Universidad Nacional de Colombia. Departamento de Ingeniería Agrícola. Bogotá. 1990

**LITTLE Thomas y HILLS F. Jackson.** Métodos estadísticos para la investigación en la agricultura. Primera edición. Ed. TRILLAS. Mexico 1985.

**LORENZI, Otto de.** Combustion engineering. First Edition. Combustion Engineering, INC. NY. 1957

**MAHECHA, Cesar.** Desarrollo de una herramienta computacional para el diseño óptimo de hornillas paneleras. Tesis de grado (Ingeniería Química). Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Química. Bucaramanga, 1997.

**MANRIQUE S. T.** Aspectos técnicos para la producción de panela, sus problemas y soluciones. I.I.T. Bogotá, 1961

**MERCADO P. O.** Diseño y construcción de un prototipo de secador de bagazo para trapiches paneleros. Tesis de grado (Ingeniería Química) Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Mecánica. Bucaramanga, 1979

**OCÓN G., Joaquín.** La utilización eficiente de los combustibles. Primera edición. Aguilar, S.A. de ediciones. Madrid. 1964

**ORDOÑEZ O., HERNANDO H.** Diseño construcción y montaje de un intercambiador de calor para precalentamiento de aire de combustión en hornillas paneleras. Tesis de grado (Ingeniería Mecánica) Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Mecánica. Bucaramanga, 1980

**PERRY George et al.** Manual del ingeniero químico. Sexta edición. Tomo III. McGraw Hill. México, 1996.

**RAMÍREZ, Alberto.** Manual de auditoria energética para los ingenios azucareros de Colombia. GENICAÑA. Cali – Colombia. 1999

**SALVI G.** La combustión, teoría y aplicaciones. Madrid. Segunda edición. Editorial Dossat, 1975.

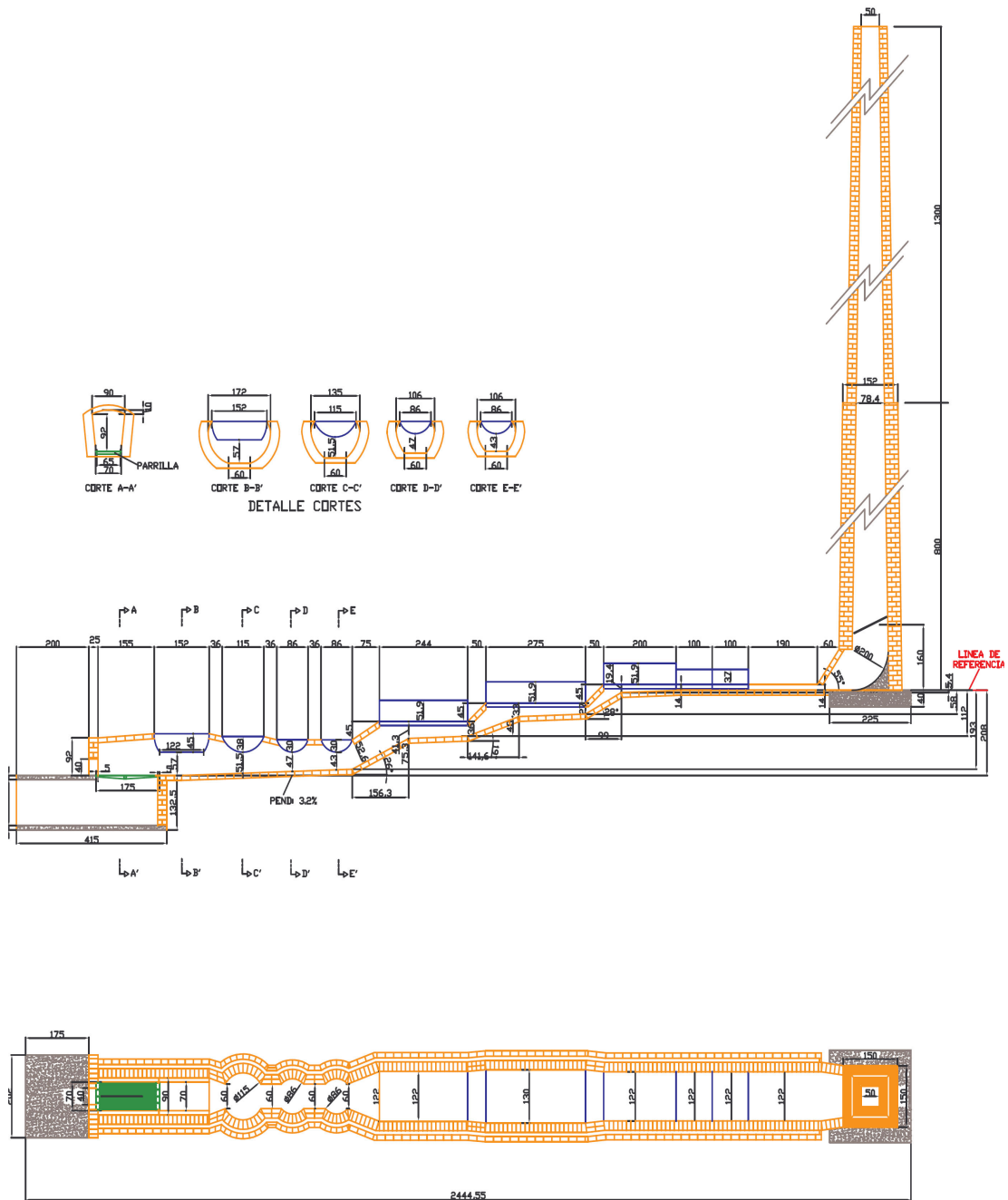
**SMITH, Marion L. y STINSON, Karl W.** Fuels and combustion. First edition. Ed. Mc Graw Hill. New York, 1952.

**TILLMAN, David A.** The combustion of solid fuels and wastes. Academic Press, INC. San Diego. 1991

**VAN WYLEN, Gordon y SONNTAG, Richard.** Fundamentos de Termodinámica. 1ª ed. Editorial IMUSA, S.A. México 1996.

## **ANEXO A**

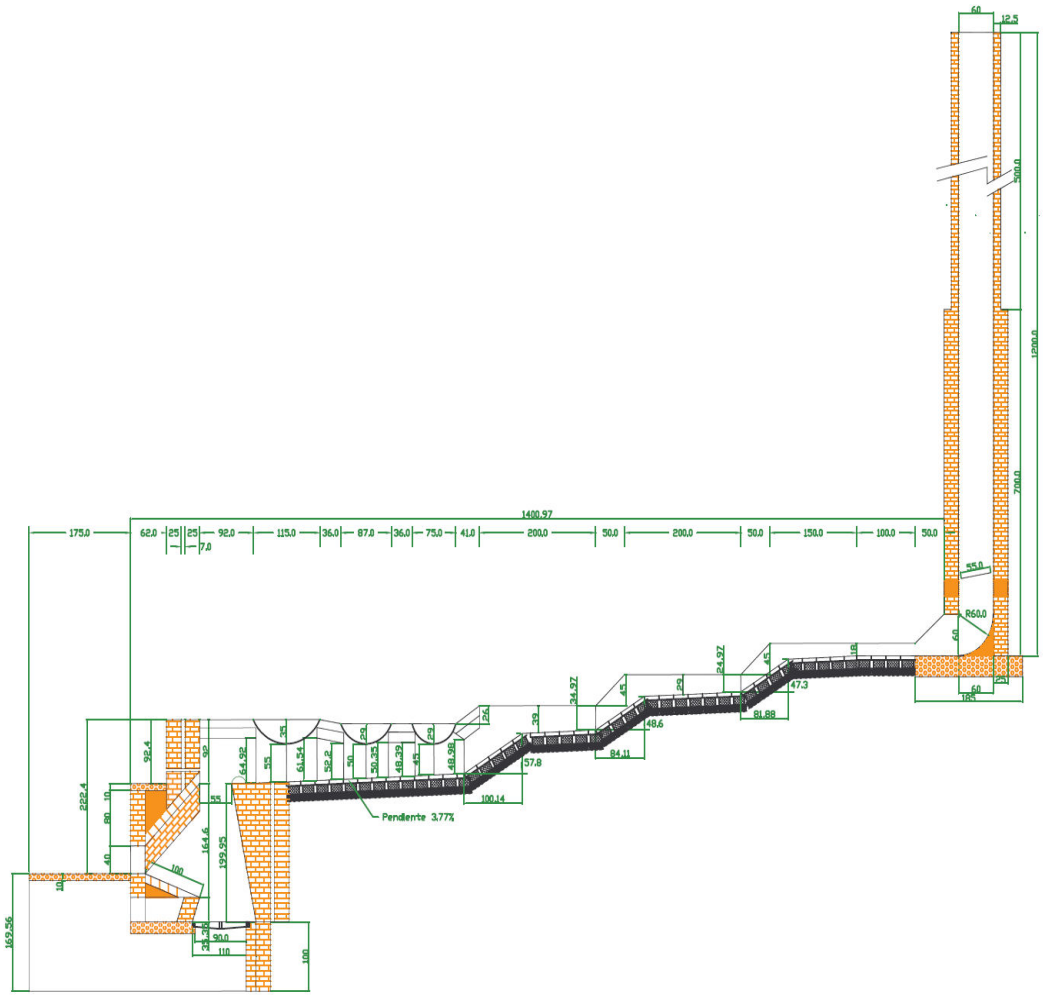
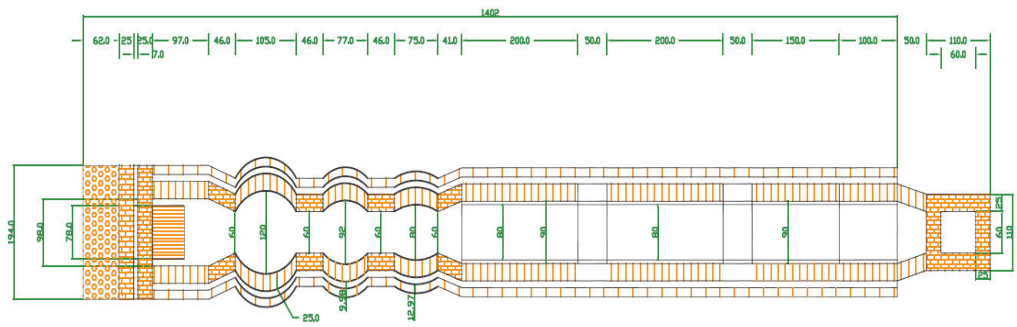
PLANO DE UNA HORNILLA PANELERA CON CÁMARA DE COMBUSTIÓN  
PLANA-CIMPA



		PROGRAMA NACIONAL DE MAQUINARIA AGRICOLA Y POSTCOSECHA		
Diseño: ESPERANZA PRADA RAÚD GARCÍA B.	HORNILLA CANDELARIA VALLE 180k/h HAROLD MATTA		Dibujó: JAIRD ULLDA S.	
Plano: 1 de 1	Medidas: cm	Escala: SIN	Fecha: Mar./2001	Referencia: 028

## **ANEXO B**

PLANO DE UNA HORNILLA PANELERA CON CÁMARA DE COMBUSTIÓN  
WARD-CIMPA

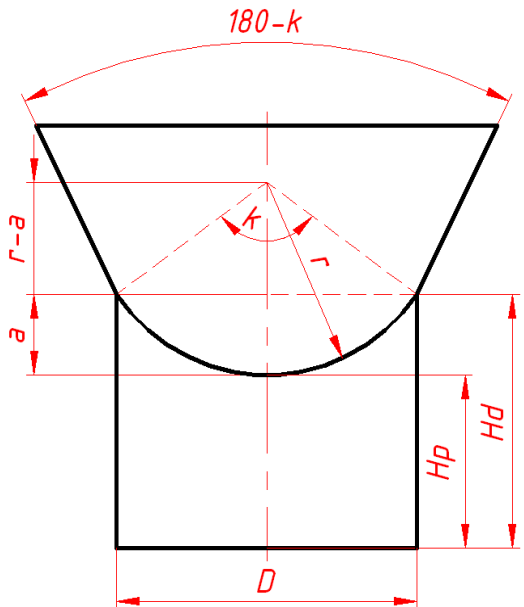


C I M P A		Ref. 008
Propietaria: SEPAS	Diseño: Gerardo Gordillo A.	Dibujo: Hugo Galvis P.
Revisor: Hugo R. Garcia B.	Lugar: Socorro	ESCI
	Fecha: Julio 31/91	Capacidad: 130 Kg/h

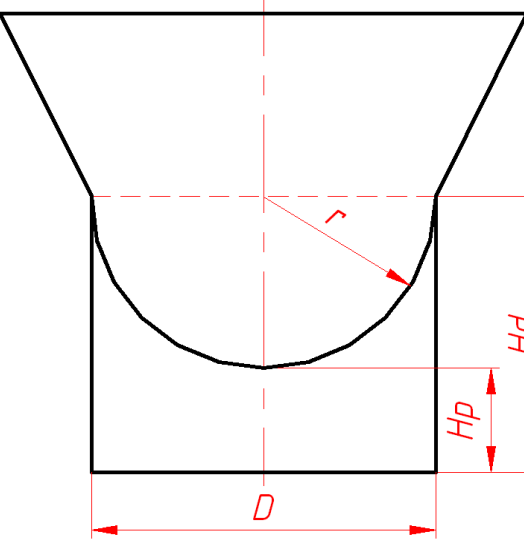
## **ANEXO C**

PAILAS PANELERAS ESTUDIADAS Y DESARROLLADAS POR CIMPA

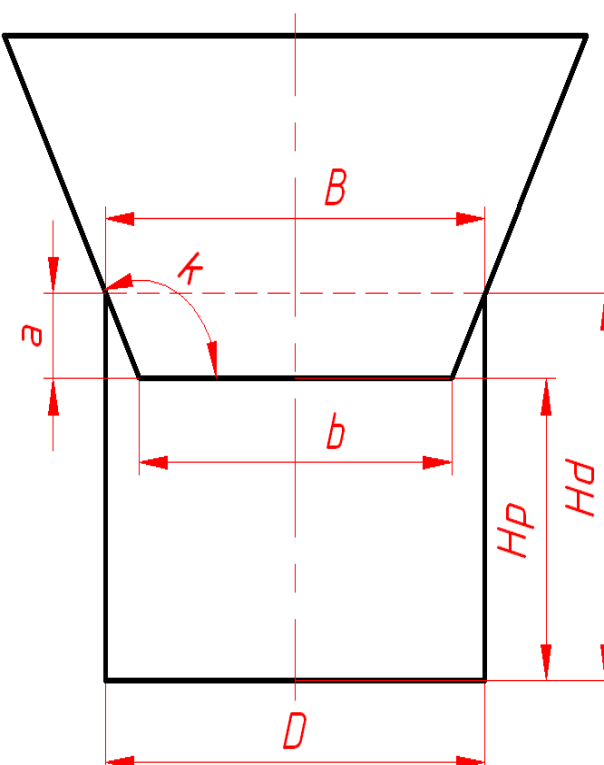
## 1. PAILA SEMIESFÉRICA

Esquema general	Área de transferencia de calor
	$A_s = 2\pi r^2 [1 - \cos(\alpha/2)]$
	<b>Área transversal del ducto</b>
	$A_t = H_d D - \left[ \frac{r^2 \alpha}{2} - \frac{D(r-a)}{2} \right]$
	$A_t = H_d D - \left[ \frac{r^2 \alpha}{2} - r^2 \sin(\alpha/2) \cos(\alpha/2) \right]$
	donde, $D = 2r \sin(\alpha/2)$ ; $a = r [1 - \cos(\alpha/2)]$
<b>Volumen mínimo de los jugos</b>	
$V_j = \frac{\pi r^3}{2} [1 - \cos(\alpha/2)]$	
<b>Diámetro hidráulico</b>	
$D_h = \frac{4A_{Transversal}}{Per.mojado} = 4R_h$	
$D_h = \frac{4 \left\{ H_d D - \left[ \frac{r^2 \alpha}{2} - r^2 \sin(\alpha/2) \cos(\alpha/2) \right] \right\}}{D + 2H_d + r\alpha}$	

## 2. PAILA SEMICILÍNDRICA

Esquema general	Área de transferencia de calor
	$A_s = \pi r^2 + \pi r M$
	donde, M=Largo de la paila
	<b>Área transversal del ducto</b>
	$A_t = H_d D - \frac{\pi r^2}{2}$
	<b>Volumen mínimo de los jugos</b>
$V_j = \frac{\pi r^2 M}{2}$	
<b>Diámetro Hidráulico</b>	
$D_h = \frac{4A_{Transversal}}{Per.mojado} = 4R_h$	
$D_h = \frac{4 \left( H_d D - \frac{\pi r^2}{2} \right)}{D + 2H_d + \pi r}$	

### 3. PAILA PLANA

Esquema general	Área de transferencia de calor
	$A_s = bM + (B + b)a + 2M\sqrt{\left[\left(\frac{B - b}{2}\right)^2 + a^2\right]}$ <p>si <math>a \approx 0 \Rightarrow B \approx b \quad A_s = bM</math></p>
	<b>Área transversal del ducto</b> $A_t = H_d D - \frac{(B + b)a}{2}$ <p>si, <math>a \approx 0 \Rightarrow B \approx b \quad A_t = H_d D</math></p>
	<b>Volumen mínimo de los jugos</b> $V_j = \frac{aM(B + b)}{2}$
	<b>Diámetro Hidráulico</b> $D_h = \frac{4A_{\text{Transversal}}}{\text{Per.mojado}} = 4R_h$
	$D_h = \frac{4\left[H_d D - \frac{(B + b)a}{2}\right]}{D + 2H_d + b + 2\sqrt{\left[\left(\frac{B - b}{2}\right)^2 + a^2\right]}}$ <p>si <math>a \approx 0 \Rightarrow B \approx b</math></p> $D_h = \frac{2H_d D}{D + H_d}$

### 3. PAILA ALETEADA

Esquema general	Área de transferencia de calor
	$A_s = BM + 2na(M + b)$ <p>donde,  <math>n</math> = Numero de aletas</p>
	<b>Área transversal del ducto</b> $A_t = H_d D - nab$
	<b>Diámetro Hidráulico</b> $D_h = \frac{4A_{\text{Transversal}}}{\text{Per. mojado}} = 4R_h$
	$D_h = \frac{4(H_d D - nab)}{D + 2H_d + B + 2na}$

#### 4. PAILA PIROTUBULAR

Esquema general	Área de transferencia de calor
	$A_s = M \left\{ 2a + b + n \left[ c + d + e + \sqrt{(c-d)^2 + e^2} \right] \right\} + 2 \left[ ab - \frac{ne(c+d)}{2} \right]$ <p>donde, <math>n</math> = Numero de canales</p>
	<b>Área transversal del ducto</b> $A_t = H_d D - ab + \frac{ne(c+d)}{2}$
	<b>Volumen mínimo de los jugos</b> $V_j = \left[ ab - \frac{ne(c+d)}{2} \right] M$
	<b>Diámetro Hidráulico</b> $D_h = \frac{4A_{\text{Transversal}}}{\text{Per. mojado}} = 4R_h$ $D_h = \frac{H_d D - ab + \frac{ne(c+d)}{2}}{2(D + H_d + a) + n \left[ c + d + e + \sqrt{(c-d)^2 + e^2} \right]}$

## **ANEXO D**

### **PROCEDIMIENTO PARA DETERMINAR LA HUMEDAD DEL BAGAZO**

**OBJETIVO.**

Determinar la humedad del bagazo alimentado a la cámara de combustión.

#### **PROCEDIMIENTO.**

- Tomar una muestra representativa y homogénea de la cantidad y del tipo de bagazo que está siendo alimentado a la cámara de combustión.
- La muestra recolectada se pesa en una balanza electrónica y se coloca en un portamuestras previamente pesado y marcado.
- Se llevan las muestras ya pesadas al horno, a una temperatura de 80°C durante 24 horas.
- Cumplido el tiempo de secado se pesan las muestras, se introducen al horno por dos horas y se vuelven a pesar hasta conseguir peso constante.
- Se registran los datos de peso inicial y final para luego realizar los cálculos y obtener el valor de la humedad realizando un promedio de las muestras por hora que se tomaron.

#### **CÁLCULOS.**

$$\%H = \frac{W_{final}}{W_{inicial}} * 100$$

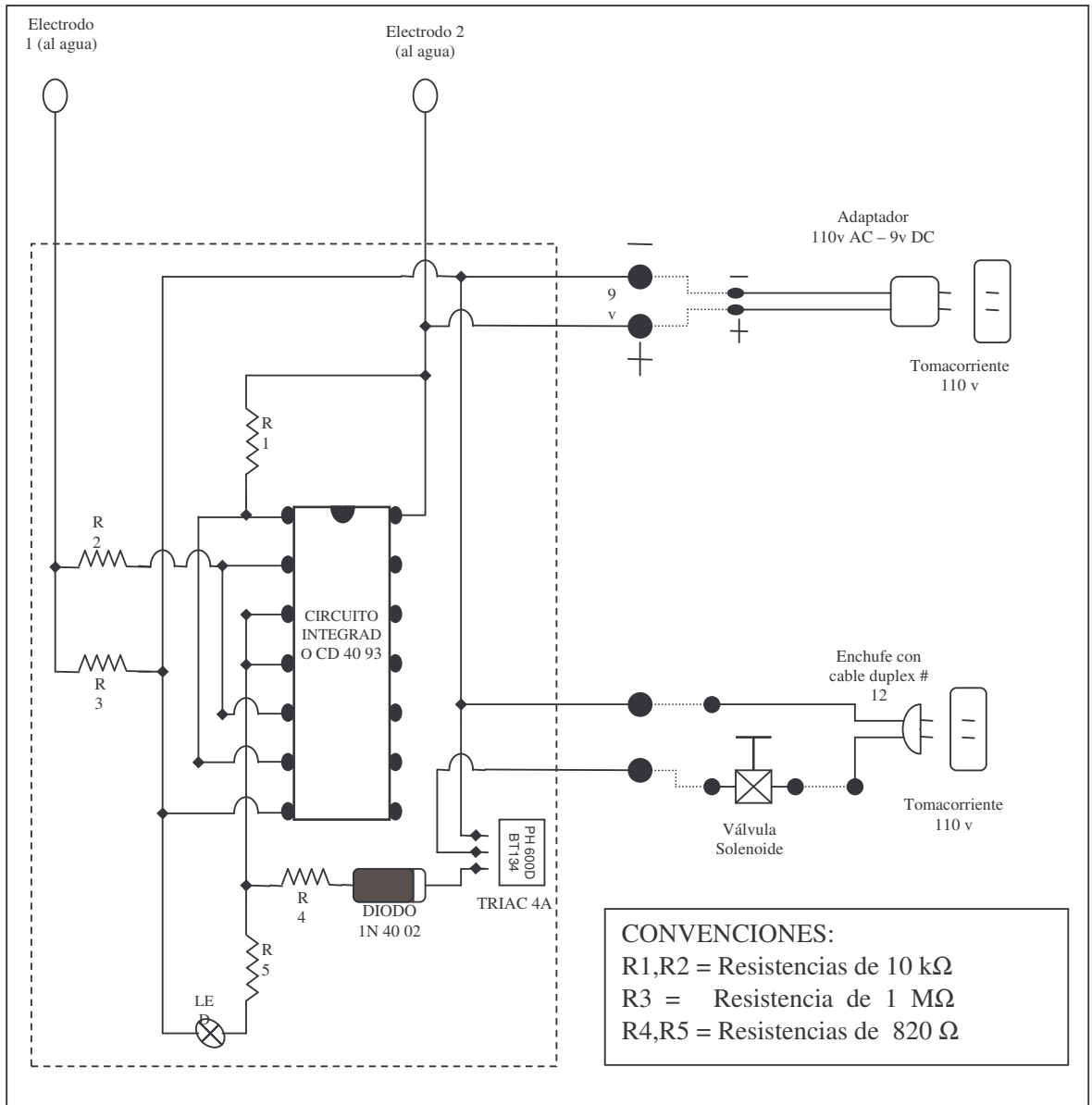
Donde:

H : Humedad del bagazo

W: Peso del bagazo

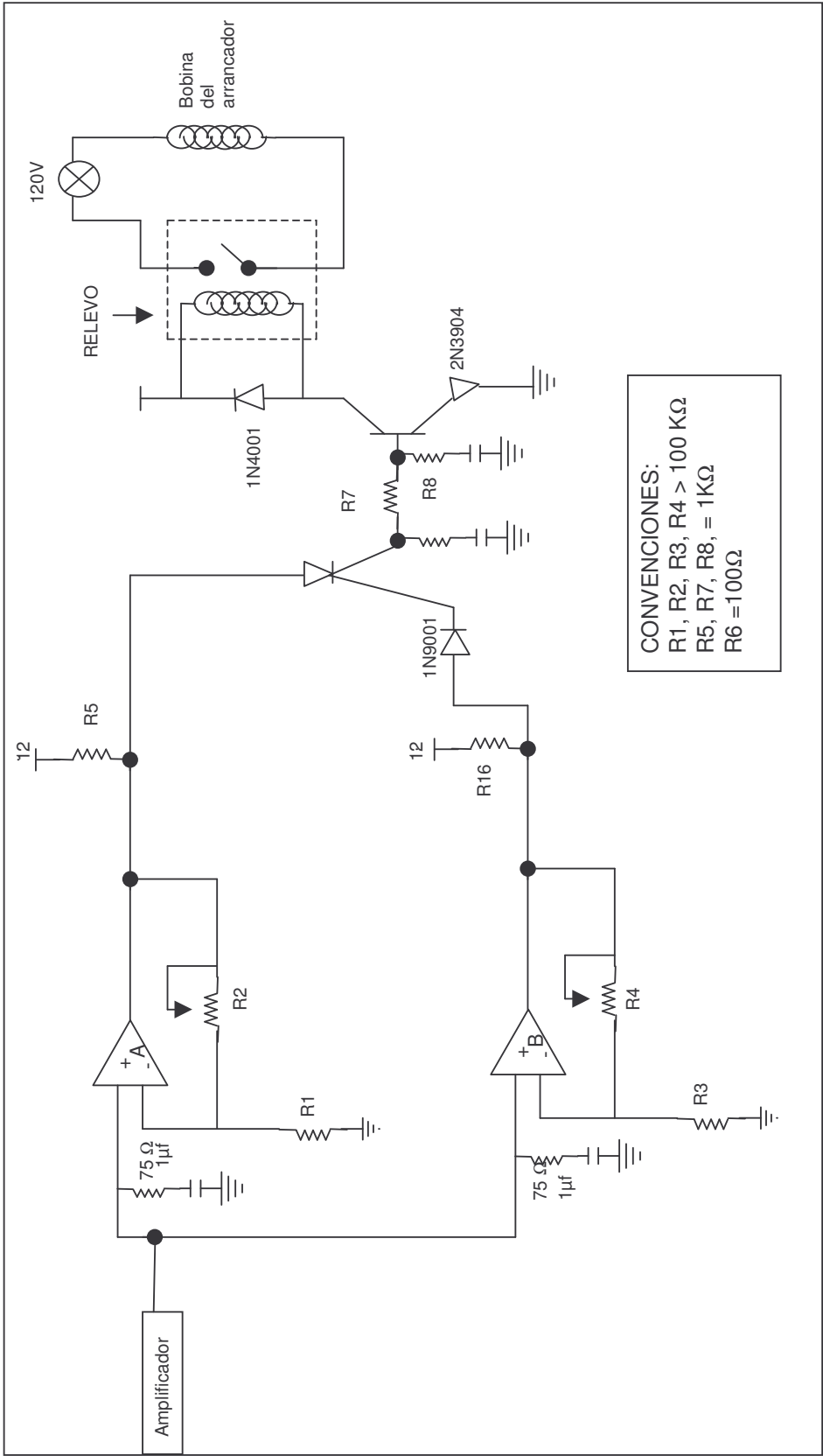
## **ANEXO E**

PLANO DE LA PROTOBOARD UTILIZADA PARA EL CONTROL  
DE NIVEL DE AGUA EN LAS PAILAS.



## **ANEXO F**

PLANO DE LA PROTOBOARD UTILIZADA PARA EL LAZO DE CONTROL EN LA CÁMARA WARD-CIMPA



**CONVENCIONES:**  
 R1, R2, R3, R4 > 100 KΩ  
 R5, R7, R8, = 1KΩ  
 R6 = 100Ω

## **ANEXO G**

CALIBRACIÓN DEL FLUJO DE AIRE EN EL DUCTO.

## CALIBRACIÓN DEL FLUJO DE AIRE EN EL DUCTO.

Se llevaron a cabo dos calibraciones según lo establecido por la norma según Norma ASTM 1258.

1. Calibración a cuatro cinco velocidades distintas para encontrar el factor por el cual hay que multiplicar la velocidad máxima para encontrar el valor de la velocidad promedio:  $Q_t = \text{SUM}(V_i \cdot A_i) = V_{\text{prom}} \cdot A_t = k \cdot V_{\text{max}} \cdot A_t$

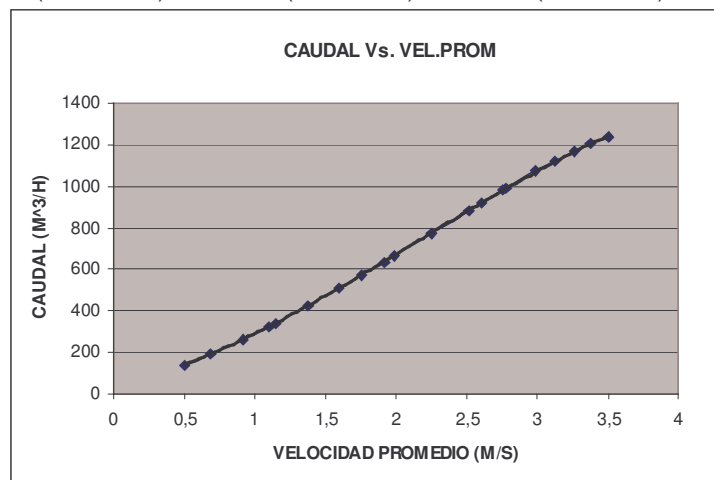
2. Calibración a todas las velocidades pero solo midiendo la velocidad máxima, y teniendo en cuenta los resultados de la calibración anterior.

<b>PRIMERA CALIBRACION DEL DUCTO,</b>																									
	PUNTO	VELOCIDAD DE ROTACION (rpm)																							
		464					812					1160					1450								
		FRECUENCIA (Hertz)																							
		16					28					40					50								
		M1	M2	M3	M4	M5	PROM	M1	M2	M3	M4	M5	PROM	M1	M2	M3	M4	M5	PROM	M1	M2	M3	M4	M5	PROM
<b>SUPERIOR</b>	5	0,75	0,73	0,71	0,73	0,75	0,73	1,74	1,74	1,76	1,74	1,74	1,74	2,67	2,62	2,62	2,73	2,71	2,67	3,44	3,52	3,46	3,57	3,51	3,51
	4	0,82	0,84	0,82	0,84	0,84	0,84	1,76	1,76	1,76	1,83	1,81	1,78	2,75	2,84	2,86	2,84	2,78	2,81	3,57	3,59	3,54	3,68	3,63	3,6
	3	0,86	0,8	0,82	0,84	0,88	0,84	1,92	1,92	1,94	1,94	1,87	1,91	2,75	2,89	2,91	2,93	3	2,9	3,61	3,66	3,7	3,57	3,7	3,66
	2	0,73	0,75	0,77	0,77	0,8	0,73	1,83	1,76	1,81	1,92	1,92	1,84	2,95	2,84	2,82	2,8	2,9	2,8	3,63	3,63	3,6	3,68	3,64	3,64
	1	0,69	0,66	0,64	0,66	0,7	0,67	1,48	1,52	1,5	1,62	1,52	1,52	2,58	2,56	2,53	2,53	2,47	2,53	3,33	3,26	3,2	3,4	3,2	3,33
<b>INFERIOR</b>	5	0,75	0,69	0,66	0,71	0,73	0,71	1,63	1,65	1,7	1,68	1,7	1,67	2,62	2,56	2,6	2,53	2,6	2,58	3,17	3,2	3,2	3,19	3,2	3,2
	4	0,75	0,77	0,75	0,73	0,77	0,74	1,72	1,72	1,7	1,7	1,68	1,7	2,63	2,73	2,67	2,6	2,67	2,67	3,2	3,4	3,3	3,4	3,4	3,3
	3	0,75	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	1,83	1,83	1,83	1,83	1,83	1,83	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	3,5	3,4	3,4	3,5	3,5	3,5
	2	0,93	0,88	0,91	0,88	0,88	0,88	1,83	1,83	1,9	1,87	1,9	1,87	2,89	2,89	2,89	2,89	2,9	2,9	3,5	3,5	3,5	3,6	3,6	3,5
	1	0,71	0,66	0,61	0,7	0,7	0,7	1,81	1,7	1,62	1,7	1,7	1,62	2,62	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	3,4	3,3	3,3	3,4	3,4	3,4
<b>DERECHO</b>	5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	1,63	1,63	1,63	1,63	1,63	1,63	2,62	2,62	2,62	2,62	2,62	2,62	3,1	3,1	3,1	3,2	3,2	3,1
	4	0,71	0,74	0,73	0,74	0,74	0,74	1,63	1,63	1,63	1,63	1,63	1,63	2,62	2,62	2,62	2,62	2,62	2,62	3,1	3,1	3,1	3,2	3,2	3,1
	3	0,71	0,66	0,64	0,69	0,69	0,69	1,63	1,63	1,63	1,63	1,63	1,63	2,62	2,62	2,62	2,62	2,62	2,62	3,1	3,1	3,1	3,2	3,2	3,1
	2	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	1,63	1,63	1,63	1,63	1,63	1,63	2,62	2,62	2,62	2,62	2,62	2,62	3,1	3,1	3,1	3,2	3,2	3,1
	1	0,5	0,49	0,47	0,49	0,49	0,49	1,63	1,63	1,63	1,63	1,63	1,63	2,62	2,62	2,62	2,62	2,62	2,62	3,1	3,1	3,1	3,2	3,2	3,1
<b>IZQUIERDO</b>	5	0,71	0,64	0,69	0,73	0,75	0,7	1,71	1,79	1,85	1,74	1,74	1,74	2,62	2,62	2,62	2,62	2,62	2,62	3,3	3,3	3,3	3,4	3,4	3,3
	4	0,71	0,75	0,73	0,75	0,8	0,75	1,85	1,85	1,83	1,83	1,83	1,83	2,62	2,62	2,62	2,62	2,62	2,62	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4
	3	0,8	0,77	0,8	0,75	0,8	0,78	1,87	1,87	1,87	1,87	1,87	1,87	2,72	2,72	2,72	2,72	2,72	2,72	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4
	2	0,77	0,73	0,75	0,75	0,75	0,75	1,72	1,72	1,72	1,72	1,72	1,72	2,72	2,72	2,72	2,72	2,72	2,72	3,4	3,5	3,5	3,4	3,5	3,5
	1	0,69	0,66	0,66	0,64	0,66	0,66	1,72	1,68	1,65	1,65	1,65	1,65	2,72	2,62	2,62	2,62	2,62	2,62	3,3	3,3	3,4	3,4	3,4	3,4
<b>VELOCIDAD PROMEDIO</b>	5												0,71												2,63
	4												0,75												2,71
	3												0,78												2,78
	2												0,76												2,78
	1												0,64												2,61
CAUDAL	(m3/s)						0,074101374					0,17634702					0,275070816								
CAUDAL	(m3/h)						266,7649473					634,8492735					990,2549361								

<b>SEGUNDA CALIBRACION DEL DUCTO, VELOCIDADES LINEALES EN EL PUNTO DE MAXIMA VELOCIDAD - Sonda Telescópica</b>											
FRECUENCIA (Hertz)	VEL. DE ROTACION (rpm)	PUNTOS DE MEDICION						CAUDAL (m3/s)	FPOL VEL	CAUDAL REAL (m3/s)	CAUDAL REAL (m3/h)
		M1	M2	M3	M4	M5	PROM				
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,7126	0	0
2	58	0	0	0	0	0	0	0	0,7126	0	0
4	116	0	0	0	0	0	0	0	0,7126	0	0
6	174	0	0	0	0	0	0	0	0,7126	0	0
8	232	0	0	0	0	0	0	0	0,7126	0	0
10	290	0	0	0	0	0	0	0	0,7126	0	0
12	348	0,53	0,51	0,49	0,53	0,49	0,51	0,0519	0,7493	0,0389	140,035
14	406	0,69	0,71	0,69	0,66	0,71	0,692	0,0705	0,7669	0,054	194,534
16	464	0,93	0,91	0,88	0,93	0,95	0,92	0,0936	0,7912	0,0741	266,741
18	522	1,1	1,08	1,1	1,13	1,08	1,098	0,1118	0,8114	0,0907	326,466
20	581	1,19	1,17	1,08	1,13	1,15	1,144	0,1164	0,8167	0,0951	342,375
22	639	1,35	1,39	1,37	1,4	1,39	1,38	0,1405	0,8444	0,1186	426,988
24	696	1,59	1,57	1,61	1,65	1,57	1,598	0,1627	0,8698	0,1415	509,318
26	754	1,79	1,76	1,74	1,76	1,74	1,758	0,1789	0,8879	0,1589	571,971
28	812	1,87	1,96	1,9	1,94	1,9	1,914	0,1948	0,9047	0,1763	634,549
30	870	1,92	2,01	2,01	2,03	1,98	1,99	0,2026	0,9126	0,1849	665,465
32	928	2,73	2,75	2,82	2,78	2,73	2,762	0,2811	0,9702	0,2728	981,969
34	986	2,23	2,25	2,25	2,29	2,23	2,25	0,229	0,9371	0,2146	772,58
36	1044	2,56	2,49	2,53	2,47	2,51	2,512	0,2557	0,957	0,2447	880,859
38	1103	2,67	2,56	2,56	2,64	2,62	2,61	0,2657	0,9629	0,2558	920,904
40	1160	2,8	2,82	2,75	2,78	2,75	2,78	0,283	0,9709	0,2747	989,091
42	1219	2,95	2,97	3,06	3,02	2,97	2,994	0,3048	0,9765	0,2976	1071,35
44	1277	3,2	3,17	3,1	3,08	3,11	3,132	0,3188	0,9771	0,3115	1121,4
46	1335	3,24	3,3	3,26	3,24	3,3	3,268	0,3326	0,9751	0,3244	1167,73
48	1393	3,41	3,39	3,35	3,37	3,4	3,384	0,3444	0,9713	0,3346	1204,44
50	1450	3,5	3,57	3,55	3,48	3,44	3,508	0,3571	0,9649	0,3445	1240,33

Finalmente, para el balance de masa se obtuvo el siguiente polinomio, donde se debe tener en el flujo de bagazo y el dato reportado por el TESTO 435:

$$\text{Caudal} = -18,897(\text{Velocidad})^3 + 121,93(\text{Velocidad})^2 + 148,32(\text{Velocidad}) + 38,985 \quad R^2 = 1$$



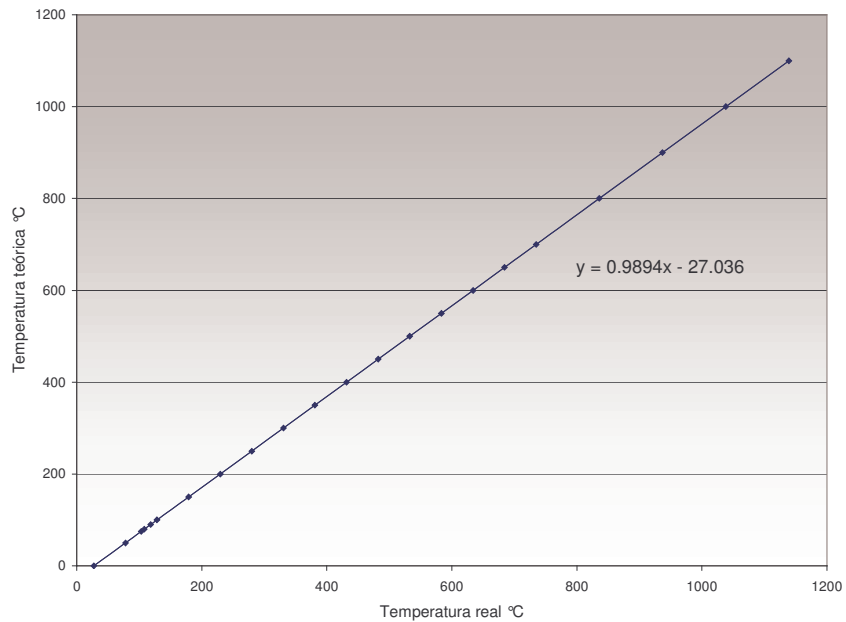
## **ANEXO H**

PROCEDIMIENTO PARA LA CALIBRACIÓN DE TERMOCUPLAS

## CALIBRACIÓN DE TERMOCUPLAS

Se fabricaron 12 termocuplas tipo K chromel -alumel. Para su calibración se utilizó una tabla de milivoltajes termoeléctricos correspondientes a temperaturas fijas y con una línea de tendencia:  $T=24.45mV+1.2667$ .

En una mufla de calentamiento se fijaba a una temperatura, reportándose el dato de mV de respuesta en un voltímetro. Las termocuplas presentaban una desviación negativa promedio de al menos 30 °C. Los datos de calibración para una de las termocuplas utilizadas en la experimentación se presentan en la siguiente grafica donde se compara la temperatura real con la temperatura teórica.

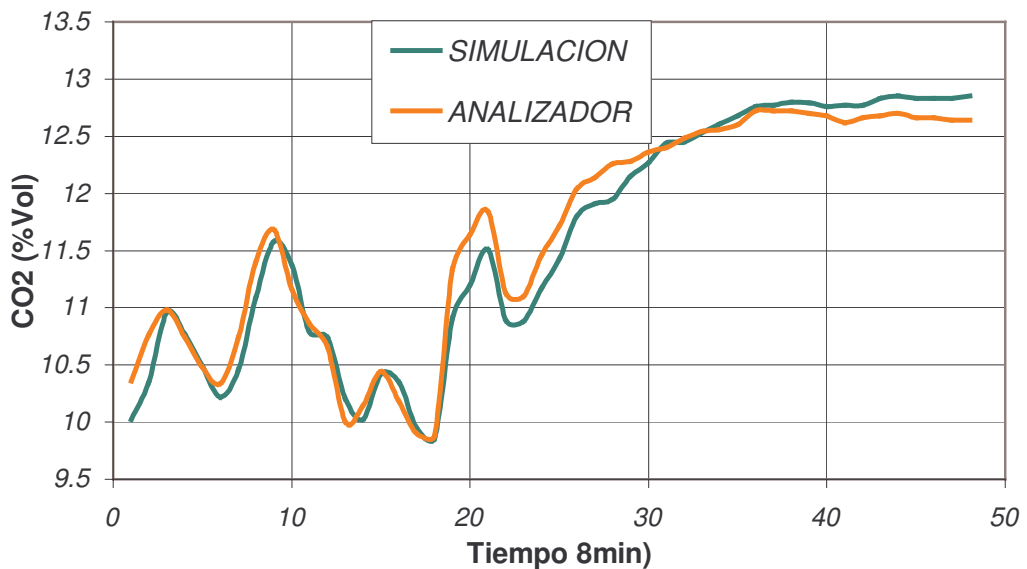
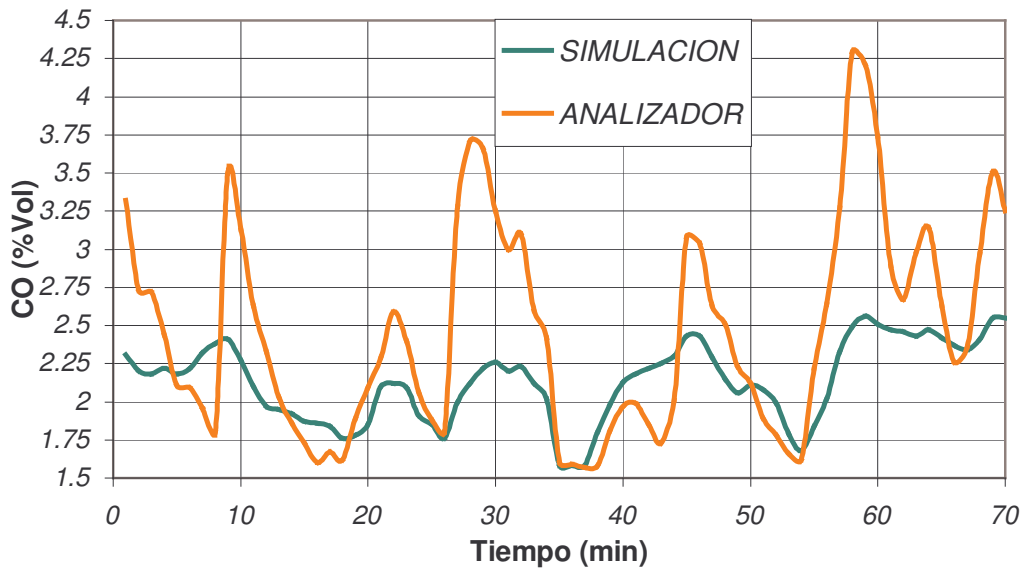


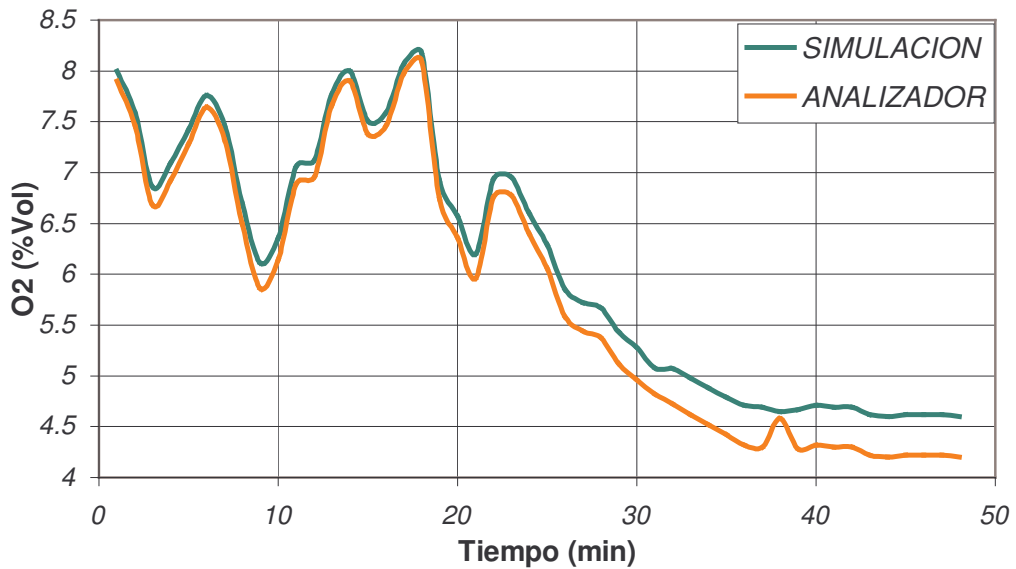
## **ANEXO I**

### **RESULTADOS SIMULACIÓN DE LA COMPOSICIÓN DE GASES DE COMBUSTIÓN**

## PERFILES DE COMPOSICIÓN DE GASES DE COMBUSTIÓN

Los resultados obtenidos de la simulación para las distintas corridas experimentales fueron muy similares. A continuación se presentan los resultados obtenidos para la cámara Ward operando a tiro natural, con flujo de bagazo de 90 kg/h, ALP 40% y una humedad del bagazo en peso del 25%.





## 2. Hoja de cálculo

El modelo matemático desarrollado se integró en una hoja de cálculo de EXCEL para la estimación de la composición de los gases de combustión. Los datos requeridos de entrada en la hoja electrónica son el flujo y humedad del bagazo, luego utilizando el complemento de *solver*<sup>2</sup> de excel, se determina la temperatura adiabática del proceso y la composición de los gases.

Las siguientes figuras presentan el esquema general de la hoja de cálculo de la estimación de la composición de los gases de combustión; los datos reportados corresponden al caso de diseño propuesto en el capítulo 6.

---

<sup>2</sup> La herramienta Microsoft Excel Solver utiliza el código de optimización no lineal (GRG2) desarrollado por la Universidad Leon Lasdon de Austin (Texas) y la Universidad Allan Waren (Cleveland). Los problemas lineales y enteros utilizan el método más simple con límites en las variables y el método de ramificación y límite, implantado por John Watson y Dan Fylstra de Frontline Systems, Inc.

ESTIMACIÓN DE LA COMPOSICIÓN DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN						
Flujo de Bagazo:	90	(Kg/h)		Componente	P.M.	Com pone nte
Humedad:	30	(%)		CO	28,0106	
Flujo agua:	27	(Kg/h)		C	12,0107	
Flujo Bagazo Seco:	63	(Kg/h)		O2	31,9998	
				H2	2,01594	
				CO2	44,0105	
				C6H12O6	180,1542	
				C12H22O11	342,2934	
				H2O	18,01584	
BALANCE POR COMPONENTES (Kg/H)				N2	28,0134	
				Composición Bagazo:		
Componente:	Entran:	O2 Requerido		C:	47	(%)
C	29,61	78,8892	(Kg/h)	H:	6,5	(%)
Hydrogen	4,095	32,5008	(Kg/h)	O:	44	(%)
Glucose	0,315	0,3357	(Kg/h)	glucose	0,5	(%)
Sucrose	1,26	1,4135	(Kg/h)	sucrose	2	(%)
Oxygen	27,72	(Kg/h)				
				Total:	100	(%)
Total:	63	(Kg/h)				
Oxigeno Requerido:		113,1392	(Kg/h)	Aire Req.	12,7113	(Kmol /h)
Oxigeno Necesario:		85,4192	(Kg/h)	Exceso Aire:	60	(%)
		2,6694	(Kmol/h)	Aire Total:	20,33802	(Kmol /h)
Nitrogeno:		10,0419	(Kmol/h)	Neto Excess:	7,6268	(Kmol /h)
REACCION SIN CARBOHIDRATOS:						
Componente:	Entran:	O2 Requerido				
C	30,24	80,568	(Kg/h)	Aire Req.	10,2534	(Kmol /h)
Hydrogen	4,41	35,001	(Kg/h)	Exceso Aire:	60	(%)
Oxygen	28,35	28,350	(Kg/h)	Aire Total:	16,405	(Kmol /h)
Total:	63		(Kg/h)	Neto Excess:	6,1521	(Kmol /h)
Oxigeno		87,218	(Kg/h)	O2	110,2442	(Kg/h)

Necesario:						)
Oxigeno Necesario:		2,7256	(Kmol/h)	N2	363,0630	(Kg/h)

REACTOR DE CONVERSION BAGAZO SECO				
Reacción	Rank	Conversión		
C-CO2	0	68	(%)	
C-CO	1	50	(%)	
H2-H2O	0	100	(%)	
CO2 generado	75,3492	(Kg/h)		
Carbon remanent:	9,6768	(Kg/h)		
Carbon to CO:	4,8384	(Kg/h)		
CO gen.	11,2838	(Kg/h)		
Carbon (N. Q.)	4,8384	(Kg/h)		
O2 Requerido	61,2314	(Kg/h)		
H2O saturat	7,0949	(Kg/h)		
O2 Salida	77,3627	(Kg/h)		
Composición Corriente de Salida (Flue Gas)				
C	0,0000	(Kg/h)	0,0000	(Kmol/h)
H2	4,4100	(Kg/h)	2,1876	(Kmol/h)
O2	77,3627	(Kg/h)	2,4176	(Kmol/h)
N2	363,0630	(Kg/h)	12,9603	(Kmol/h)
H2O	34,0949	(Kg/h)	1,8925	(Kmol/h)
CO	11,2838	(Kg/h)	0,4028	(Kmol/h)
CO2	75,3492	(Kg/h)	1,7121	(Kmol/h)
Tot. Mass Flow	565,5637	(Kg/h)	21,5729	(Kmol/h)
Coeficientes				
Componente	A	B	C	D
H2	3,249	4,22E-04	0	8,30E+03
O2	3,639	5,06E-04	0	-2,27E+04
N2	3,28	5,93E-04	0	4,00E+03
H2O	3,47	1,45E-03	0	1,21E+04
CO	3,376	5,57E-04	0	-3,10E+03
CO2	5,457	1,05E-03	0	-1,16E+05

ENTALPIA DE REACCION DATOS					
Componente	DH for		C-CO2	-673716,292	(Kj)
H2O <sub>l</sub>	-285830	(Kj/Kmol)	C-CO	-44523,97945	(Kj)
H2O <sub>v</sub>	-241818	(Kj/Kmol)	H2O <sub>l</sub> -H2O <sub>v</sub>	44012	
CO	-110525	(Kj/Kmol)	TOTAL	-674228,2715	(Kj)
CO2	-393509	(Kj/Kmol)			
	44012				

<i>coeficientes de la ecuación entalpia</i>			<i>Tini.=</i>	298,15	<i>Kelvin</i>
<i>niAi=</i>	75,68468		<i>Tadiabatica.=</i>	1227,56	<i>Kelvin</i>
<i>niBi=</i>	0,0145896		<i>Tadiabatica=</i>	954,41	<i>Celsius</i>
<i>niCi=</i>	0,00000		<i>TOTAL</i>	-674228,2715	<i>(Kj)</i>
<i>niDi=</i>	-161317,891		<i>DH adiab.</i>	-8,14907E-09	
<i>Reaccion de producción de Agua:</i>					
<i>DH TOTAL=DH1+DH2+DH3</i>				<i>coeficientes de la ecuación entalpia</i>	
<i>DH1=</i>	<i>ENTALPIA DE REACTIVOS A T=298.15</i>		<i>niAi=</i>	72,18786	
<i>DH2=</i>	<i>ENTALPIA DE REACCION A 298.15</i>		<i>niBi=</i>	0,0162849	
<i>DH3=</i>	<i>ENTALPIA PRODUCTOS HASTA Tadiabatica</i>		<i>niCi=</i>	0,00000	
			<i>niDi=</i>	-128176,280	
<i>DH1=</i>	-671957,7231	<i>(Kj)</i>			
<i>DH2=</i>	-528992,6188	<i>(Kj)</i>	<i>Composición Corriente de Salida (FINAL)</i>		
<i>DH3=</i>					
			<i>C</i>	0,0000	
<i>Tini.=</i>	298,15		<i>H2</i>	0,0000	<i>(Kmol/h)</i>
<i>Tadiabatica.=</i>	1897,89	<i>Kelvin</i>	<i>O2</i>	1,32382	<i>(Kmol/h)</i>
<i>Tadiabatica=</i>	1624,74	<i>Celsius</i>	<i>N2</i>	12,9603	<i>(Kmol/h)</i>
<i>TOTAL</i>	-1200950,342	<i>(Kj)</i>	<i>H2O</i>	4,0801	<i>(Kmol/h)</i>
<i>DH adiab.</i>	-1,21072E-08	<i>(Kj)</i>	<i>CO</i>	0,4028	<i>(Kmol/h)</i>
			<i>CO2</i>	1,7121	<i>(Kmol/h)</i>
			<i>Tot. Mol Flow</i>	20,4791	<i>(Kmol/h)</i>

## **ANEXO J**

MATRIZ DE VESTER PARA LAS VARIABLES DE FUNCIONAMIENTO  
EN UNA HORNILLA PANELERA

Tabla K1. Matriz de Vester para análisis de variables.

VARIABLES	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	Total activos
1 Area de Transferencia de calor (m2)	0	0	0	0	0	1	0	0	0	3	0	2	0	0	0	0	3	0	1	1	2	0	2	15
2 Energia liberada (KW)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	5
3 Poder Calorifico del Bagazo (KJ/Kg)	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	3	0	0	1	0	0	3	11
4 Humedad del Bagazo (%)	0	3	3	0	0	3	0	3	3	1	0	1	0	0	3	0	3	0	3	3	0	0	3	32
5 Exceso de Aire (%)	0	3	0	0	0	0	0	3	3	1	0	1	0	0	0	3	0	3	1	0	0	3	21	
6 Flujo de Bagazo (Kg/h)	0	3	0	0	0	0	0	3	3	2	0	2	0	0	3	0	3	0	2	3	0	0	3	27
7 Tipo de Camara de Combustion	0	3	0	0	0	1	0	1	1	0	0	2	0	0	2	0	3	2	2	2	0	0	3	22
8 Flujo de gases de Combustion (Kg/h)	0	3	0	0	0	0	0	2	3	0	2	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	12
9 Composicion de los gases	0	3	0	0	0	0	0	0	3	0	1	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	10
10 Energia Aprovechada (KW)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	3
11 Geometria del ducto	0	0	0	0	0	0	0	3	0	2	0	1	0	0	0	3	0	1	1	0	0	2	13	
12 Tiro ejercido por la Chimenea (Pa)	0	1	0	0	3	0	0	3	1	2	0	0	0	0	2	0	2	0	2	2	0	0	3	21
13 Area Libre de Parrilla (%)	0	1	0	0	2	0	2	2	1	0	1	0	0	0	2	0	2	0	2	2	0	0	2	19
14 Humedad relativa (%)	0	3	0	0	2	0	0	2	1	0	1	0	0	0	0	1	3	1	1	0	0	1	16	
15 Formacion de escoria	0	3	0	0	3	1	0	2	1	0	0	1	3	0	0	1	0	1	2	0	0	1	19	
16 Tamaño de partícula	0	3	0	0	1	0	0	1	1	1	0	1	1	0	3	0	1	0	2	2	0	0	2	19
17 Temperatura de los Gases (°C)	0	2	0	0	0	0	0	2	0	3	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8
18 Temperatura de entrada del aire (°C)	0	2	0	0	0	0	0	0	1	1	0	2	0	3	0	0	1	0	0	0	0	0	1	11
19 Velocidad de ignicion (mm/s)	0	2	0	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	0	2	0	1	0	0	2	0	0	3	13
20 Turbulencia de la llama	0	1	0	0	0	0	0	2	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	3	10
21 Geometria de la Camara	0	3	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	2	10	
22 Variedad del Bagazo (grados Brix, Contenido de fibra)	0	3	3	0	0	0	0	2	1	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	1	16
23 Longitud de llama	0	3	0	0	0	0	0	1	3	3	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	23
<b>TOTAL PASIVOS</b>	0	44	6	0	11	6	0	33	27	29	0	29	4	3	18	0	45	5	22	24	2	0	38	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	

Fuente: Investigación de los autores

\* Nivel de causalidad: no es causa=0, es causa indirecta=1, es causa medianamente directa=2, Es causa muy directa=3.

Tabla K2. Identificación de variables.

VARIABLES CRITICAS
Tiro ejercido por la Chimenea (Pa)
VARIABLES PASIVAS
Energia liberada (KW)
Flujo de gases de Combustion (Kg/h)
Composicion de los gases
Energia Aprovechada (KW)
Temperatura de los Gases (°C)
Velocidad de ignicion (mm/s)
Turbulencia de la llama
Longitud de llama
VARIABLES ACTIVAS
Humedad del Bagazo (%)
Exceso de Aire (%)
Flujo de Bagazo (Kg/h)
Tipo de Camara de Combustion
Area Libre de Parrilla (%)
Formacion de monoestrato (% de area de parrilla cubierta)
Tamaño de partícula
VARIABLES INDIFERENTES
Area de Transferencia de calor (m2)
Poder Calorifico del Bagazo (KJ/Kg)
Geometria del ducto
Humedad relativa (%)
Temperatura de entrada del aire (°C)
Geometria de la Camara
Variedad del Bagazo (grados Brix, Contenido de fibra)

Fuente: Investigación de los autores

## **ANEXO K**

**CÁLCULOS DE EXERGÍA EN LAS CÁMARAS  
DE COMBUSTIÓN WARD-CIMPA Y PLANA-CIMPA**

Tabla K1. Datos utilizados para los cálculos de exergía del bagazo, ventilador, aire y pailas.

VCS bagazo	4609.73 Kcal /kg	
Exergía ventilador	1.8 Hp	1154.97 Kcal/h
Exergía específica aire 25°C	1.5 Kcal/kg	
Calor aprovechado 1 paila, Plana-Cimpa	31.695 Hp	20484.6 Kcal/h
Calor aprovechado 1 paila, Ward-Cimpa	25.356 Hp	16387.7 Kcal/h
Area paila Ward-Cimpa	0.36 m <sup>2</sup>	
Area paila Plana-Cimpa	0.45 m <sup>2</sup>	
U = 74.5 Watt/m <sup>2</sup> °C	9.99E-2 Hp/m <sup>2</sup> °C	
T gases = 800°C	T agua = 95°C	
Exergía Pailas Plana	30187.91 Kcal/h	
Exergía Paila Ward	12075.163 Kcal/h	

Tabla K2. Datos de caudales y flujos másicos de aire en el ducto para cada configuración experimental.

<b>Cód. Exp.</b>	<b>Caudal Aire primario m3/s</b>	<b>Caudal Aire secundario m3/s</b>	<b>Caudal Total</b>	<b>Kg Aire/s</b>	<b>Kg Aire/h</b>
CW07	0.2087	0.0026	0.2113	0.2731	983.2186
CW08	0.2300	0.0030	0.2331	0.3013	1084.6585
CW09	0.4377	0.0050	0.4427	0.5724	2060.5334
CW01	0.2362	0.0029	0.2391	0.3091	1112.6919
CW02	0.3603	0.0046	0.3650	0.4718	1698.5372
CW03	0.4784	0.0058	0.4842	0.6259	2253.3520
CW04	0.2341	0.0028	0.2369	0.3063	1102.6958
CW05	0.3695	0.0048	0.3743	0.4839	1741.8904
CW06	0.4255	0.0048	0.4302	0.5562	2002.3816
CW16	0.1965	0.0027	0.1992	0.2575	927.0927
CW17	0.3273	0.0038	0.3310	0.4280	1540.6953
CW18	0.4382	0.0055	0.4437	0.5737	2065.1500
CW13	0.2484	0.0029	0.2513	0.3249	1169.5703
CW14	0.2692	0.0032	0.2725	0.3522	1268.0904
CW15	0.2916	0.0037	0.2953	0.3818	1374.5283
CW10	0.3003	0.0030	0.3033	0.3921	1411.5825
CW11	0.3227	0.0043	0.3269	0.4227	1521.5598
CW12	0.3316	0.0047	0.3364	0.4349	1565.5163
CP04	0.2178	0	0.2178	0.2816	1013.8010
CO05	0.4693	0	0.4693	0.6066	2183.9359
CP06	0.6301	0	0.6301	0.8146	2932.4432
CP01	0.2066	0	0.2066	0.2671	961.6898
CP02	0.4173	0	0.4173	0.5395	1942.3291
CP03	0.6006	0	0.6006	0.7764	2795.0589
CP10	0.1965	0	0.1965	0.2540	914.3159
CP11	0.3614	0	0.3614	0.4672	1681.7728
CP12	0.6321	0	0.6321	0.8172	2941.9180
CP07	0.2168	0	0.2168	0.2803	1009.0637
CP08	0.4173	0	0.4173	0.5395	1942.3291
CP09	0.6677	0	0.6677	0.8633	3107.7265

Fuente: Investigación de los autores



Tabla L3. Cálculos de exergía para cada flujo de entrada y salida de los sistemas de cámaras de combustión.

Código Exp.	Flujo bagazo	Exergía bagazo Kcal/h	%Exergía bagazo	Flujo aire Kg/h	Exergía Aire Kcal/h	%Exergía Aire	%Exergía motor	Flujo gases Kg/h	Gases Kcal/h	%Exergía gases	Pailas	%Exergía Pailas	Coef. pérdidas exergéticas I	Eficiencia Exergética
CM07	70	322681.1	100	983.219	983.219	0.305	0.000	564.834	112970.460	35.010	3.742	61.563	38.4	
CM08	70	322681.1	100	1084.658	1084.658	0.336	0.358	525.863	107030.200	33.169	3.742	63.783	36.2	
CM09	70	322681.1	100	2060.533	2060.533	0.639	0.358	484.915	98688.930	30.584	3.742	66.670	33.3	
CM01	90	414875.7	100	1112.692	1699.038	0.402	0.000	582.917	118703.139	28.612	2.911	68.880	31.1	
CM02	90	414875.7	100	1698.537	2547.806	0.614	0.278	588.338	109631.560	26.425	2.911	71.557	28.4	
CM03	90	414875.7	100	2253.352	3380.028	0.815	0.278	584.803	118905.210	28.660	2.911	69.522	30.5	
CM04	110	507070.3	100	1102.696	1694.044	0.336	0.000	591.629	120432.700	23.751	2.381	74.194	25.8	
CM05	110	507070.3	100	1741.890	2612.836	0.515	0.228	537.640	10672.440	21.629	2.381	76.733	23.3	
CM06	110	507070.3	100	2002.382	3003.572	0.592	0.228	557.599	113561.450	22.396	2.381	76.043	24.0	
CM16	110	507070.3	100	927.093	1390.639	0.274	0.000	665.138	135133.884	26.650	2.381	71.243	28.8	
CM17	110	507070.3	100	1540.695	2311.043	0.456	0.228	631.796	128463.663	25.334	2.381	72.968	27.0	
CM18	110	507070.3	100	2065.150	3097.725	0.611	0.228	614.833	125049.794	24.661	2.381	73.796	26.2	
CM13	90	414875.7	100	1169.570	1754.355	0.423	0.000	619.149	125707.556	30.300	2.911	67.212	32.8	
CM14	90	414875.7	100	1288.090	1902.136	0.458	0.278	645.125	131147.816	31.611	2.911	66.215	33.8	
CM15	90	414875.7	100	1374.528	2061.792	0.497	0.278	653.505	132836.263	32.018	2.911	65.846	34.2	
CM10	70	322681.1	100	1411.582	2117.374	0.656	0.000	624.555	124957.588	38.725	3.742	58.189	41.8	
CM11	70	322681.1	100	1521.560	2282.340	0.707	0.358	631.134	126198.047	39.109	3.742	58.214	41.8	
CM12	70	322681.1	100	1565.516	2348.274	0.728	0.358	631.048	126112.210	39.083	3.742	58.261	41.7	
Promedio		<b>322681.1</b>	<b>100</b>	<b>1274.3674</b>	<b>1665.7465</b>	<b>0.516221</b>	<b>0.178964</b>	<b>592.9409</b>	<b>119541.335</b>	<b>37.046277</b>	<b>3.742135</b>	<b>59.90677263</b>	<b>40.0932274</b>	
CP04	180	829751.4	100	1013.801	1520.702	0.183	0.000	1261.019	259730.404	31.302	3.638	65.243	34.8	
CO05	180	829751.4	100	2183.936	3275.904	0.395	0.139	1657.671	337140.398	40.631	3.638	56.264	43.7	
CP06	180	829751.4	100	2932.443	4398.665	0.530	0.139	1659.002	337242.733	40.644	3.638	56.387	43.6	
CP01	220	1014140.6	100	961.690	1442.535	0.142	0.000	1706.527	347053.491	34.221	2.977	62.944	37.1	
CP02	220	1014140.6	100	1942.329	2913.494	0.287	0.114	1591.166	323716.538	31.920	2.977	65.504	34.5	
CP03	220	1014140.6	100	2795.059	4192.588	0.413	0.114	1545.795	314579.188	31.019	2.977	66.531	33.5	
CP10	180	829751.4	100	914.316	1371.474	0.165	0.000	1434.198	291091.029	35.082	3.638	61.445	38.6	
CP11	180	829751.4	100	1681.773	2522.659	0.304	0.139	1702.755	345644.146	41.656	3.638	55.149	44.9	
CP12	180	829751.4	100	2941.918	4412.877	0.532	0.139	1690.254	342583.753	41.288	3.638	55.745	44.3	
CP07	220	1014140.6	100	1009.064	1513.595	0.149	0.000	1563.815	317840.505	31.341	2.977	65.832	34.2	
CP08	220	1014140.6	100	1942.329	2913.494	0.287	0.114	1719.752	349075.152	34.421	2.977	63.004	37.0	
CP09	220	1014140.6	100	3107.727	4661.590	0.460	0.114	1640.595	333277.363	32.863	2.977	64.734	35.3	
Promedio		<b>921946</b>	<b>100</b>	<b>2060.7638</b>	<b>3091.1457</b>	<b>0.321466</b>	<b>0.056943</b>	<b>1450.807</b>	<b>296503.883</b>	<b>32.082614</b>	<b>3.307443</b>	<b>64.9883518</b>	<b>35.01</b>	

Fuente: Investigación de los autores

Tabla A2. Resultados de exergías promedios aportadas.

<b>EXERGÍA APORTADA PROMEDIO</b>		
<b>WARD-CIMPA</b>	Kcal/h	%
Total aportada	325501.82	100.00
Bagazo	322681.10	99.13
Aire	1665.75	0.51
Motor	1154.97	0.35
Gases	119541.34	36.73
Paila	12075.16	3.71
Perdidas Exergéticas	193885.32	59.57
<b>PLANA-CIMPA</b>		
Total aportada	926192.11	100.00
Bagazo	921946.00	99.54
Aire	2060.76	0.22
Motor	1154.97	0.12
Gases	296503.88	32.01
Pailas	30187.91	3.26
Perdidas Exergéticas	599500.32	64.73



## **ANEXO L**

RESULTADOS DE LAS VARIABLES MONITOREADAS EN  
LAS CORRIDAS EXPERIMENTALES.



**Ward-CIMPA, 110 Kg/h, 40%ALP.**

Registro	Regimen Ventilador*	Temperatura cámara	CO %VOL	CO2 %VOL	O2% VOL	N2 %VOL	Exceso %	Lambda	Masa de gases secos por kg de bagazo seco (kg)	Volumen total de gases secos (litros)	CO (L)	CO2 (L)	O2(L)	N2(L)	CO grmol emitido/ Kg bagazo seco	CO2 grmol emitido/ Kg bagazo seco	O2 grmol emitido/ Kg bagazo seco	N2 grmol emitido/ Kg bagazo seco
1	0	981.13	2.51	10.01	8.29	79.19	51.03	1.51	6.14	5119.04	128.39	512.31	424.47	4053.87	5.15	20.54	17.01	162.50
2	0	984.15	2.56	9.76	8.59	79.09	54.05	1.54	6.26	5221.65	133.78	509.63	448.43	4129.80	5.36	20.43	17.98	165.54
3	0	969.51	2.59	9.68	8.74	78.99	55.50	1.56	6.32	5270.00	136.49	510.14	460.60	4162.77	5.47	20.45	18.46	166.86
4	0	946.70	2.61	9.80	8.72	78.88	55.16	1.55	6.31	5255.64	137.07	515.05	458.08	4145.44	5.49	20.65	18.36	166.17
5	0	936.75	2.70	10.10	8.42	78.78	51.76	1.52	6.17	5139.62	138.67	518.90	432.96	4049.09	5.56	20.80	17.36	162.31
6	0	934.57	2.74	10.42	7.98	78.86	46.78	1.47	5.98	4972.85	136.26	518.37	396.63	3921.59	5.46	20.78	15.90	157.20
7	0	928.67	2.69	10.71	7.63	78.97	43.24	1.43	5.84	4853.37	130.75	519.70	370.41	3832.51	5.24	20.83	14.85	153.62
8	0	934.34	2.68	10.88	7.37	79.07	40.69	1.41	5.74	4768.30	127.60	518.98	351.52	3770.20	5.11	20.80	14.09	151.13
9	0	938.64	2.67	11.03	7.15	79.14	38.59	1.39	5.66	4698.35	125.63	518.32	336.03	3718.37	5.04	20.78	13.47	149.05
10	0	932.25	2.67	11.14	7.02	79.17	37.46	1.37	5.62	4660.05	124.61	518.94	327.14	3689.36	4.99	20.80	13.11	147.89
11	0	917.01	2.77	11.30	6.80	79.12	35.26	1.35	5.53	4586.54	127.23	518.28	312.07	3628.96	5.10	20.77	12.51	145.47
12	0	910.43	3.03	11.52	6.46	79.00	31.26	1.31	5.38	4454.60	134.80	512.99	287.59	3519.22	5.40	20.56	11.53	141.07
13	0	905.79	3.35	11.73	6.12	78.80	27.27	1.27	5.22	4323.35	145.01	507.04	264.59	3406.72	5.81	20.32	10.61	136.56
14	0	903.74	3.75	11.92	5.80	78.54	23.32	1.23	5.07	4193.77	157.10	499.90	243.07	3293.71	6.30	20.04	9.74	132.03
15	0	895.14	4.11	12.08	5.50	78.31	19.92	1.20	4.94	4082.91	167.73	493.22	224.72	3197.24	6.72	19.77	9.01	128.16
16	0	886.28	4.40	12.19	5.30	78.11	17.48	1.17	4.84	4003.14	176.30	488.06	212.01	3126.77	7.07	19.56	8.50	125.94
17	0	873.84	4.62	12.28	5.13	77.97	15.63	1.16	4.77	3942.76	182.08	484.33	202.18	3074.17	7.30	19.41	8.10	123.23
18	0	867.97	4.71	12.34	5.02	77.93	14.62	1.15	4.73	3909.79	184.15	482.47	196.27	3046.90	7.38	19.34	7.87	122.13
19	0	869.43	4.71	12.35	4.98	77.95	14.38	1.14	4.72	3901.88	183.93	481.96	194.47	3041.52	7.37	19.32	7.80	121.92
20	0	872.69	4.69	12.32	5.00	77.98	14.57	1.15	4.73	3908.50	183.47	481.53	195.58	3047.93	7.35	19.30	7.84	122.17
21	0	875.85	4.73	12.30	5.03	77.94	14.62	1.15	4.73	3910.65	185.05	480.85	196.78	3047.96	7.42	19.27	7.89	122.18
22	0	883.11	4.80	12.29	5.04	77.88	14.44	1.14	4.72	3905.06	187.36	479.85	196.66	3041.18	7.51	19.23	7.88	121.90
23	0	884.10	4.86	12.29	5.03	77.82	14.23	1.14	4.72	3898.21	189.38	479.17	196.16	3033.51	7.59	19.21	7.86	121.60

24	0	877.86	4.94	12.34	5.01	77.71	13.82	1.14	4.70	3884.10	191.95	479.30	194.52	3018.34	7.69	19.21	7.80	120.99
25	0	875.95	5.03	12.38	4.96	77.63	13.29	1.13	4.68	3866.40	194.33	478.66	191.93	3001.48	7.79	19.19	7.69	120.31
26	0	873.49	4.96	12.41	4.93	77.70	13.31	1.13	4.68	3866.59	191.63	479.77	190.70	3004.49	7.68	19.23	7.64	120.43
27	0	869.15	4.61	12.41	4.94	78.04	14.44	1.14	4.72	3902.76	180.00	484.41	192.64	3045.72	7.22	19.42	7.72	122.09
28	0	863.95	4.50	12.40	4.97	78.14	15.01	1.15	4.75	3921.15	176.29	486.07	194.80	3063.99	7.07	19.48	7.81	122.82
29	0	852.82	4.37	12.35	5.00	78.29	15.62	1.16	4.77	3941.61	172.09	486.71	197.08	3085.73	6.90	19.51	7.90	123.69
30	0	845.93	4.21	12.32	5.06	78.42	16.47	1.16	4.80	3969.22	167.02	488.85	200.68	3112.66	6.70	19.60	8.04	124.77
1	2	875.33	3.09	10.58	7.50	78.83	40.03	1.40	5.94	4942.58	152.82	522.73	370.69	3896.34	6.13	20.95	14.86	156.18
2	2	871.80	3.36	10.69	7.33	78.62	37.19	1.37	5.83	4845.43	162.90	517.88	355.07	3809.57	6.53	20.76	14.23	152.71
3	2	860.26	3.77	10.93	6.92	78.37	32.08	1.32	5.62	4670.42	176.26	510.38	323.38	3660.40	7.07	20.46	12.96	146.73
4	2	864.39	4.15	11.24	6.46	78.16	27.16	1.27	5.42	4501.01	186.70	505.73	290.77	3517.81	7.48	20.27	11.66	141.01
5	2	867.24	4.67	11.67	5.88	77.79	21.52	1.22	5.20	4305.49	200.89	502.37	252.99	3349.24	8.05	20.14	10.14	134.25
6	2	867.51	5.15	12.15	5.19	77.51	15.19	1.15	4.94	4087.07	210.57	496.50	212.20	3167.81	8.44	19.90	8.51	126.98
7	2	879.84	5.25	12.46	4.70	77.58	11.32	1.11	4.79	3953.71	207.73	492.79	185.82	3067.37	8.33	19.75	7.45	122.95
8	2	904.34	5.15	12.61	4.55	77.69	10.66	1.11	4.76	3929.45	202.21	495.58	178.71	3052.94	8.11	19.87	7.16	122.38
9	2	913.66	4.96	12.69	4.48	77.87	10.81	1.11	4.77	3933.43	195.10	499.07	176.22	3063.04	7.82	20.01	7.06	122.78
10	2	923.38	4.51	12.73	4.56	78.21	12.54	1.13	4.83	3989.63	179.85	507.80	181.77	3120.21	7.21	20.35	7.29	125.07
11	2	925.60	4.04	12.80	4.60	78.57	14.12	1.14	4.90	4040.54	163.08	517.03	185.86	3174.57	6.54	20.72	7.45	127.25
12	2	929.84	3.89	13.02	4.43	78.65	13.55	1.14	4.88	4017.61	156.37	523.25	178.06	3159.93	6.27	20.97	7.14	126.66
13	2	921.67	3.87	13.28	4.14	78.71	11.82	1.12	4.81	3956.39	153.11	525.41	163.64	3114.24	6.14	21.06	6.56	124.83
14	2	918.15	4.04	13.46	3.88	78.62	9.88	1.10	4.73	3889.62	157.06	523.54	151.07	3057.94	6.30	20.99	6.06	122.58
15	2	918.75	4.23	13.58	3.68	78.51	8.15	1.08	4.66	3830.38	162.10	520.32	140.80	3007.15	6.50	20.86	5.64	120.54
16	2	932.36	4.49	13.66	3.50	78.35	6.44	1.06	4.59	3773.07	169.41	515.25	132.06	2956.35	6.79	20.65	5.29	118.50
17	2	938.27	4.70	13.68	3.40	78.22	5.28	1.05	4.54	3734.73	175.68	510.91	126.83	2921.30	7.04	20.48	5.08	117.10
18	2	945.67	4.76	13.66	3.34	78.25	4.82	1.05	4.52	3720.34	177.01	508.05	124.26	2911.02	7.10	20.36	4.98	116.69
19	2	952.76	4.45	13.40	3.65	78.50	7.59	1.08	4.63	3815.69	169.72	511.45	139.20	2995.32	6.80	20.50	5.58	120.07
20	2	953.31	4.10	13.12	4.06	78.73	11.19	1.11	4.78	3939.11	161.42	516.65	159.77	3101.26	6.47	20.71	6.40	124.31
21	2	950.28	3.56	12.66	4.69	79.08	17.22	1.17	5.02	4146.20	147.77	525.07	194.54	3278.81	5.92	21.05	7.80	131.43
22	2	944.01	3.02	12.11	5.43	79.44	24.25	1.24	5.31	4389.22	132.47	531.45	238.42	3486.88	5.31	21.30	9.56	139.77
23	2	929.75	2.60	11.59	6.18	79.63	31.03	1.31	5.58	4623.71	120.31	535.98	285.75	3681.68	4.82	21.48	11.45	147.58
24	2	929.79	2.36	11.35	6.56	79.73	34.93	1.35	5.74	4757.62	112.47	540.09	311.91	3793.16	4.51	21.65	12.50	152.05
25	2	931.67	2.20	11.34	6.64	79.83	36.15	1.36	5.79	4798.41	105.66	543.95	318.42	3830.37	4.24	21.80	12.76	153.54
26	2	933.02	2.14	11.36	6.70	79.80	36.98	1.37	5.82	4824.95	103.06	548.31	323.08	3850.50	4.13	21.98	12.95	154.35
27	2	934.14	2.13	11.51	6.61	79.74	36.23	1.36	5.79	4796.90	102.27	552.22	317.17	3825.24	4.10	22.14	12.71	153.33
28	2	950.40	2.05	11.56	6.62	79.77	36.71	1.37	5.81	4811.44	98.54	556.39	318.52	3837.99	3.95	22.30	12.77	153.84

29	2	952.90	2.23	11.68	6.52	79.57	35.04	1.35	5.74	4753.28	105.90	555.37	309.72	3782.28	4.25	22.26	12.42	151.61
30	2	948.77	2.41	11.60	6.56	79.43	34.64	1.35	5.73	4741.68	114.27	550.22	310.86	3766.32	4.58	22.06	12.46	150.97
1	1	949.07	4.07	11.60	5.93	78.41	25.24	1.25	5.80	4807.38	195.66	557.46	284.98	3769.27	7.84	22.35	11.42	151.09
2	1	940.74	3.33	10.68	7.23	78.76	41.19	1.41	6.50	5403.21	179.93	577.28	390.54	4255.46	7.21	23.14	15.65	170.58
3	1	957.77	2.74	9.82	8.46	78.98	56.07	1.56	7.15	5962.46	163.25	585.75	504.19	4709.27	6.54	23.48	20.21	188.77
4	1	991.51	2.61	9.75	8.69	78.96	58.20	1.58	7.24	6040.84	157.42	588.86	524.83	4769.73	6.31	23.60	21.04	191.19
5	1	1011.62	2.74	10.15	8.27	78.84	54.32	1.54	7.08	5889.89	161.27	597.94	487.21	4643.48	6.46	23.97	19.53	186.13
6	1	1015.26	2.83	10.74	7.61	78.82	48.06	1.48	6.80	5648.88	159.98	606.92	429.77	4452.22	6.41	24.33	17.23	178.47
7	1	1015.73	3.06	11.68	6.44	78.81	34.49	1.34	6.21	5137.39	157.31	600.05	331.05	4048.98	6.31	24.05	13.27	162.30
8	1	1013.53	3.34	12.62	5.24	78.81	20.70	1.21	5.60	4621.73	154.37	583.08	241.99	3642.29	6.19	23.37	9.70	146.00
9	1	1010.87	3.43	12.88	4.86	78.83	17.75	1.18	5.47	4511.24	154.92	581.05	219.07	3556.21	6.21	23.29	8.78	142.55
10	1	1013.08	3.62	13.02	4.60	78.75	15.57	1.16	5.38	4430.79	160.48	576.89	203.99	3489.43	6.43	23.12	8.18	139.87
11	1	1016.18	3.85	13.12	4.40	78.63	13.56	1.14	5.29	4357.23	167.67	571.67	191.89	3426.00	6.72	22.92	7.69	137.33
12	1	1012.42	4.10	13.21	4.21	78.48	11.56	1.12	5.20	4284.05	175.82	565.84	180.27	3362.12	7.05	22.68	7.23	134.77
13	1	1003.36	4.20	13.24	4.12	78.45	10.73	1.11	5.17	4253.79	178.57	563.03	175.26	3336.93	7.16	22.57	7.03	133.76
14	1	1000.87	4.16	13.23	4.16	78.45	11.05	1.11	5.18	4265.60	177.62	564.25	177.28	3346.45	7.12	22.62	7.11	134.14
15	1	1001.06	4.10	13.25	4.19	78.46	11.43	1.11	5.20	4278.32	175.41	566.96	179.18	3356.77	7.03	22.73	7.18	134.55
16	1	999.56	4.26	13.31	4.11	78.32	10.53	1.11	5.16	4245.35	181.02	564.97	174.57	3324.78	7.26	22.65	7.00	133.27
17	1	1006.27	4.47	13.38	4.00	78.15	9.38	1.09	5.11	4202.88	187.87	562.18	168.12	3284.72	7.53	22.53	6.74	131.67
18	1	1016.03	4.79	13.47	3.80	77.94	7.45	1.07	5.02	4132.24	197.85	556.53	157.19	3220.66	7.93	22.31	6.30	129.10
19	1	1014.91	5.16	13.56	3.54	77.74	4.92	1.05	4.91	4040.39	208.40	548.04	142.87	3141.08	8.35	21.97	5.73	125.91
20	1	1005.89	5.37	13.63	3.35	77.65	3.29	1.03	4.84	3981.47	213.96	542.60	133.30	3091.62	8.58	21.75	5.34	123.93
21	1	1005.11	5.43	13.66	3.24	77.67	2.60	1.03	4.81	3956.51	214.84	540.30	128.35	3073.02	8.61	21.66	5.14	123.18
22	1	1007.83	5.38	13.67	3.19	77.76	2.47	1.02	4.80	3951.90	212.45	540.30	126.14	3073.00	8.52	21.66	5.06	123.18
23	1	1009.77	5.33	13.69	3.17	77.81	2.47	1.02	4.80	3951.43	210.61	541.03	125.18	3074.61	8.44	21.69	5.02	123.24
24	1	1017.66	5.33	13.71	3.15	77.82	2.37	1.02	4.80	3947.82	210.34	541.17	124.28	3072.03	8.43	21.69	4.98	123.14
25	1	1035.83	5.30	13.75	3.11	77.84	2.26	1.02	4.79	3943.16	208.99	542.11	122.71	3069.35	8.38	21.73	4.92	123.03
26	1	1047.93	5.29	13.80	3.06	77.84	2.04	1.02	4.79	3934.38	208.21	542.94	120.55	3062.68	8.35	21.76	4.83	122.77
27	1	1057.47	5.36	13.83	3.02	77.80	1.64	1.02	4.77	3919.53	210.09	541.99	118.21	3049.23	8.42	21.73	4.74	122.23
28	1	1069.79	5.48	13.85	2.96	77.71	1.08	1.01	4.74	3899.37	213.61	539.98	115.42	3030.36	8.56	21.65	4.63	121.47
29	1	1074.24	5.44	13.85	2.94	77.77	1.06	1.01	4.74	3898.70	212.01	540.05	114.47	3032.18	8.50	21.65	4.59	121.54
30	1	1070.41	5.01	13.65	3.22	78.12	3.90	1.04	4.87	4003.58	200.50	546.57	128.76	3127.76	8.04	21.91	5.16	125.37

Fuente: Investigación de los autores

\*0: tiro natural, 1: Velocidad baja, 2: Velocidad alta

**Ward-CIMPA, 70 Kg/h, 40%ALP**

Registro	Regimen Ventilador*	Temperatura camara	CO %VOL	CO2 %VOL	O2% VOL	N2 %VOL	EXCESO %	Lambda	Masa de gases por kg de bagazo seco (gr)	Volumen total de gases por Kg B.S. (litros)	CO (L)	CO2 (L)	O2 (L)	N2 (L)	CO gmoles/Kg bagazo seco	CO2 gmoles/Kg bagazo seco	O2 gmoles/Kg bagazo seco	N2 gmoles/Kg bagazo seco
1	1	912.51	1.83	8.82	9.86	79.48	89.97	1.90	11923.16	21171.90	388.29	1867.36	2088.40	16827.85	7.34	35.28	39.46	317.95
2	1	889.40	1.74	8.49	10.24	79.53	96.73	1.97	12312.06	21609.03	376.00	1834.17	2212.76	17186.09	7.20	35.11	42.35	328.95
3	1	858.87	1.75	8.42	10.29	79.54	97.55	1.98	12359.24	21202.76	371.47	1784.42	2182.19	16864.67	7.28	34.95	42.74	330.35
4	1	832.24	1.76	8.04	10.64	79.57	104.61	2.05	12764.96	21659.29	380.34	1740.54	2304.55	17233.86	7.54	34.53	45.71	341.85
5	1	811.99	1.85	7.52	10.98	79.65	112.13	2.12	13197.35	22366.49	412.89	1682.85	2454.95	17815.80	8.22	33.50	48.87	354.63
6	1	805.49	2.06	7.36	11.28	79.29	119.33	2.19	13611.75	23252.45	479.93	1712.31	2622.88	18437.34	9.48	33.83	51.82	364.27
7	1	820.96	2.83	7.98	10.44	78.75	106.71	2.07	12886.09	22345.62	633.27	1783.18	2332.88	17596.28	12.30	34.63	45.31	341.72
8	1	845.74	3.54	8.48	9.75	78.22	98.19	1.98	12395.85	21837.21	773.91	1852.67	2129.57	17081.07	14.77	35.35	40.64	325.94
9	1	860.90	4.06	9.48	8.51	77.95	80.27	1.80	11365.63	20047.99	813.15	1900.55	1706.48	15627.81	15.44	36.09	32.40	296.74
10	1	875.86	4.44	10.70	7.21	77.65	60.31	1.60	10217.66	17863.65	793.15	1910.70	1288.33	13871.48	15.12	36.43	24.56	264.48
11	1	869.64	4.53	11.31	6.24	77.93	42.91	1.43	9217.36	15853.03	718.14	1792.34	988.59	12353.95	13.89	34.67	19.12	238.97
12	1	870.30	3.95	10.98	6.61	78.45	47.49	1.47	9480.41	16173.30	639.17	1776.15	1069.38	12688.60	12.48	34.68	20.88	247.75
13	1	875.00	3.30	10.40	7.32	78.98	56.27	1.56	9985.61	17003.33	561.79	1768.69	1243.96	13428.89	11.01	34.67	24.39	263.26
14	1	886.45	2.83	9.45	8.50	79.21	72.88	1.73	10940.61	18740.63	530.73	1771.74	1592.95	14845.20	10.38	34.65	31.15	290.31
15	1	891.08	2.36	8.71	9.49	79.43	85.78	1.86	11682.45	20145.50	476.24	1755.48	1911.41	16002.38	9.28	34.19	37.23	311.68
16	1	903.87	2.06	8.36	10.11	79.47	94.95	1.95	12209.54	21344.44	440.12	1783.54	2157.50	16963.28	8.47	34.30	41.50	326.26
17	1	911.97	1.85	8.20	10.39	79.57	99.39	1.99	12464.92	21876.55	403.84	1793.00	2272.54	17407.17	7.74	34.37	43.56	333.65
18	1	914.28	1.69	8.09	10.60	79.62	103.14	2.03	12680.53	22284.07	376.16	1803.23	2361.22	17743.46	7.20	34.53	45.21	339.75
19	1	913.71	1.61	8.44	10.25	79.70	96.46	1.96	12296.37	21504.75	345.80	1815.86	2203.81	17139.29	6.64	34.89	42.34	329.30
20	1	911.30	1.58	8.55	10.13	79.74	94.34	1.94	12174.75	21322.86	336.90	1822.68	2160.43	17002.84	6.46	34.95	41.43	326.07
21	1	909.58	1.56	8.60	10.07	79.77	93.15	1.93	12106.28	21156.08	330.46	1819.42	2129.99	16876.21	6.35	34.96	40.93	324.30
22	1	910.62	1.68	8.60	10.10	79.62	93.81	1.94	12144.00	21333.79	358.41	1834.71	2155.57	16985.11	6.85	35.07	41.20	324.66
23	1	914.62	1.86	8.78	9.92	79.44	90.39	1.90	11947.39	21087.52	392.23	1852.33	2091.04	16751.93	7.46	35.21	39.75	318.47
24	1	916.05	2.16	8.91	9.73	79.20	87.62	1.88	11788.34	20934.37	452.18	1865.67	2037.33	16579.18	8.54	35.24	38.48	313.13
25	1	924.22	2.50	9.27	9.22	79.01	80.45	1.80	11375.83	20244.08	505.70	1876.22	1866.50	15995.66	9.52	35.32	35.14	301.11
26	1	926.82	2.69	9.56	8.82	78.93	74.31	1.74	11022.77	19687.42	529.99	1882.90	1735.64	15538.88	9.93	35.28	32.52	291.14

27	1	926.92	2.78	9.80	8.48	78.94	68.88	1.69	10710.48	19180.01	533.59	1879.64	1625.70	15141.08	9.96	35.10	30.35	282.71
28	1	932.48	2.67	9.82	8.42	79.09	68.03	1.68	10661.79	19137.88	510.22	1880.11	1612.18	15135.39	9.50	35.02	30.03	281.92
29	1	940.47	2.52	9.92	8.37	79.18	67.27	1.67	10618.02	19093.10	481.91	1894.80	1597.71	15118.68	8.96	35.22	29.69	280.98
30	1	937.56	2.36	9.96	8.37	79.31	67.27	1.67	10618.02	19137.66	452.03	1905.35	1601.44	15178.84	8.38	35.32	29.69	281.40
1	0	973.68	2.11	11.52	6.86	79.52	54.80	1.55	9901.01	18468.36	388.94	2126.82	1266.93	14685.67	6.92	37.86	22.55	261.42
2	0	974.16	1.98	10.51	8.16	79.35	74.14	1.74	11013.09	20328.44	401.69	2136.93	1658.80	16131.03	7.25	38.58	29.95	291.22
3	0	958.27	1.83	9.28	9.62	79.27	95.63	1.96	12248.99	22311.69	408.30	2069.63	2147.28	17686.47	7.50	38.04	39.47	325.08
4	0	928.76	1.70	8.34	10.82	79.14	111.53	2.12	13163.23	23591.58	401.53	1966.59	2552.61	18670.85	7.53	36.86	47.85	349.98
5	0	922.17	2.20	8.66	10.33	78.82	106.48	2.06	12872.35	22813.12	501.89	1974.70	2356.14	17980.39	9.50	37.39	44.62	340.47
6	0	895.59	2.98	9.70	8.94	78.39	88.05	1.88	11813.13	20767.68	618.46	2014.47	1855.80	16278.95	11.76	38.31	35.29	309.60
7	0	888.87	3.67	10.82	7.34	78.17	66.40	1.66	10568.21	18493.23	679.07	2000.23	1358.14	14455.79	12.93	38.07	25.85	275.14
8	0	907.57	4.01	11.99	5.87	78.13	44.81	1.45	9326.80	16308.64	653.98	1955.73	956.99	12741.94	12.40	37.09	18.15	241.66
9	0	948.42	4.36	12.95	4.57	78.11	28.10	1.28	8365.47	14660.37	639.78	1898.81	669.98	11451.80	12.07	35.81	12.64	215.98
10	0	992.11	4.56	13.21	4.21	78.01	25.30	1.25	8204.91	14426.56	658.43	1906.04	607.36	11254.74	12.37	35.80	11.41	211.38
11	0	1017.12	4.06	12.99	4.53	78.42	28.05	1.28	8363.10	14705.75	597.35	1909.98	666.76	11531.66	11.23	35.90	12.53	216.73
12	0	1029.32	3.52	12.42	5.23	78.83	34.43	1.34	8729.64	15382.77	541.17	1909.92	805.13	12126.55	10.17	35.89	15.13	227.90
13	0	1035.86	3.27	11.66	6.17	78.90	44.91	1.45	9332.37	16484.42	539.37	1921.42	1017.09	13006.53	10.14	36.12	19.12	244.54
14	0	1035.57	2.99	10.99	7.04	78.99	54.07	1.54	9858.88	17472.51	521.73	1920.58	1229.37	13800.84	9.80	36.07	23.09	259.22
15	0	1007.57	2.60	10.64	7.55	79.21	58.28	1.58	10101.17	17882.96	464.24	1902.75	1350.52	14165.45	8.74	35.82	25.42	266.67
16	0	993.61	2.93	10.80	7.32	78.96	56.22	1.56	9982.80	17656.40	517.33	1906.19	1291.74	13941.14	9.74	35.90	24.33	262.57
17	0	990.67	3.37	11.32	6.66	78.65	50.17	1.50	9634.78	17002.37	572.64	1924.67	1132.36	13372.70	10.79	36.26	21.33	251.95
18	0	994.21	3.58	12.02	5.79	78.62	40.21	1.40	9061.95	15956.26	570.60	1917.30	923.55	12544.81	10.75	36.11	17.39	236.27
19	0	1000.71	3.74	12.67	4.97	78.62	31.45	1.31	8558.16	15042.08	562.57	1905.53	747.89	11826.08	10.59	35.87	14.08	222.61
20	0	1027.32	3.66	12.96	4.63	78.75	28.49	1.28	8388.20	14803.85	542.12	1917.99	685.12	11658.62	10.15	35.92	12.83	218.32
21	0	1039.08	3.20	12.90	4.78	79.12	29.78	1.30	8462.36	14999.94	480.00	1935.59	717.00	11867.35	8.95	36.09	13.37	221.28
22	0	1051.03	2.67	12.40	5.50	79.43	36.58	1.37	8853.59	15742.67	420.33	1952.09	865.85	12504.40	7.83	36.35	16.12	232.83
23	0	1051.27	2.41	12.03	6.02	79.54	41.69	1.42	9147.20	16292.16	393.29	1959.62	980.14	12959.11	7.32	36.47	18.24	241.20
24	0	1034.18	2.45	11.99	6.04	79.53	41.85	1.42	9156.48	16290.10	398.46	1953.51	983.27	12954.86	7.43	36.41	18.33	241.44
25	0	1022.94	2.52	11.96	6.06	79.45	42.04	1.42	9167.18	16288.30	411.12	1948.73	987.07	12941.38	7.67	36.37	18.42	241.52
26	0	1021.99	2.69	12.11	5.86	79.35	40.33	1.40	9069.24	16039.50	430.82	1942.06	939.27	12727.34	8.07	36.40	17.60	238.52
27	0	1020.40	2.78	12.43	5.47	79.32	36.30	1.36	8837.37	15615.57	433.49	1940.70	854.48	12386.90	8.12	36.36	16.01	232.07

28	0	1026.50	2.88	12.79	5.02	79.32	31.74	1.32	8574.89	15142.95	435.51	1936.48	760.18	12010.78	8.15	36.25	14.23	224.86
29	0	1038.67	2.67	12.62	5.10	79.62	32.37	1.32	8611.25	15275.62	407.55	1927.17	778.45	12162.45	7.60	35.95	14.52	226.86
30	0	1051.08	2.33	12.29	5.57	79.81	36.66	1.37	8857.68	15759.79	367.20	1937.19	877.19	12578.20	6.84	36.07	16.33	234.17
1	2	929.23	3.12	9.32	9.13	78.44	80.34	1.80	11369.76	19653.88	612.41	1830.96	1794.01	15416.51	11.87	35.48	34.76	298.72
2	2	915.56	2.72	8.94	9.64	78.71	88.07	1.88	11814.10	20454.34	555.95	1828.62	1970.98	16098.79	10.77	35.42	38.18	311.86
3	2	906.99	2.28	8.40	10.43	78.89	99.89	2.00	12493.69	21773.51	496.44	1828.10	2271.41	17177.55	9.57	35.25	43.79	331.19
4	2	911.23	2.11	8.30	10.61	78.99	103.12	2.03	12679.44	22227.44	468.11	1843.99	2357.89	17557.46	8.98	35.36	45.21	336.64
5	2	919.27	2.10	9.02	9.78	79.10	91.68	1.92	12021.41	21323.41	446.94	1923.37	2085.43	16867.67	8.45	36.34	39.41	318.74
6	2	919.17	2.05	9.63	9.03	79.29	80.75	1.81	11393.15	20247.27	415.88	1950.22	1827.92	16053.25	7.83	36.70	34.40	302.09
7	2	932.18	2.06	10.05	8.52	79.36	73.07	1.73	10951.63	19678.89	405.78	1978.12	1677.43	15617.56	7.54	36.76	31.17	290.21
8	2	939.34	2.03	10.38	8.14	79.44	66.39	1.66	10567.32	19028.57	387.04	1975.93	1548.93	15116.68	7.17	36.59	28.69	279.95
9	2	948.38	1.98	10.65	7.85	79.52	61.36	1.61	10277.94	18652.68	369.32	1986.88	1464.61	14831.87	6.78	36.47	26.88	272.25
10	2	952.53	1.81	10.15	8.44	79.60	68.70	1.69	10700.48	19481.78	352.23	1977.79	1645.04	15506.72	6.46	36.26	30.16	284.26
11	2	956.10	1.69	9.55	9.18	79.58	79.24	1.79	11306.12	20628.22	349.44	1969.58	1892.85	16416.35	6.41	36.11	34.70	300.98
12	2	959.35	1.63	8.74	10.10	79.53	96.71	1.97	12310.70	22431.26	365.63	1961.39	2264.66	17839.58	6.73	36.12	41.70	328.52
13	2	953.13	1.76	8.65	10.15	79.44	97.55	1.98	12358.87	22409.68	394.41	1938.89	2275.03	17801.36	7.30	35.89	42.12	329.55
14	2	925.61	1.86	8.54	10.22	79.38	98.68	1.99	12424.32	22196.86	413.75	1894.72	2269.41	17618.98	7.78	35.62	42.66	331.22
15	2	911.13	1.96	8.42	10.35	79.28	100.73	2.01	12541.73	22239.49	435.00	1871.68	2301.34	17631.47	8.24	35.47	43.61	334.10
16	2	904.86	2.25	8.78	9.97	79.00	94.47	1.94	12182.19	21417.09	482.31	1881.28	2134.86	16918.64	9.20	35.90	40.74	322.89
17	2	895.31	2.39	9.24	9.39	78.98	81.87	1.82	11457.67	20057.64	480.18	1852.52	1883.81	15841.12	9.19	35.45	36.05	303.12
18	2	901.41	2.32	8.88	9.78	79.02	88.91	1.89	11862.48	20935.47	485.28	1859.91	2046.65	16543.63	9.22	35.35	38.90	314.43
19	2	918.44	2.22	8.22	10.54	79.02	107.57	2.08	12935.39	23043.60	512.03	1894.18	2427.87	18209.51	9.67	35.76	45.83	343.74
20	2	913.07	2.12	7.56	11.27	79.04	126.85	2.27	14043.93	24901.37	528.91	1883.54	2806.88	19682.04	10.06	35.81	53.37	374.24
21	2	890.52	1.82	6.63	12.14	79.40	145.67	2.46	15125.90	26569.76	483.57	1762.11	3226.63	21097.45	9.32	33.95	62.17	406.49
22	2	871.71	1.69	6.28	12.63	79.40	155.81	2.56	15709.31	27162.95	457.97	1705.83	3431.22	21567.93	8.98	33.43	67.24	422.69
23	2	853.94	1.60	6.26	12.70	79.45	157.27	2.57	15792.78	26829.90	429.81	1678.48	3406.32	21315.28	8.57	33.48	67.95	425.19
24	2	849.46	1.57	6.32	12.64	79.47	155.41	2.55	15685.97	26530.84	417.06	1675.69	3354.56	21083.53	8.35	33.57	67.19	422.32
25	2	858.20	1.55	6.34	12.63	79.48	154.78	2.55	15650.09	26459.39	410.12	1677.53	3341.29	21030.46	8.22	33.61	66.95	421.38
26	2	868.92	1.54	6.59	12.49	79.38	150.59	2.51	15408.96	26032.15	401.42	1715.00	3251.94	20663.80	8.04	34.35	65.13	413.87
27	2	871.94	1.53	6.64	12.29	79.54	145.74	2.46	15130.10	25553.05	390.45	1696.72	3139.96	20325.92	7.82	33.99	62.91	407.22
28	2	877.57	1.52	6.34	12.62	79.52	155.05	2.55	15665.43	26638.94	404.91	1688.91	3360.77	21184.35	8.07	33.65	66.95	422.03

29	2	875.95	1.52	6.17	12.79	79.52	161.90	2.62	16059.43	27200.40	413.45	1678.81	3479.48	1628.67	8.27	33.60	69.64	432.89
30	2	862.68	1.52	5.99	12.98	79.51	170.22	2.70	16537.57	27831.85	422.49	1666.57	3612.57	2130.22	8.52	33.59	72.82	446.10

Fuente: Investigación de los autores

\*0: tiro natural, 1: Velocidad baja, 2: Velocidad alta

### Ward-CIMPA, 90 Kg/h, 40%ALP

Registro	Regimen ventilador*	Temperatura camara	CO %VOL	CO2 %VOL	O2 %VOL	N2 %VOL	Exceso %	lambda	Masa de gases secos por kg de bagazo seco (kg)	Volumen total de gases secos (litros)	CO (L)	CO2 (L)	O2 (L)	N2 (L)	CO gmo/Kg bagazo seco	CO2 gmo/Kg bagazo seco	O2 gmo/Kg bagazo seco	N2 gmo/Kg bagazo seco
1	0	999.38	2.18	10.66	7.25	79.91	41.96	1.42	6.46	5371.12	117.09	572.78	389.30	4291.95	4.69	22.96	15.60	172.04
2	0	998.00	2.24	10.66	7.20	79.91	41.12	1.41	6.42	5341.31	119.43	569.38	384.36	4268.14	4.79	22.82	15.41	171.09
3	0	1001.66	2.30	10.66	7.17	79.88	40.55	1.41	6.40	5320.95	122.28	567.00	381.41	4250.27	4.90	22.73	15.29	170.37
4	0	995.84	2.39	10.74	7.13	79.73	39.83	1.40	6.37	5293.05	126.72	568.47	377.50	4220.36	5.08	22.79	15.13	169.17
5	0	986.23	2.52	10.93	6.92	79.63	37.54	1.38	6.27	5206.89	131.11	569.01	360.32	4146.45	5.26	22.81	14.44	166.21
6	0	981.56	2.58	11.06	6.69	79.66	35.22	1.35	6.17	5121.39	132.34	566.63	342.72	4079.70	5.30	22.71	13.74	163.53
7	0	979.68	2.65	11.17	6.54	79.64	33.48	1.33	6.09	5057.04	133.81	564.77	330.83	4027.63	5.36	22.64	13.26	161.45
8	0	975.06	2.63	11.15	6.47	79.75	32.90	1.33	6.07	5037.14	132.28	561.74	325.90	4017.22	5.30	22.52	13.06	161.03
9	0	973.95	2.47	10.87	6.70	79.95	35.74	1.36	6.19	5145.34	127.19	559.40	344.84	4113.91	5.10	22.42	13.82	164.90
10	0	979.76	2.35	10.56	7.11	79.98	39.94	1.40	6.37	5302.30	124.50	560.13	376.99	4240.67	4.99	22.45	15.11	169.99
11	0	984.14	2.33	10.42	7.36	79.89	42.23	1.42	6.47	5387.10	125.41	561.34	396.38	4303.97	5.03	22.50	15.89	172.52
12	0	988.45	2.28	10.28	7.47	79.96	43.52	1.44	6.53	5436.61	124.17	559.10	406.22	4347.12	4.98	22.41	16.28	174.25
13	0	992.23	2.22	10.13	7.68	79.97	45.87	1.46	6.63	5524.45	122.53	559.74	424.06	4418.12	4.91	22.44	17.00	177.10
14	0	996.55	2.18	10.14	7.76	79.91	47.00	1.47	6.68	5564.29	121.30	564.44	432.01	4446.54	4.86	22.63	17.32	178.24
15	0	996.45	2.19	10.38	7.53	79.89	44.71	1.45	6.58	5476.13	120.15	568.64	412.46	4374.88	4.82	22.79	16.53	175.37
16	0	989.66	2.23	10.62	7.33	79.82	42.72	1.43	6.49	5399.21	120.29	573.61	395.65	4309.65	4.82	22.99	15.86	172.75
17	0	988.67	2.35	10.96	7.03	79.67	39.55	1.40	6.36	5277.71	123.92	578.23	370.92	4204.65	4.97	23.18	14.87	168.54
18	0	1001.77	2.48	11.20	6.78	79.54	36.55	1.37	6.23	5164.63	128.08	578.44	350.37	4107.74	5.13	23.19	14.04	164.66
19	0	1011.11	2.60	11.41	6.52	79.47	33.34	1.33	6.09	5045.71	131.39	575.61	328.98	4009.72	5.27	23.07	13.19	160.73

20	0	1012.14	2.77	11.43	6.45	79.35	32.07	1.32	6.03	4999.75	138.49	571.57	322.58	3967.10	5.55	22.91	12.93	159.02
21	0	1020.34	2.96	11.45	6.39	79.20	30.84	1.31	5.98	4955.73	146.59	567.33	316.77	3925.04	5.88	22.74	12.70	157.33
22	0	1030.23	3.11	11.49	6.32	79.08	29.69	1.30	5.93	4913.78	153.02	564.50	310.35	3885.92	6.13	22.63	12.44	155.77
23	0	1027.21	3.02	11.69	6.05	79.24	27.93	1.28	5.85	4847.02	146.28	566.71	293.34	3840.68	5.86	22.72	11.76	153.95
24	0	1021.71	3.16	11.92	5.77	79.14	25.14	1.25	5.73	4743.08	150.07	565.56	273.77	3753.67	6.02	22.67	10.97	150.46
25	0	1017.76	3.33	12.09	5.52	79.07	22.69	1.23	5.63	4652.62	154.75	562.41	256.64	3678.82	6.20	22.54	10.29	147.46
26	0	1003.78	3.48	12.22	5.30	79.01	20.62	1.21	5.54	4576.75	159.27	559.10	242.38	3615.99	6.38	22.41	9.72	144.95
27	0	977.72	3.63	12.29	5.14	78.93	19.08	1.19	5.47	4520.98	164.29	555.54	232.56	3568.59	6.59	22.27	9.32	143.05
28	0	952.56	4.08	12.36	5.00	78.57	16.58	1.17	5.36	4430.53	180.59	547.44	221.53	3480.98	7.24	21.94	8.88	139.53
29	0	933.19	4.37	12.41	4.85	78.37	14.64	1.15	5.28	4360.66	190.47	541.25	211.40	3417.54	7.64	21.70	8.47	136.99
30	0	923.57	4.61	12.47	4.73	78.19	13.15	1.13	5.21	4306.79	198.54	536.97	203.62	3367.65	7.96	21.52	8.16	134.99
1	1	957.18	2.66	11.11	6.86	79.36	14.61	1.15	5.34	4427.01	117.94	491.93	303.69	3513.45	4.73	19.72	12.17	140.84
2	1	961.18	2.42	11.12	6.99	79.47	19.90	1.20	5.57	4618.26	111.67	513.55	322.91	3670.13	4.48	20.59	12.94	147.12
3	1	958.83	2.26	11.38	6.82	79.54	25.33	1.25	5.80	4809.94	108.90	547.18	328.23	3825.64	4.37	21.93	13.16	153.35
4	1	946.00	2.08	11.67	6.56	79.69	30.43	1.30	6.03	4988.96	103.77	582.11	327.28	3975.80	4.16	23.33	13.12	159.37
5	1	939.73	2.29	11.80	6.30	79.60	36.11	1.36	6.28	5192.84	119.02	612.96	327.15	4133.71	4.77	24.57	13.11	165.70
6	1	938.70	2.50	11.74	6.17	79.60	38.27	1.38	6.37	5274.08	131.64	618.97	325.52	4197.96	5.28	24.81	13.05	168.27
7	1	943.11	2.60	11.43	6.34	79.63	37.48	1.37	6.34	5252.73	136.78	600.28	332.81	4182.85	5.48	24.06	13.34	167.67
8	1	952.76	2.68	10.91	6.81	79.60	36.00	1.36	6.27	5210.11	139.53	568.32	354.91	4147.35	5.59	22.78	14.23	166.24
9	1	967.40	2.72	10.32	7.40	79.56	33.07	1.33	6.14	5115.62	139.35	528.14	378.35	4069.78	5.59	21.17	15.17	163.14
10	1	967.16	2.40	9.82	8.07	79.71	31.04	1.31	6.05	5050.74	121.02	495.98	407.70	4026.05	4.85	19.88	16.34	161.38
11	1	962.09	2.12	9.51	8.62	79.75	32.09	1.32	6.10	5093.79	107.78	484.52	439.29	4062.20	4.32	19.42	17.61	162.83
12	1	962.09	1.91	9.37	8.94	79.79	36.42	1.36	6.29	5253.88	100.35	492.18	469.49	4191.86	4.02	19.73	18.82	168.03
13	1	959.24	1.78	9.27	9.11	79.84	41.96	1.42	6.53	5457.98	97.04	506.06	497.33	4357.54	3.89	20.29	19.94	174.67
14	1	953.34	1.70	9.10	9.37	79.84	49.91	1.50	6.88	5752.23	97.56	523.22	538.87	4592.58	3.91	20.97	21.60	184.09
15	1	949.08	1.70	9.02	9.55	79.73	57.13	1.57	7.20	6017.56	102.42	543.02	574.56	4797.56	4.11	21.77	23.03	192.31
16	1	950.50	1.77	9.09	9.57	79.57	61.93	1.62	7.41	6191.15	109.83	562.65	592.37	4926.30	4.40	22.55	23.74	197.47
17	1	947.36	1.91	9.33	9.24	79.51	64.98	1.65	7.54	6297.13	120.40	587.65	582.11	5006.97	4.83	23.56	23.33	200.70
18	1	946.68	2.10	9.63	8.86	79.41	68.99	1.69	7.72	6436.49	134.91	619.96	570.53	5111.09	5.41	24.85	22.87	204.88
19	1	941.12	2.25	9.92	8.42	79.41	71.37	1.71	7.82	6517.25	146.77	646.77	548.49	5175.22	5.88	25.93	21.99	207.45
20	1	932.55	2.29	9.99	8.24	79.48	71.16	1.71	7.81	6508.78	148.79	650.10	536.58	5173.31	5.96	26.06	21.51	207.37

21	1	928.14	2.24	9.88	8.25	79.62	66.57	1.67	7.61	6345.02	142.38	627.14	523.34	5052.16	5.71	25.14	20.98	202.51
22	1	925.10	2.15	9.53	8.71	79.62	61.10	1.61	7.37	6153.08	132.05	586.27	535.81	4898.96	5.29	23.50	21.48	196.37
23	1	924.07	2.28	9.26	8.87	79.59	54.57	1.55	7.09	5921.82	135.25	548.12	525.38	4713.05	5.42	21.97	21.06	188.92
24	1	934.89	2.55	9.36	8.84	79.26	52.04	1.52	6.97	5826.27	148.34	545.11	514.81	4618.02	5.95	21.85	20.64	185.11
25	1	942.29	2.87	9.70	8.42	79.01	52.37	1.52	6.99	5830.82	167.11	565.82	490.72	4607.17	6.70	22.68	19.67	184.68
26	1	935.36	3.14	10.13	7.86	78.87	58.60	1.59	7.26	6049.06	189.94	612.65	475.70	4770.78	7.61	24.56	19.07	191.23
27	1	928.41	3.38	10.57	7.27	78.78	59.55	1.60	7.30	6074.33	205.31	642.18	441.48	4785.36	8.23	25.74	17.70	191.82
28	1	924.02	3.34	10.94	6.96	78.76	57.95	1.58	7.23	6006.64	200.86	657.37	417.82	4730.59	8.05	26.35	16.75	189.62
29	1	915.43	3.12	10.81	6.96	79.11	52.06	1.52	6.98	5796.55	180.97	626.72	403.21	4585.65	7.25	25.12	16.16	183.81
30	1	914.56	2.87	10.48	7.23	79.42	44.82	1.45	6.66	5540.79	159.24	580.45	400.49	4400.60	6.38	23.27	16.05	176.40
1	2	933.00	1.90	9.67	8.98	79.45	17.63	1.18	4.89	4079.35	77.34	394.55	366.33	3241.12	3.10	15.82	14.68	129.92
2	2	925.62	1.98	9.44	9.31	79.28	23.81	1.24	5.13	4284.62	84.66	404.47	398.81	3396.67	3.39	16.21	15.99	136.15
3	2	929.17	2.07	9.43	9.40	79.10	30.61	1.31	5.40	4506.78	93.47	424.90	423.46	3564.95	3.75	17.03	16.97	142.90
4	2	929.83	2.14	9.52	9.27	79.07	35.80	1.36	5.60	4674.97	100.04	445.06	433.46	3696.40	4.01	17.84	17.38	148.17
5	2	919.47	2.24	9.92	8.83	79.00	41.23	1.41	5.82	4844.82	108.62	480.80	427.89	3827.51	4.35	19.27	17.15	153.42
6	2	912.65	2.39	10.46	8.17	78.98	45.99	1.46	6.00	4990.52	119.27	522.01	407.63	3941.61	4.78	20.92	16.34	158.00
7	2	910.92	2.78	11.12	7.24	78.86	51.56	1.52	6.22	5160.19	143.35	573.81	373.80	4069.22	5.75	23.00	14.98	163.11
8	2	922.81	3.35	11.72	6.35	78.58	56.39	1.56	6.41	5306.51	177.88	621.71	337.07	4169.85	7.13	24.92	13.51	167.15
9	2	938.26	4.15	12.32	5.42	78.11	62.89	1.63	6.67	5506.51	228.64	678.40	298.23	4301.24	9.16	27.19	11.95	172.41
10	2	939.97	5.08	12.69	4.71	77.52	66.36	1.66	6.80	5613.24	285.16	712.21	264.27	4351.59	11.43	28.55	10.59	174.43
11	2	933.97	5.89	13.00	4.06	77.05	66.83	1.67	6.82	5623.67	331.13	731.08	228.32	4333.14	13.27	29.30	9.15	173.69
12	2	937.40	6.00	12.92	3.94	77.14	64.88	1.65	6.74	5564.09	333.63	719.10	219.00	4292.35	13.37	28.82	8.78	172.06
13	2	919.29	5.73	12.52	4.25	77.50	59.39	1.59	6.53	5395.55	309.27	675.74	229.20	4181.34	12.40	27.09	9.19	167.61
14	2	893.04	5.13	11.82	5.03	78.02	51.12	1.51	6.20	5141.66	263.66	607.54	258.73	4011.73	10.57	24.35	10.37	160.81
15	2	879.50	4.26	10.92	6.19	78.63	40.73	1.41	5.80	4820.07	205.24	526.35	298.27	3790.21	8.23	21.10	11.96	151.93
16	2	875.24	3.37	9.87	7.55	79.21	30.96	1.31	5.41	4518.63	152.19	446.08	341.07	3579.30	6.10	17.88	13.67	143.47
17	2	862.35	2.85	8.93	8.83	79.40	20.58	1.21	5.01	4193.29	119.43	374.38	370.18	3329.31	4.79	15.01	14.84	133.45
18	2	866.81	2.47	8.12	9.96	79.44	12.70	1.13	4.70	3945.84	97.46	320.56	393.16	3134.65	3.91	12.85	15.76	125.65
19	2	883.83	2.22	7.45	10.93	79.40	5.96	1.06	4.44	3732.88	82.87	278.02	408.08	2963.91	3.32	11.14	16.36	118.81
20	2	898.95	2.28	7.20	11.32	79.20	4.88	1.05	4.39	3699.97	84.36	266.55	418.69	2930.38	3.38	10.68	16.78	117.46
21	2	910.20	2.74	7.50	11.06	78.69	7.76	1.08	4.51	3790.19	103.93	284.42	419.35	2982.50	4.17	11.40	16.81	119.55

22	2	923.84	3.19	8.12	10.32	78.37	15.47	1.15	4.81	4035.24	128.56	327.50	416.60	3162.58	5.15	13.13	16.70	126.77
23	2	928.64	3.42	8.63	9.65	78.30	27.91	1.28	5.30	4436.02	151.53	382.92	427.99	3473.58	6.07	15.35	17.16	139.24
24	2	928.22	3.60	9.26	8.88	78.26	43.14	1.43	5.89	4924.53	177.18	455.81	437.50	3854.04	7.10	18.27	17.54	154.49
25	2	936.32	3.47	9.70	8.33	78.50	58.25	1.58	6.48	5410.47	187.85	524.82	450.80	4247.00	7.53	21.04	18.07	170.24
26	2	943.56	2.95	9.63	8.37	79.04	74.26	1.74	7.11	5935.81	175.23	571.74	496.96	4691.90	7.02	22.92	19.92	188.07
27	2	935.16	2.45	9.28	8.89	79.38	91.24	1.91	7.78	6498.83	159.22	603.09	577.88	5158.64	6.38	24.17	23.16	206.78
28	2	921.87	2.18	9.10	9.23	79.49	96.43	1.96	7.98	6672.54	145.46	606.93	616.01	5304.14	5.83	24.33	24.69	212.61
29	2	912.06	1.94	8.80	9.62	79.64	90.47	1.90	7.75	6484.21	125.53	570.35	624.04	5164.29	5.03	22.86	25.01	207.01
30	2	909.11	1.80	8.33	10.18	79.69	79.33	1.79	7.31	6129.64	110.09	510.72	624.00	4884.83	4.41	20.47	25.01	195.81

Fuente: Investigación de los autores

\*0: tiro natural, 1: Velocidad baja, 2: Velocidad alta

### Ward-CIMPA, 110 Kg/h, 60%ALP

Registro	Régimen ventilador <sup>m</sup>	Temperatura cámara	CO %Vol	CO2 %Vol	O2 %Vol	N2 %Vol	Exceso %	Lambda	Masa de gases secos por Kg de bagazo (kg)	Volumen total de gases secos (litros)	CO (L)	CO2 (L)	O2 (L)	N2 (L)	CO gmol/Kg bagazo seco	CO2 gmol/Kg bagazo seco	O2 gmol/Kg bagazo seco	N2 gmol/Kg bagazo seco
1	1	814.13	1.74	8.57	8.81	80.89	61.71	1.62	5.73	9935.70	172.48	851.69	874.88	8036.65	3.35	16.53	16.98	155.95
2	1	793.42	1.83	8.82	8.64	80.71	59.22	1.59	5.65	9756.15	178.34	860.88	842.54	7874.38	3.47	16.74	16.39	153.15
3	1	770.81	1.93	9.06	8.59	80.41	58.10	1.58	5.61	9687.63	187.36	878.09	832.36	7789.82	3.64	17.06	16.17	151.37
4	1	755.00	2.05	9.27	8.65	80.03	58.19	1.58	5.61	9696.65	198.78	898.69	838.95	7760.23	3.86	17.44	16.28	150.55
5	1	752.56	2.14	9.39	8.74	79.73	58.56	1.59	5.62	9758.08	208.63	916.09	852.86	7780.50	4.03	17.69	16.47	150.22
6	1	755.10	2.21	9.48	8.84	79.48	59.18	1.59	5.64	9858.92	217.88	934.23	871.13	7835.67	4.18	17.91	16.70	150.20
7	1	758.14	2.25	9.53	8.92	79.31	59.69	1.60	5.66	9931.40	223.06	946.66	885.48	7876.20	4.26	18.06	16.90	150.28
8	1	757.48	2.26	9.56	8.90	79.28	59.24	1.59	5.65	9909.84	224.16	947.78	881.58	7856.32	4.27	18.07	16.81	149.80
9	1	762.72	2.26	9.60	8.81	79.33	58.12	1.58	5.61	9819.86	221.73	942.31	865.33	7790.49	4.24	18.01	16.54	148.89
10	1	767.41	2.18	9.49	8.88	79.46	58.96	1.59	5.64	9856.07	214.47	935.54	874.82	7831.24	4.11	17.91	16.75	149.94
11	1	771.39	2.09	9.39	9.01	79.51	61.20	1.61	5.71	9988.45	209.16	937.72	899.76	7941.81	4.01	17.96	17.24	152.13
12	1	774.80	2.02	9.28	9.22	79.48	64.48	1.64	5.82	10190.39	205.64	946.08	939.15	8099.53	3.94	18.11	17.98	155.08
13	1	787.64	1.94	9.18	9.52	79.36	69.06	1.69	5.98	10509.35	204.30	964.76	1000.48	8339.80	3.89	18.39	19.07	158.99

14	1	792.88	1.87	9.04	9.90	79.19	74.86	1.75	6.18	10962.58	204.56	991.46	1085.30	8681.27	3.86	18.72	20.49	163.91
15	1	796.68	1.86	9.03	10.18	78.94	79.54	1.80	6.34	11312.27	210.18	1021.27	1151.14	8929.68	3.94	19.16	21.60	167.54
16	1	804.77	1.84	8.97	10.47	78.72	84.29	1.84	6.50	11635.83	213.87	1043.97	1218.50	9159.50	4.00	19.52	22.79	171.30
17	1	810.27	1.81	8.88	10.75	78.55	89.08	1.89	6.66	11978.53	217.05	1064.17	1287.99	9409.38	4.04	19.82	23.99	175.24
18	1	812.95	1.77	8.75	11.00	78.47	93.68	1.94	6.82	12313.19	218.44	1077.65	1354.94	9662.16	4.05	19.99	25.13	179.22
19	1	826.98	1.74	8.63	11.16	78.47	96.88	1.97	6.92	12538.71	218.17	1081.84	1399.82	9838.87	4.04	20.03	25.92	182.16
20	1	861.05	1.71	8.50	10.84	78.95	92.36	1.92	6.77	12241.03	209.32	1040.00	1327.42	9664.30	3.89	19.31	24.64	179.42
21	1	872.27	1.71	8.44	10.40	79.46	85.86	1.86	6.55	11809.38	201.70	996.24	1227.70	9383.73	3.76	18.56	22.88	174.86
22	1	896.01	1.72	8.42	9.89	79.97	78.18	1.78	6.29	11304.95	194.67	951.88	1117.83	9040.57	3.64	17.81	20.91	169.11
23	1	916.86	1.76	8.47	9.30	80.46	69.19	1.69	5.98	10713.13	188.98	907.19	996.75	8620.21	3.55	17.05	18.73	161.99
24	1	912.49	1.84	8.61	8.67	80.87	59.53	1.60	5.66	10047.28	185.07	865.27	871.30	8125.64	3.51	16.39	16.50	153.91
25	1	865.74	1.94	8.83	8.52	80.71	57.20	1.57	5.58	9766.15	189.07	862.55	832.08	7882.46	3.63	16.56	15.97	151.30
26	1	818.61	2.01	9.04	8.42	80.53	55.41	1.55	5.52	9448.24	190.10	854.12	795.16	7608.86	3.73	16.75	15.59	149.18
27	1	751.70	2.08	9.26	8.32	80.35	53.81	1.54	5.46	9119.43	189.50	844.46	758.37	7327.10	3.81	16.97	15.24	147.22
28	1	696.79	2.13	9.48	8.22	80.17	52.36	1.52	5.41	8897.33	189.16	843.47	731.36	7133.35	3.86	17.20	14.91	145.42
29	1	676.69	2.14	9.63	8.17	80.05	51.57	1.52	5.39	8827.46	189.26	850.26	721.38	7066.56	3.87	17.37	14.74	144.38
30	1	909.49	2.21	7.94	9.74	80.12	71.02	1.71	6.05	11229.79	247.95	891.20	1093.33	9997.30	4.50	16.18	19.85	163.35
1	2	842.08	2.49	9.41	9.16	78.93	60.66	1.61	5.70	10700.83	266.88	1007.16	980.62	8446.16	4.75	17.94	17.47	150.48
2	2	839.62	2.44	9.38	9.04	79.13	59.52	1.60	5.66	10623.88	259.44	996.52	960.82	8407.10	4.63	17.77	17.13	149.89
3	2	836.29	2.40	9.37	8.98	79.25	59.01	1.59	5.64	10577.80	253.66	991.35	949.46	8383.33	4.53	17.70	16.95	149.68
4	2	839.92	2.36	9.38	8.91	79.36	58.52	1.59	5.62	10532.35	248.14	987.51	938.64	8358.05	4.44	17.66	16.78	149.44
5	2	853.30	2.32	9.40	8.76	79.52	57.01	1.57	5.57	10433.09	241.63	981.13	913.94	8296.39	4.32	17.55	16.35	148.40
6	2	869.45	2.28	9.44	8.58	79.69	55.14	1.55	5.51	10288.39	234.99	971.64	882.74	8199.02	4.21	17.42	15.83	147.03
7	2	895.64	2.26	9.50	8.42	79.82	53.52	1.54	5.45	10111.38	228.11	960.18	851.78	8071.31	4.12	17.34	15.39	145.79
8	2	902.00	2.26	9.53	8.36	79.86	52.88	1.53	5.43	10090.16	227.63	961.39	843.13	8058.00	4.10	17.33	15.20	145.27
9	2	894.82	2.26	9.57	8.32	79.85	52.43	1.52	5.42	10067.59	227.93	963.67	837.22	8038.77	4.11	17.36	15.08	144.81
10	2	874.20	2.33	9.61	8.32	79.74	52.39	1.52	5.41	10073.53	234.71	968.27	837.72	8032.84	4.22	17.42	15.07	144.55
11	2	847.39	2.42	9.65	8.38	79.55	52.78	1.53	5.43	10134.25	245.45	977.75	849.66	8061.39	4.40	17.53	15.23	144.50
12	2	914.19	2.97	9.32	7.98	79.73	45.33	1.45	5.18	10024.49	297.93	934.68	799.55	7992.33	5.16	16.19	13.85	138.41
13	2	897.32	2.96	9.52	7.80	79.72	43.32	1.43	5.11	9853.64	291.27	938.46	768.58	7855.32	5.06	16.30	13.35	136.46
14	2	887.61	2.97	9.69	7.62	79.71	41.69	1.42	5.05	9710.86	288.41	941.18	740.36	7740.92	5.03	16.40	12.90	134.88

15	2	888.89	3.02	9.85	7.47	79.65	40.19	1.40	5.00	9568.89	289.36	942.73	714.99	7621.81	5.06	16.49	12.51	133.33
16	2	888.25	3.11	9.98	7.35	79.55	38.82	1.39	4.95	9437.69	293.51	942.26	693.86	7508.06	5.15	16.55	12.19	131.85
17	2	900.46	3.24	10.12	7.33	79.31	38.22	1.38	4.93	9368.34	303.53	948.08	686.89	7429.85	5.34	16.69	12.09	130.81
18	2	923.61	3.37	10.21	7.36	79.05	37.91	1.38	4.92	9336.24	314.63	953.42	687.52	7380.67	5.54	16.80	12.11	130.05
19	2	937.71	3.47	10.28	7.47	78.78	38.31	1.38	4.94	9344.52	324.07	960.62	698.22	7361.61	5.72	16.95	12.32	129.89
20	2	938.28	3.51	10.32	7.59	78.57	38.96	1.39	4.96	9375.31	329.45	967.53	711.77	7366.55	5.82	17.08	12.57	130.08
21	2	937.03	3.50	10.36	7.73	78.41	40.00	1.40	4.99	9457.92	330.65	980.22	730.91	7416.14	5.83	17.27	12.88	130.68
22	2	940.89	3.42	10.38	7.79	78.41	40.70	1.41	5.02	9527.23	325.64	988.55	742.36	7470.69	5.72	17.37	13.05	131.29
23	2	942.46	3.29	10.39	7.82	78.50	41.29	1.41	5.04	9596.22	316.10	996.86	750.04	7533.23	5.54	17.46	13.14	131.95
24	2	945.67	3.17	10.40	7.80	78.64	41.69	1.42	5.05	9681.23	306.70	1006.46	754.75	7613.32	5.34	17.52	13.14	132.53
25	2	953.21	3.04	10.41	7.73	78.81	41.68	1.42	5.05	9717.32	295.60	1011.77	751.34	7658.61	5.13	17.55	13.03	132.82
26	2	950.94	2.95	10.42	7.62	79.01	41.18	1.41	5.03	9657.99	285.10	1006.75	735.55	7630.59	4.96	17.51	12.79	132.71
27	2	928.15	2.92	10.45	7.46	79.18	40.10	1.40	5.00	9512.37	277.76	993.85	709.24	7531.51	4.87	17.42	12.43	132.03
28	2	890.99	2.96	10.47	7.37	79.20	39.43	1.39	4.97	9328.34	275.93	976.86	687.31	7388.23	4.91	17.38	12.23	131.47
29	2	840.62	3.03	10.50	7.30	79.17	38.64	1.39	4.95	9064.73	274.30	951.80	662.09	7176.54	5.00	17.34	12.06	130.71
30	2	788.38	3.12	10.52	7.38	78.97	39.04	1.39	4.96	8913.93	278.29	938.10	657.85	7039.69	5.17	17.42	12.21	130.71
1	0	846.66	2.10	9.60	9.48	78.82	66.15	1.66	5.88	10973.64	230.45	1053.47	1040.30	8649.42	4.13	18.87	18.64	154.96
2	0	837.07	2.08	9.57	9.61	78.74	69.42	1.69	5.99	11152.46	231.53	1067.07	1071.97	8781.89	4.16	19.17	19.25	157.74
3	0	815.37	2.04	9.52	9.61	78.83	69.59	1.70	6.00	11071.21	225.85	1053.54	1064.16	8727.65	4.09	19.08	19.28	158.10
4	0	803.08	2.00	9.47	9.61	78.92	69.83	1.70	6.01	10969.28	219.17	1039.01	1054.37	8656.74	4.01	19.03	19.31	158.53
5	0	795.93	1.95	9.44	9.58	79.03	69.68	1.70	6.00	10898.21	212.95	1028.36	1044.05	8612.86	3.92	18.94	19.23	158.66
6	0	788.82	1.92	9.42	9.46	79.20	68.39	1.68	5.96	10785.32	206.65	1016.41	1020.72	8541.54	3.82	18.79	18.86	157.86
7	0	775.25	1.88	9.44	9.39	79.29	67.61	1.68	5.93	10661.89	200.87	1006.48	1000.94	8453.60	3.74	18.73	18.63	157.35
8	0	784.07	1.86	9.46	9.32	79.36	66.92	1.67	5.91	10593.29	196.82	1002.12	987.29	8407.04	3.67	18.70	18.42	156.88
9	0	792.50	1.84	9.48	9.21	79.47	65.62	1.66	5.86	10523.97	193.64	998.09	969.05	8363.19	3.61	18.61	18.07	155.91
10	0	800.66	1.83	9.52	9.08	79.57	64.14	1.64	5.81	10397.54	190.07	989.43	944.51	8273.53	3.56	18.51	17.67	154.78
11	0	814.82	1.84	9.59	9.02	79.55	63.39	1.63	5.79	10269.01	188.54	985.00	926.26	8169.20	3.55	18.57	17.46	154.01
12	0	838.95	1.85	9.67	8.97	79.51	62.71	1.63	5.76	10173.17	188.41	983.54	912.74	8088.49	3.57	18.64	17.29	153.26
13	0	838.61	1.88	9.73	9.10	79.28	64.39	1.64	5.82	10203.90	192.04	993.04	928.96	8089.85	3.66	18.94	17.71	154.26
14	0	829.12	1.92	9.77	9.34	78.97	67.51	1.68	5.93	10281.47	196.99	1004.71	960.70	8119.07	3.79	19.35	18.50	156.36
15	0	833.71	1.95	9.76	9.67	78.62	71.85	1.72	6.07	10492.00	204.80	1023.60	1014.79	8248.81	3.96	19.79	19.62	159.48

16	0	837.39	1.97	9.67	9.94	78.43	75.29	1.75	6.19	10711.40	210.80	1035.58	1064.288	400.73	4.07	19.99	20.54	162.17
17	0	828.13	1.97	9.53	10.25	78.25	79.79	1.80	6.34	10979.58	216.08	1046.13	1125.638	591.74	4.17	20.19	21.73	165.84
18	0	834.91	1.95	9.38	10.44	78.23	82.70	1.83	6.44	11188.88	218.41	1049.07	1168.128	753.28	4.20	20.19	22.48	168.47
19	0	841.10	1.92	9.21	10.49	78.38	83.57	1.84	6.47	11317.29	217.29	1042.55	1186.968	870.49	4.16	19.95	22.71	169.70
20	0	836.51	1.88	9.08	10.52	78.51	84.41	1.84	6.50	11405.21	214.65	1036.05	1200.288	954.23	4.10	19.77	22.90	170.84
21	0	827.79	1.84	8.95	10.61	78.60	86.15	1.86	6.56	11520.39	211.98	1031.31	1222.549	1054.57	4.04	19.67	23.32	172.68
22	0	832.75	1.80	8.86	10.61	78.72	86.43	1.86	6.57	11556.21	208.47	1024.34	1225.889	1097.51	3.97	19.51	23.35	173.30
23	0	837.09	1.76	8.78	10.72	78.74	88.75	1.89	6.65	11690.78	206.23	1026.45	1253.259	1204.85	3.93	19.57	23.89	175.45
24	0	839.97	1.73	8.70	10.92	78.64	92.63	1.93	6.78	11881.19	205.78	1034.14	1297.439	1343.84	3.94	19.78	24.82	178.75
25	0	837.79	1.68	8.66	10.87	78.79	92.04	1.92	6.76	11820.14	199.05	1023.15	1284.619	1313.33	3.82	19.62	24.64	178.62
26	0	835.66	1.64	8.63	10.80	78.92	91.31	1.91	6.74	11738.94	192.99	1013.31	1267.819	1264.84	3.71	19.50	24.40	178.30
27	0	832.36	1.61	8.62	10.79	78.99	91.44	1.91	6.74	11713.60	188.12	1009.24	1263.669	1252.57	3.63	19.48	24.39	178.58
28	0	828.35	1.58	8.62	10.64	79.17	89.08	1.89	6.66	11558.44	182.16	996.34	1229.369	150.59	3.52	19.26	23.76	176.89
29	0	829.94	1.55	8.64	10.42	79.38	85.57	1.86	6.54	11352.24	175.96	981.29	1183.369	1011.64	3.40	18.97	22.88	174.22

Fuente: Investigación de los autores

\*0: tiro natural, 1: Velocidad baja, 2: Velocidad alta

### Ward-CIMPA, 90 Kg/h, 60%ALP

Registro	Regimen Ventilador*	Temperatura camara	CO %Vol	CO2 %Vol	O2 %Vol	N2 %Vol	Exceso %Vol	Lambda	Masa de gases secos por Kg de bagazo (Kg)	Volumen total de gases secos (litros)	CO (L)	CO2 (L)	O2 (L)	N2 (L)	CO gmoles/Kg bagazo seco	CO2 gmoles/Kg bagazo seco	O2 gmoles/Kg bagazo seco	N2 gmoles/Kg bagazo seco
1	0	824.23	1.74	6.83	11.50	79.93	103.61	2.04	7.20	11415.74	198.18	779.92	1312.81	9124.83	4.23	16.65	28.02	194.76
2	0	795.16	1.74	6.98	11.55	79.73	104.48	2.04	7.23	11375.21	198.16	793.53	1313.61	9069.91	4.26	17.05	28.23	194.91
3	0	748.21	1.73	7.08	11.61	79.58	105.93	2.06	7.28	11333.54	195.84	802.41	1316.05	9019.23	4.25	17.41	28.56	195.74
4	0	701.46	1.71	7.16	11.47	79.66	103.39	2.03	7.19	11111.91	189.79	795.17	1274.76	8852.19	4.15	17.39	27.88	193.57
5	0	677.35	1.68	7.20	11.58	79.53	106.03	2.06	7.28	11216.19	188.66	808.01	1298.83	8920.68	4.14	17.72	28.48	195.60

6	0	670.38	1.66	7.22	11.78	79.34	110.72	2.11	7.44	11485.86	190.21	829.28	1353.49	9112.88	4.16	18.14	29.61	199.34
7	0	695.80	1.63	7.18	11.99	79.20	115.52	2.16	7.61	11860.95	193.10	852.09	1421.89	9393.87	4.18	18.45	30.78	203.36
8	0	739.45	1.61	7.11	12.13	79.16	118.96	2.19	7.73	12254.73	197.06	871.07	1486.25	9700.35	4.19	18.54	31.63	206.43
9	0	784.56	1.59	7.02	12.42	78.98	125.47	2.25	7.95	12826.18	203.94	900.91	1593.52	10127.81	4.27	18.85	33.33	211.86
10	0	812.49	1.57	6.94	12.48	79.00	127.11	2.27	8.00	13115.21	206.43	910.72	1637.30	10360.76	4.25	18.77	33.74	213.52
11	0	834.75	1.56	6.86	12.51	79.07	127.87	2.28	8.03	13305.86	207.57	913.31	1664.30	10520.68	4.23	18.62	33.93	214.49
12	0	849.37	1.55	6.80	12.52	79.12	128.37	2.28	8.05	13424.36	208.35	912.86	1681.27	10621.89	4.22	18.49	34.06	215.17
13	0	857.31	1.54	6.74	12.56	79.15	129.48	2.29	8.08	13528.98	208.89	912.39	1699.78	10707.92	4.22	18.43	34.34	216.31
14	0	860.22	1.54	6.63	12.40	79.43	125.90	2.26	7.96	13340.61	204.91	884.22	1654.77	10596.72	4.14	17.86	33.41	213.98
15	0	857.71	1.54	6.47	12.66	79.33	133.16	2.33	8.21	13722.44	211.05	888.12	1736.71	10886.56	4.27	17.99	35.17	220.48
16	0	842.68	1.55	6.26	12.84	79.36	138.02	2.38	8.38	13937.87	215.48	872.51	1789.07	11060.82	4.39	17.77	36.43	225.21
17	0	811.17	1.56	6.09	12.83	79.53	137.67	2.38	8.36	13814.96	215.24	841.05	1772.18	10986.48	4.42	17.27	36.39	225.58
18	0	812.85	1.59	5.50	12.22	80.69	125.59	2.26	7.95	13128.01	208.47	722.57	1603.72	10593.26	4.30	14.90	33.07	218.47
19	0	820.18	1.64	5.22	11.78	81.36	117.70	2.18	7.68	12660.47	207.88	660.37	1491.91	10300.30	4.30	13.67	30.89	213.27
20	0	817.89	1.71	5.15	10.97	82.17	99.26	1.99	7.05	11595.12	198.04	597.38	1272.22	9527.48	4.12	12.42	26.44	198.02
21	0	802.23	1.76	5.32	10.30	82.62	84.23	1.84	6.54	10712.62	188.97	569.48	1103.40	8850.77	3.94	11.88	23.02	184.62
22	0	819.44	1.80	5.68	10.22	82.30	81.92	1.82	6.46	10539.28	189.71	599.05	1077.11	8673.40	3.97	12.52	22.52	181.34
23	0	811.76	1.81	6.42	10.83	80.94	93.44	1.93	6.85	11065.82	200.73	709.98	1198.65	8956.46	4.22	14.93	25.20	188.29
24	0	803.38	1.81	6.86	11.36	79.97	103.02	2.03	7.18	11559.05	208.76	793.41	1313.57	9243.31	4.39	16.68	27.61	194.30
25	0	803.76	1.78	7.12	11.92	79.18	113.71	2.14	7.55	12189.23	216.72	867.87	1453.44	9651.19	4.53	18.14	30.38	201.74
26	0	816.16	1.76	7.23	12.06	78.95	116.15	2.16	7.63	12437.93	218.41	899.01	1500.51	9819.99	4.52	18.60	31.05	203.22
27	0	814.49	1.75	7.14	11.66	79.45	108.71	2.09	7.37	12189.72	213.56	869.86	1421.32	9684.98	4.36	17.77	29.04	197.90
28	0	812.03	1.75	7.25	11.24	79.76	99.99	2.00	7.08	11832.49	207.31	857.62	1329.50	9438.07	4.19	17.32	26.86	190.65
29	0	807.32	1.75	7.45	11.07	79.73	96.59	1.97	6.96	11712.69	204.50	872.36	1296.83	9339.00	4.10	17.49	26.01	187.29
30	0	795.37	1.74	7.66	10.84	79.76	91.63	1.92	6.79	11489.61	199.69	880.10	1245.47	9164.34	3.98	17.54	24.82	182.65
1	2	860.84	1.62	8.66	10.86	78.86	92.87	1.93	6.83	12015.60	195.13	1040.55	1304.89	9475.02	3.72	19.85	24.89	180.72
2	2	861.62	1.62	8.53	10.89	78.96	93.45	1.93	6.85	12010.38	194.81	1024.25	1307.69	9483.64	3.73	19.61	25.04	181.61
3	2	847.02	1.62	8.42	11.08	78.88	97.38	1.97	6.99	12161.57	197.50	1023.52	1347.01	9593.53	3.81	19.74	25.98	185.05
4	2	827.88	1.63	8.28	11.27	78.83	101.12	2.01	7.12	12342.43	200.69	1021.46	1391.24	9729.04	3.89	19.78	26.94	188.38
5	2	824.69	1.62	8.15	11.48	78.74	104.86	2.05	7.24	12676.07	205.61	1033.35	1455.72	9981.39	3.95	19.84	27.95	191.64
6	2	803.13	1.62	8.01	11.44	78.94	104.08	2.04	7.22	12623.49	204.50	1010.89	1443.62	9964.48	3.93	19.43	27.75	191.56

7	2	787.20	1.62	7.88	11.24	79.26	100.41	2.00	7.09	12460.20	201.86	982.36	1400.03	9875.95	3.87	18.82	26.82	189.19
8	2	787.87	1.62	7.84	11.08	79.46	96.98	1.97	6.97	12404.65	201.20	973.02	1373.94	9856.49	3.81	18.42	26.01	186.60
9	2	796.73	1.62	7.85	11.03	79.50	96.00	1.96	6.94	12487.13	202.54	980.49	1377.08	9927.02	3.79	18.35	25.77	185.80
10	2	807.05	1.62	7.86	11.04	79.48	96.13	1.96	6.95	12564.02	204.04	988.03	1386.57	9985.38	3.80	18.39	25.81	185.86
11	2	823.88	1.62	7.88	11.12	79.38	97.49	1.97	6.99	12701.49	206.27	1001.39	1411.90	10081.93	3.82	18.56	26.16	186.83
12	2	838.70	1.63	7.89	11.02	79.45	95.94	1.96	6.94	12580.91	205.57	992.38	1386.92	9996.04	3.82	18.43	25.75	185.61
13	2	842.72	2.55	8.06	11.06	78.33	89.65	1.90	6.72	12110.28	308.57	975.60	1339.88	9486.22	5.76	18.22	25.02	177.15
14	2	844.38	2.48	8.01	11.44	78.07	96.30	1.96	6.95	12504.84	309.87	1001.89	1431.05	9762.03	5.79	18.73	26.75	182.46
15	2	851.23	2.40	7.91	11.55	78.15	98.51	1.99	7.03	12635.81	303.01	999.24	1459.18	9874.38	5.67	18.69	27.30	184.71
16	2	857.65	2.36	7.83	11.19	78.62	93.35	1.93	6.85	12283.36	290.38	961.54	1374.75	9656.69	5.45	18.06	25.81	181.33
17	2	849.46	2.38	7.86	10.97	78.78	89.06	1.89	6.70	12015.50	285.97	944.90	1318.34	9466.29	5.37	17.75	24.77	177.85
18	2	861.12	2.42	7.96	10.80	78.82	85.52	1.86	6.58	11854.86	286.41	943.65	1280.33	9344.48	5.35	17.64	23.93	174.68
19	2	876.52	2.46	8.06	10.59	78.89	81.48	1.81	6.44	11631.65	286.14	937.98	1231.56	9175.98	5.34	17.49	22.97	171.11
20	2	878.47	2.52	8.19	10.40	78.89	78.26	1.78	6.33	11408.85	287.05	934.61	1186.52	9000.67	5.36	17.46	22.16	168.12
21	2	860.11	2.55	8.27	10.38	78.80	77.70	1.78	6.32	11314.97	288.98	935.97	1174.04	8915.97	5.42	17.57	22.04	167.35
22	2	835.67	2.57	8.30	10.01	79.13	72.28	1.72	6.13	10884.13	279.50	902.95	1089.28	8612.40	5.30	17.11	20.64	163.19
23	2	808.97	2.59	8.37	9.74	79.29	68.10	1.68	5.99	10529.76	272.93	881.55	1026.02	8349.26	5.22	16.86	19.63	159.71
24	2	794.96	2.62	8.48	9.75	79.16	67.98	1.68	5.98	10437.00	273.03	885.06	1017.40	8261.51	5.26	17.06	19.61	159.23
25	2	799.28	2.61	8.55	10.06	78.77	72.93	1.73	6.15	10747.76	280.95	919.15	1081.65	8466.01	5.40	17.67	20.80	162.80
26	2	824.55	2.59	8.59	10.42	78.39	78.47	1.78	6.34	11183.36	289.65	960.87	1165.75	8767.09	5.51	18.29	22.19	166.89
27	2	841.60	2.54	8.57	10.62	78.27	81.53	1.82	6.45	11482.57	291.43	984.29	1219.91	8986.95	5.49	18.55	22.99	169.34
28	2	841.06	2.48	8.50	10.59	78.43	81.48	1.81	6.44	11524.57	286.04	979.59	1220.68	9038.26	5.37	18.39	22.92	169.71
29	2	834.56	2.47	8.45	10.22	78.86	76.59	1.77	6.28	11305.46	279.47	955.54	1155.42	8915.03	5.21	17.83	21.56	166.34
30	2	820.98	2.53	8.45	9.65	79.37	68.19	1.68	5.99	10800.53	272.82	912.86	1042.04	8572.82	5.09	17.03	19.44	159.91
1	1	802.65	1.90	6.90	9.86	81.34	74.49	1.74	6.21	11267.99	213.64	777.94	1110.57	9165.83	3.99	14.52	20.74	171.13
2	1	824.06	1.90	7.28	10.18	80.64	79.54	1.80	6.38	11630.81	220.75	846.72	1184.48	9378.85	4.09	15.70	21.97	173.94
3	1	839.37	1.87	7.55	10.35	80.23	82.27	1.82	6.47	11803.61	220.26	890.94	1221.91	9470.51	4.08	16.49	22.62	175.30
4	1	821.03	1.83	7.72	10.41	80.05	83.36	1.83	6.51	11704.70	214.20	903.13	1218.22	9369.14	4.02	16.94	22.85	175.72
5	1	781.79	1.80	7.80	10.26	80.14	81.36	1.81	6.44	11335.46	204.27	884.17	1162.56	9084.47	3.91	16.94	22.27	174.04
6	1	731.09	1.81	8.05	9.88	80.26	76.18	1.76	6.26	10707.61	193.59	861.75	1058.34	8593.93	3.82	16.98	20.86	169.37
7	1	690.12	1.84	8.22	9.47	80.47	69.81	1.70	6.05	10135.92	186.70	833.17	960.07	8155.97	3.75	16.74	19.29	163.84

8	1	682.67	1.90	8.40	9.19	80.51	65.46	1.65	5.90	9850.66	186.97	827.85	905.47	7930.37	3.77	16.68	18.25	159.80
9	1	706.74	1.97	8.63	8.85	80.56	60.49	1.60	5.73	9561.20	188.16	824.94	845.98	7702.12	3.79	16.62	17.05	155.19
10	1	757.12	2.06	8.86	8.59	80.49	56.82	1.57	5.60	9439.69	194.08	836.73	811.06	7597.82	3.87	16.69	16.17	151.52
11	1	823.08	2.13	9.03	8.50	80.35	55.33	1.55	5.55	9493.58	202.02	857.08	806.57	7627.90	3.97	16.83	15.84	149.77
12	1	867.01	2.19	9.16	8.42	80.24	54.03	1.54	5.51	9423.78	206.19	862.84	793.11	7561.64	4.04	16.92	15.55	148.28
13	1	879.60	2.24	9.26	8.51	79.99	54.93	1.55	5.54	9361.43	209.51	867.24	796.84	7487.83	4.16	17.20	15.81	148.54
14	1	877.11	2.26	9.31	8.73	79.70	57.41	1.57	5.62	9448.95	213.92	879.51	824.70	7530.81	4.27	17.54	16.45	150.19
15	1	869.92	2.27	9.31	8.96	79.46	60.05	1.60	5.71	9539.22	216.92	887.91	854.33	7580.06	4.35	17.82	17.14	152.10
16	1	861.25	2.26	9.28	9.16	79.30	62.53	1.63	5.80	9652.88	217.77	896.17	894.20	7654.74	4.38	18.03	17.79	154.02
17	1	853.59	2.23	9.24	9.23	79.31	63.51	1.64	5.83	9728.21	216.55	898.89	897.72	7715.05	4.35	18.05	18.03	154.94
18	1	861.03	2.20	9.20	9.05	79.55	61.48	1.61	5.76	9664.27	212.81	889.11	874.81	7687.54	4.25	17.77	17.48	153.63
19	1	884.56	2.19	9.19	8.87	79.75	59.28	1.59	5.69	9563.69	209.64	878.71	848.11	7627.23	4.18	17.52	16.91	152.07
20	1	906.50	2.09	8.69	8.93	80.29	60.81	1.61	5.74	9659.36	201.49	839.59	862.39	7755.88	4.02	16.77	17.22	154.90
21	1	929.64	2.01	8.26	8.99	80.74	62.18	1.62	5.79	9684.08	194.26	799.91	870.79	7819.12	3.91	16.10	17.53	157.39
22	1	949.12	1.94	7.89	9.11	81.06	64.10	1.64	5.85	9688.52	187.96	764.62	882.43	7853.52	3.83	15.59	17.99	160.09
23	1	950.83	1.88	7.58	9.33	81.20	67.32	1.67	5.96	9733.75	183.38	738.21	908.35	7903.81	3.80	15.28	18.80	163.61
24	1	926.51	1.83	7.34	9.61	81.21	71.21	1.71	6.09	9813.16	179.97	720.68	942.85	7969.66	3.78	15.14	19.81	167.44
25	1	888.11	1.88	7.64	9.60	80.88	70.79	1.71	6.08	9708.41	182.32	742.11	932.01	7851.97	3.86	15.70	19.71	166.08
26	1	850.39	1.92	7.96	9.63	80.49	70.87	1.71	6.08	9715.87	186.74	773.38	935.44	7820.30	3.94	16.32	19.75	165.08
27	1	822.54	1.96	8.22	9.63	80.19	70.67	1.71	6.08	9777.85	191.65	803.74	941.80	7840.66	4.01	16.82	19.70	164.04
28	1	811.13	1.99	8.42	9.55	80.04	69.40	1.69	6.03	9835.99	195.34	828.58	939.53	7872.53	4.03	17.09	19.38	162.40
29	1	827.00	2.01	8.57	9.38	80.04	66.98	1.67	5.95	9840.77	197.60	843.16	923.46	7876.55	4.02	17.14	18.77	160.09
30	1	855.20	2.08	8.74	9.29	79.89	65.28	1.65	5.89	9823.16	203.93	858.94	912.38	7847.92	4.11	17.30	18.38	158.11

Fuente: Investigación de los autores

\*0:tiro natural, 1:Velocidad baja, 2: Velocidad alta

**Plana-CIMPA, 180 Kg/h, 60%ALP**

Registro	Regimen Ventilador*	Temperatura cámara	CO %Vol	CO2 %Vol	O2% Vol	N2 % Vol	Exceso %	lambda	Masa de gases secos por Kg de bagazo (Kg)	Volumen total de gases secos (litros)	CO (L)	CO2 (L)	O2 (L)	N2 (L)	CO gmol/ Kg bagazo seco	CO2 gmol/ Kg bagazo seco	O2 gmol/ Kg bagazo seco	N2 gmol/ Kg bagazo seco
1	0	688.17	1.95	8.39	11.28	78.39	110.23	2.10	8.52	7133.32	138.96	598.20	804.64	5591.53	5.57	23.98	36.84	224.13
2	0	700.99	2.10	9.47	10.02	78.41	85.49	1.85	7.55	6295.64	132.46	596.20	630.82	4936.16	5.31	23.90	28.88	197.86
3	0	742.53	2.17	10.15	9.22	78.46	67.53	1.68	6.85	5694.35	123.68	577.86	525.25	4467.56	4.96	23.16	24.05	179.08
4	0	795.96	2.23	10.44	8.88	78.45	60.97	1.61	6.59	5474.50	122.08	571.76	486.14	4294.53	4.89	22.92	22.26	172.14
5	0	797.96	2.19	9.96	9.43	78.42	72.03	1.72	7.03	5845.38	128.01	581.97	551.34	4584.06	5.13	23.33	25.25	183.75
6	0	807.00	1.87	9.35	10.23	78.55	84.55	1.85	7.52	6267.38	117.45	585.87	641.28	4922.78	4.71	23.48	29.36	197.33
7	0	825.92	1.70	9.14	10.57	78.59	89.54	1.90	7.71	6434.54	109.39	588.12	680.26	5056.78	4.38	23.57	31.15	202.70
8	0	839.40	1.61	9.22	10.52	78.64	89.47	1.89	7.71	6429.74	103.78	593.08	676.67	5056.22	4.16	23.77	30.98	202.68
9	0	808.52	1.54	8.96	10.86	78.64	96.02	1.96	7.97	6650.69	102.42	595.64	722.26	5230.37	4.11	23.88	33.07	209.66
10	0	803.84	1.55	9.15	10.64	78.66	91.05	1.91	7.77	6483.27	100.23	593.09	690.08	5099.87	4.02	23.77	31.60	204.43
11	0	772.75	1.55	9.22	10.42	78.81	87.17	1.87	7.62	6355.53	98.51	586.23	662.25	5008.54	3.95	23.50	30.32	200.77
12	0	702.79	1.55	9.08	10.56	78.81	89.20	1.89	7.70	6425.72	99.60	583.46	678.56	5064.11	3.99	23.39	31.07	202.99
13	0	667.38	1.56	8.87	10.84	78.73	93.70	1.94	7.87	6577.98	102.35	583.34	713.32	5178.98	4.10	23.38	32.66	207.60
14	0	692.64	1.64	9.26	10.38	78.72	85.30	1.85	7.55	6293.58	102.96	583.04	653.27	4954.31	4.13	23.37	29.91	198.59
15	0	712.39	1.79	9.78	9.77	78.66	74.92	1.75	7.14	5942.67	106.49	580.96	580.72	4674.51	4.27	23.29	26.59	187.38
16	0	702.08	1.95	10.20	9.33	78.52	68.33	1.68	6.88	5718.00	111.39	583.46	533.51	4489.64	4.46	23.39	24.43	179.97
17	0	720.05	2.02	10.28	9.19	78.50	65.80	1.66	6.78	5634.21	113.92	579.42	517.81	4423.05	4.57	23.23	23.71	177.30
18	0	755.92	2.07	10.38	9.05	78.50	62.99	1.63	6.67	5540.89	114.59	575.37	501.25	4349.68	4.59	23.06	22.95	174.36
19	0	758.75	2.01	10.41	9.03	78.55	63.09	1.63	6.67	5543.25	111.64	577.16	500.36	4354.09	4.48	23.14	22.91	174.53
20	0	719.94	1.86	10.30	9.15	78.68	65.57	1.66	6.77	5626.45	104.88	579.52	515.07	4426.98	4.20	23.23	23.58	177.45
21	0	723.99	1.71	9.93	9.60	78.76	72.21	1.72	7.03	5850.52	100.04	581.07	561.65	4607.76	4.01	23.29	25.72	184.70
22	0	747.93	1.64	9.68	9.96	78.72	78.55	1.79	7.28	6062.73	99.19	586.63	604.09	4772.82	3.98	23.51	27.66	191.32
23	0	742.64	1.58	9.48	10.20	78.73	83.24	1.83	7.46	6220.25	98.53	589.68	634.71	4897.33	3.95	23.64	29.06	196.31
24	0	701.83	1.55	8.98	10.76	78.71	93.14	1.93	7.85	6556.64	101.89	588.52	705.49	5160.73	4.08	23.59	32.30	206.87
25	0	683.26	1.55	8.88	10.92	78.65	95.52	1.96	7.95	6636.32	102.60	589.57	724.95	5219.20	4.11	23.63	33.19	209.21

26	0	685.77	1.55	9.21	10.60	78.64	91.15	1.91	7.77	6484.63	100.25	597.11	687.63	5099.65	4.02	23.93	31.49	204.42
27	0	651.19	1.55	9.59	10.12	78.74	83.77	1.84	7.49	6234.75	96.51	598.04	631.21	4908.99	3.87	23.97	28.90	196.77
28	0	644.48	1.56	9.96	9.70	78.78	76.66	1.77	7.21	5993.90	93.38	597.23	581.17	4722.11	3.74	23.94	26.61	189.28
29	0	682.94	1.56	10.40	9.20	78.85	67.71	1.68	6.86	5693.03	88.81	591.85	523.53	4488.84	3.56	23.72	23.97	179.93
30	0	711.99	1.56	10.28	9.30	78.86	69.45	1.69	6.92	5752.21	89.62	591.33	535.19	4536.08	3.59	23.70	24.51	181.83
1	2	855.56	4.78	12.29	6.13	76.81	74.69	1.75	7.42	6127.34	292.76	752.93	375.48	4706.17	11.74	30.18	17.19	188.64
2	2	909.06	4.67	12.62	5.66	77.05	58.93	1.59	6.78	5589.97	260.84	705.45	316.39	4307.28	10.46	28.28	14.49	172.66
3	2	936.90	4.15	12.61	5.46	77.78	45.34	1.45	6.23	5134.55	212.99	647.57	280.35	3993.64	8.54	25.96	12.84	160.08
4	2	960.29	3.82	12.53	5.62	78.04	33.10	1.33	5.73	4723.71	180.27	591.79	265.47	3686.18	7.23	23.72	12.16	147.76
5	2	964.82	3.51	12.42	5.79	78.28	22.26	1.22	5.28	4360.00	152.96	541.69	252.36	3413.00	6.13	21.71	11.56	136.81
6	2	959.06	3.34	12.26	5.99	78.41	18.95	1.19	5.15	4251.24	141.83	521.37	254.56	3333.47	5.69	20.90	11.66	133.62
7	2	938.66	3.05	11.44	6.96	78.55	19.37	1.19	5.17	4278.27	130.57	489.60	297.60	3360.49	5.23	19.63	13.63	134.70
8	2	935.35	2.91	10.04	8.20	78.85	21.77	1.22	5.26	4385.09	127.69	440.09	359.58	3457.73	5.12	17.64	16.46	138.60
9	2	926.35	2.51	9.53	8.90	79.05	24.08	1.24	5.36	4471.51	112.41	426.22	397.96	3534.91	4.51	17.09	18.22	141.70
10	2	909.89	2.10	8.84	9.82	79.24	26.16	1.26	5.44	4553.63	95.54	402.72	447.17	3608.20	3.83	16.14	20.48	144.63
11	2	877.13	1.72	8.12	10.79	79.36	37.73	1.38	5.91	4961.08	85.53	403.04	535.20	3937.31	3.43	16.16	24.51	157.83
12	2	865.05	1.73	8.16	10.88	79.23	52.91	1.53	6.53	5478.95	94.79	447.08	596.33	4340.75	3.80	17.92	27.31	174.00
13	2	872.01	1.84	9.08	10.60	78.48	63.05	1.63	6.95	5799.74	106.95	526.38	615.00	4551.40	4.29	21.10	28.16	182.44
14	2	883.38	1.91	9.20	10.40	78.48	76.66	1.77	7.50	6260.70	119.58	576.24	651.36	4913.53	4.79	23.10	29.83	196.96
15	2	880.10	1.97	9.38	10.14	78.51	90.87	1.91	8.08	6740.48	132.79	631.99	683.48	5292.22	5.32	25.33	31.30	212.14
16	2	875.71	2.02	9.38	10.11	78.49	92.36	1.92	8.14	6791.15	136.91	637.28	686.45	5330.51	5.49	25.55	31.43	213.67
17	2	886.90	1.96	9.63	9.84	78.57	86.91	1.87	7.92	6599.51	129.22	635.40	649.66	5185.23	5.18	25.47	29.75	207.85
18	2	896.91	1.80	9.69	9.78	78.74	83.59	1.84	7.79	6485.19	116.47	628.29	633.99	5106.44	4.67	25.18	29.03	204.69
19	2	896.15	1.72	9.49	10.09	78.70	78.82	1.79	7.59	6327.24	109.08	600.33	638.29	4979.54	4.37	24.06	29.23	199.60
20	2	896.08	1.66	9.12	10.58	78.64	77.80	1.78	7.55	6300.75	104.72	574.63	666.37	4955.04	4.20	23.03	30.51	198.62
21	2	900.22	1.62	8.77	11.01	78.60	74.25	1.74	7.41	6187.93	100.12	542.81	681.17	4863.84	4.01	21.76	31.19	194.96
22	2	890.98	1.58	8.04	11.81	78.57	74.43	1.74	7.41	6211.84	97.90	499.43	733.74	4880.77	3.92	20.02	33.60	195.64
23	2	886.01	1.55	7.37	12.60	78.49	79.65	1.80	7.63	6406.63	99.05	472.04	806.98	5028.56	3.97	18.92	36.95	201.57
24	2	881.98	1.53	6.92	13.12	78.43	89.06	1.89	8.01	6740.79	103.40	466.73	884.12	5286.53	4.14	18.71	40.48	211.91
25	2	892.94	1.53	6.73	13.34	78.40	99.50	1.99	8.44	7104.26	108.84	478.26	947.42	5569.74	4.36	19.17	43.38	223.26
26	2	905.06	1.58	6.83	13.23	78.36	116.40	2.16	9.13	7682.25	121.53	524.85	1016.21	6019.66	4.87	21.04	46.53	241.30

27	2	912.53	1.66	7.24	12.76	78.34	133.15	2.33	9.81	8244.87	137.03	596.60	1052.38	6458.87	5.49	23.91	48.19	258.90
28	2	922.11	1.71	7.58	12.32	78.39	145.17	2.45	10.30	8646.11	147.68	655.37	1065.55	6777.51	5.92	26.27	48.79	271.67
29	2	918.11	1.75	7.84	11.98	78.44	150.94	2.51	10.53	8835.60	154.27	692.71	1058.15	6930.47	6.18	27.77	48.45	277.81
30	2	903.51	1.77	8.03	11.76	78.44	147.35	2.47	10.39	8706.41	154.28	698.95	1023.53	6829.66	6.18	28.02	46.87	273.76
1	1	875.33	2.00	10.96	8.45	78.59	106.24	2.06	8.45	7002.22	140.18	767.16	591.97	5502.90	5.62	30.75	27.11	220.58
2		864.05	2.07	11.05	8.30	78.58	109.17	2.09	8.57	7096.28	146.75	784.00	589.13	5576.40	5.88	31.43	26.98	223.53
3		867.59	2.08	10.92	8.42	78.57	103.45	2.03	8.34	6911.96	143.77	755.06	582.13	5431.00	5.76	30.27	26.65	217.70
4		857.84	1.89	10.44	9.12	78.55	98.67	1.99	8.15	6766.20	127.88	706.66	617.08	5314.58	5.13	28.33	28.26	213.03
5		833.25	1.75	9.66	10.08	78.51	88.73	1.89	7.76	6458.06	113.02	624.11	650.97	5069.97	4.53	25.02	29.81	203.23
6		822.68	1.63	8.97	10.97	78.43	88.26	1.88	7.74	6458.97	105.28	579.50	708.68	5065.52	4.22	23.23	32.45	203.05
7		828.30	1.66	8.84	11.18	78.33	79.70	1.80	7.40	6178.95	102.32	545.97	690.81	4839.85	4.10	21.89	31.63	194.00
8		837.77	1.69	9.03	10.93	78.35	68.49	1.68	6.96	5804.34	98.33	524.02	634.53	4547.47	3.94	21.00	29.05	182.28
9		849.12	1.71	9.08	10.85	78.36	57.16	1.57	6.51	5428.98	92.62	492.95	589.15	4254.26	3.71	19.76	26.98	170.53
10		848.61	1.71	8.94	11.00	78.36	54.71	1.55	6.41	5351.24	91.51	478.19	588.42	4193.12	3.67	19.17	26.94	168.08
11		836.73	1.79	9.36	10.44	78.41	56.60	1.57	6.48	5405.59	96.87	505.96	564.13	4238.63	3.88	20.28	25.83	169.90
12		841.06	1.86	9.80	9.89	78.46	68.27	1.68	6.95	5781.31	107.42	566.34	571.66	4535.90	4.31	22.70	26.18	181.82
13		836.08	1.89	10.16	9.46	78.49	82.68	1.83	7.52	6247.65	118.33	634.51	591.03	4903.78	4.74	25.43	27.06	196.57
14		811.42	1.91	10.28	9.32	78.49	96.81	1.97	8.08	6709.02	128.14	689.96	625.28	5265.64	5.14	27.66	28.63	211.07
15		803.34	1.92	11.05	8.45	78.58	99.40	1.99	8.18	6774.47	130.21	748.44	572.31	5323.52	5.22	30.00	26.21	213.39
16		822.16	1.85	11.08	8.44	78.63	95.24	1.95	8.01	6637.15	122.65	735.13	560.44	5218.93	4.92	29.47	25.66	209.20
17		827.96	1.69	10.53	9.12	78.66	93.55	1.94	7.95	6595.01	111.19	694.32	601.73	5187.76	4.46	27.83	27.55	207.95
18		823.78	1.59	9.70	10.09	78.62	96.80	1.97	8.08	6722.71	106.89	652.37	678.19	5285.26	4.28	26.15	31.05	211.86
19		824.28	1.56	9.53	10.15	78.76	86.65	1.87	7.67	6393.84	99.49	609.20	649.10	5036.04	3.99	24.42	29.72	201.87
20		824.37	1.53	9.20	10.54	78.73	79.93	1.80	7.41	6179.78	94.67	568.54	651.10	4865.46	3.79	22.79	29.81	195.03
21		807.87	1.52	8.75	11.06	78.67	74.69	1.75	7.20	6017.09	91.46	526.38	665.73	4733.52	3.67	21.10	30.48	189.74
22		784.16	1.52	8.57	11.23	78.68	72.09	1.72	7.10	5935.14	90.10	508.76	666.63	4669.65	3.61	20.39	30.52	187.18
23		798.67	1.70	9.55	10.06	78.68	57.42	1.57	6.52	5429.70	92.30	518.65	546.45	4272.31	3.70	20.79	25.02	171.25
24		820.77	1.81	10.18	9.44	78.57	57.85	1.58	6.53	5430.10	98.07	553.00	512.60	4266.43	3.93	22.17	23.47	171.02
25		816.17	1.84	10.00	9.62	78.54	67.37	1.67	6.91	5747.39	105.52	574.74	552.90	4514.23	4.23	23.04	25.32	180.95
26		809.91	1.86	10.24	9.21	78.70	82.82	1.83	7.52	6251.51	116.03	640.15	575.56	4919.76	4.65	25.66	26.35	197.21
27		826.78	1.87	10.91	8.47	78.75	84.20	1.84	7.58	6280.77	117.32	685.11	532.03	4946.31	4.70	27.46	24.36	198.27

28	822.17	1.69	10.41	9.10	78.80	89.45	1.89	7.78	6464.51	109.12	672.83	588.45	5094.11	4.37	26.97	26.94	204.20
29	816.77	1.58	9.81	9.81	78.80	98.42	1.98	8.14	6774.68	106.90	664.73	664.92	5338.12	4.29	26.65	30.45	213.98
30	825.11	1.55	9.56	10.09	78.80	101.49	2.01	8.26	6882.36	106.68	657.95	694.76	5422.97	4.28	26.37	31.81	217.38

Fuente: Investigación de los autores

\*0:tiro natural, 1:Velocidad baja, 2: Velocidad alta

### Plana-CIMPA, 220 Kg/h, 60%ALP

Registro	Regimen ventilador*	Temperatura cámara	CO %Vol	CO2 %Vol	O2 %Vol	N2 %Vol	Exceso lambda %	Masa de gases secos por Kg de bagazo (Kg)	Volumen total de gases secos (litros)	CO (L)	CO2 (L)	O2 (L)	N2 (L)	CO g/mol/Kg bagazo seco	CO2 g/mol/Kg bagazo seco	O2 g/mol/Kg bagazo seco	N2 g/mol/Kg bagazo seco
1	0	793.61	1.82	10.58	8.66	78.94	59.35	6.06	5032.92	91.70	532.68	435.65	3972.88	3.68	21.35	17.46	159.25
2	0	788.99	1.84	10.18	9.10	78.88	64.84	6.26	5207.05	95.71	530.08	473.84	4107.42	3.84	21.25	18.99	164.64
3	0	788.70	1.86	9.81	9.50	78.83	71.16	6.49	5405.97	100.55	530.43	513.35	4261.63	4.03	21.26	20.58	170.83
4	0	759.13	1.89	9.34	10.01	78.76	79.75	6.81	5676.77	107.06	530.21	568.36	4471.14	4.29	21.25	22.78	179.22
5	0	744.52	1.85	8.58	10.15	79.43	81.74	6.88	5759.46	106.32	493.93	584.47	4574.74	4.26	19.80	23.43	183.38
6	0	728.84	1.74	8.44	10.36	79.46	84.96	6.99	5860.56	102.09	494.40	607.39	4656.68	4.09	19.82	24.35	186.66
7	0	700.05	1.69	8.38	10.48	79.45	87.30	7.08	5932.83	100.15	496.93	622.00	4713.75	4.01	19.92	24.93	188.95
8	0	708.23	1.65	8.62	10.24	79.48	83.40	6.94	5807.98	95.95	500.88	594.97	4616.18	3.85	20.08	23.85	185.04
9	0	713.77	1.62	9.21	9.60	79.56	73.16	6.57	5483.48	89.05	505.14	526.41	4362.88	3.57	20.25	21.10	174.88
10	0	728.37	1.62	10.14	9.29	78.94	69.47	6.43	5346.80	86.73	542.38	496.82	4220.87	3.48	21.74	19.92	169.19
11	0	734.03	1.63	10.32	9.11	78.94	67.12	6.35	5272.00	86.14	543.86	480.17	4161.82	3.45	21.80	19.25	166.82
12	0	735.41	1.64	10.60	8.76	79.00	61.95	6.16	5110.39	84.01	541.70	447.67	4037.01	3.37	21.71	17.94	161.82
13	0	719.38	1.65	10.65	8.68	79.01	60.74	6.11	5072.88	83.70	540.36	440.53	4008.29	3.36	21.66	17.66	160.67
14	0	709.26	1.65	10.69	8.66	79.00	60.44	6.10	5062.75	83.64	541.31	438.43	3999.37	3.35	21.70	17.57	160.31
15	0	686.12	1.65	10.63	8.72	78.99	61.13	6.13	5084.77	84.10	540.61	443.60	4016.46	3.37	21.67	17.78	161.00
16	0	649.71	1.66	10.58	8.79	78.97	61.82	6.15	5106.74	84.98	540.29	448.78	4032.69	3.41	21.66	17.99	161.65
17	0	660.30	1.69	10.70	8.66	78.95	60.13	6.09	5053.37	85.40	540.71	437.62	3989.64	3.42	21.67	17.54	159.92
18	0	694.25	1.86	11.12	8.14	78.89	52.95	5.83	4829.13	89.73	537.00	392.90	3809.51	3.60	21.53	15.75	152.70
19	0	695.27	2.01	11.36	7.61	79.02	47.01	5.61	4647.12	93.50	528.10	353.55	3671.97	3.75	21.17	14.17	147.19
20	0	680.67	2.05	11.40	7.55	79.00	46.13	5.58	4620.06	94.90	526.69	348.72	3649.75	3.80	21.11	13.98	146.30

21	0	718.41	2.08	11.34	7.60	78.98	46.60	1.47	5.60	4635.67	96.42	525.50	352.31	3661.44	3.87	21.06	14.12	146.77
22	0	740.33	2.07	11.05	7.92	78.96	50.84	1.51	5.75	4768.53	98.80	526.83	377.86	3765.04	3.96	21.12	15.15	150.92
23	0	716.20	1.91	10.74	8.34	79.01	56.43	1.56	5.96	4942.76	94.51	530.65	412.23	3905.37	3.79	21.27	16.52	156.55
24	0	726.76	1.74	10.30	9.07	78.88	65.18	1.65	6.27	5213.84	90.72	537.23	473.00	4112.89	3.64	21.53	18.96	164.86
25	0	758.13	1.66	10.00	9.46	78.88	70.54	1.71	6.47	5381.98	89.13	538.20	509.13	4245.52	3.57	21.57	20.41	170.18
26	0	739.61	1.60	9.99	9.49	78.92	71.22	1.71	6.49	5402.83	86.66	539.64	512.62	4263.92	3.47	21.63	20.55	170.92
27	0	684.22	1.59	10.30	9.14	78.97	66.90	1.67	6.34	5265.64	83.62	542.15	481.49	4158.38	3.35	21.73	19.30	166.69
28	0	669.07	1.58	26.09	9.14	63.20	66.84	1.67	6.34	4855.52	76.72	1266.71	443.60	3068.49	3.08	50.78	17.78	123.00
29	0	666.04	1.65	26.31	8.86	63.17	62.92	1.63	6.19	4742.60	78.44	1247.68	420.38	2996.09	3.14	50.01	16.85	120.10
30	0	676.50	1.86	26.67	8.40	63.07	56.20	1.56	5.95	4549.64	84.44	1213.48	382.17	2869.55	3.38	48.64	15.32	115.02
1	1	851.68	1.86	26.78	8.40	55.85	55.85	1.56	6.51	5300.62	98.49	1419.29	445.46	2960.28	3.95	56.89	17.86	118.66
2	1	872.58	1.93	26.78	8.44	55.86	55.86	1.56	6.51	5294.76	102.08	1417.94	446.88	2957.59	4.09	56.84	17.91	118.55
3	1	889.83	2.13	26.97	8.19	52.10	52.10	1.52	6.36	5345.66	113.97	1441.62	437.92	2785.15	4.57	57.79	17.55	111.64
4	1	883.72	2.24	11.27	8.00	49.25	49.25	1.49	6.25	7101.15	159.07	800.16	568.38	3497.54	6.38	32.07	22.78	140.20
5	1	867.94	2.23	11.01	8.26	52.58	52.58	1.53	6.38	6967.15	155.23	766.94	575.77	3663.47	6.22	30.74	23.08	146.85
6	1	863.27	2.19	10.58	8.80	60.25	60.25	1.60	6.69	6681.31	146.05	706.88	588.22	4025.28	5.85	28.34	23.58	161.35
7	1	874.56	2.16	10.18	9.26	66.39	66.39	1.66	6.93	6488.06	140.40	660.74	600.79	4307.50	5.63	26.49	24.08	172.66
8	1	869.67	2.25	9.96	9.54	68.88	68.88	1.69	7.03	6410.00	144.23	638.18	611.77	4414.90	5.78	25.58	24.52	176.97
9	1	859.14	2.36	9.89	9.56	68.50	68.50	1.69	7.02	6419.19	151.49	634.73	613.93	4397.38	6.07	25.44	24.61	176.27
10	1	855.74	2.43	9.81	9.66	69.34	69.34	1.69	7.05	6391.77	155.06	626.90	617.19	4432.19	6.22	25.13	24.74	177.66
11	1	833.98	2.51	9.99	9.44	65.38	65.38	1.65	6.89	6502.17	163.20	649.70	613.80	4251.40	6.54	26.04	24.60	170.42
12	1	789.19	2.67	10.29	9.07	59.47	59.47	1.59	6.65	6683.98	178.19	687.65	606.37	3975.06	7.14	27.56	24.31	159.34
13	1	775.47	2.62	10.52	8.80	56.91	56.91	1.57	6.55	6776.87	177.55	712.66	596.36	3856.84	7.12	28.57	23.91	154.60
14	1	774.62	2.57	10.74	8.63	55.47	55.47	1.55	6.49	6823.21	175.08	733.09	588.71	3784.56	7.02	29.39	23.60	151.70
15	1	789.41	2.58	11.22	8.08	48.88	48.88	1.49	6.23	7085.61	183.09	795.01	572.52	3463.78	7.34	31.87	22.95	138.84
16	1	817.80	2.87	11.64	7.54	41.50	41.50	1.42	5.94	7419.66	212.94	863.35	559.15	3079.41	8.54	34.61	22.41	123.44
17	1	841.07	3.05	11.90	7.16	37.06	37.06	1.37	5.76	7659.13	233.30	911.13	548.09	2838.81	9.35	36.52	21.97	113.79
18	1	839.55	2.95	11.69	7.36	39.62	39.62	1.40	5.86	7529.32	221.96	880.03	553.86	2983.41	8.90	35.28	22.20	119.59
19	1	839.58	2.88	11.21	7.87	46.01	46.01	1.46	6.12	7216.07	207.97	808.78	568.05	3320.24	8.34	32.42	22.77	133.09
20	1	845.09	2.84	10.73	8.45	53.20	53.20	1.53	6.40	6909.49	196.09	741.25	583.71	3675.89	7.86	29.71	23.40	147.35
21	1	842.60	2.54	10.32	8.86	58.94	58.94	1.59	6.63	6727.77	170.89	694.04	596.08	3965.02	6.85	27.82	23.89	158.94

22	1	830.18	2.25	10.22	9.06	62.09	62.09	1.62	6.76	6633.13	149.51	677.64	601.23	4118.35	5.99	27.16	24.10	165.08
23	1	843.61	2.19	10.46	8.86	60.32	60.32	1.60	6.69	6687.99	146.33	699.30	592.82	4034.34	5.87	28.03	23.76	161.71
24	1	859.35	2.25	10.97	8.32	53.65	53.65	1.54	6.42	6921.38	155.73	759.14	575.58	3713.51	6.24	30.43	23.07	148.85
25	1	862.95	2.60	11.49	7.65	44.34	44.34	1.44	6.05	7307.99	189.86	839.83	559.21	3240.08	7.61	33.66	22.42	129.88
26	1	861.01	2.70	11.95	7.20	39.12	39.12	1.39	5.84	7558.70	204.24	903.42	544.53	2957.28	8.19	36.21	21.83	118.54
27	1	869.68	2.77	12.01	6.92	36.18	36.18	1.36	5.72	7757.93	214.74	931.57	536.54	2807.15	8.61	37.34	21.51	112.52
28	1	874.83	2.94	12.07	6.80	34.27	34.27	1.34	5.65	7867.42	231.30	949.76	534.67	2696.05	9.27	38.07	21.43	108.07
29	1	870.75	3.05	12.16	6.69	32.86	32.86	1.33	5.59	7948.49	242.59	966.38	531.91	2611.60	9.72	38.74	21.32	104.68
30	1	859.44	2.79	12.07	6.73	34.32	34.32	1.34	5.65	7890.59	220.46	952.71	531.19	2708.04	8.84	38.19	21.29	108.55
1	2	798.98	1.70	9.08	10.73	89.98	89.98	1.90	7.14	5379.95	91.35	488.71	577.38	4840.94	3.66	19.59	23.14	194.05
2	2	803.76	1.67	9.26	10.53	86.68	86.68	1.87	7.02	5441.00	90.76	503.84	573.05	4716.26	3.64	20.20	22.97	189.05
3	2	806.66	1.63	9.34	10.40	84.85	84.85	1.85	6.96	5479.59	89.10	512.01	570.10	4649.42	3.57	20.52	22.85	186.37
4	2	803.40	1.59	9.19	10.61	88.70	88.70	1.89	7.10	5406.78	86.18	496.99	573.77	4796.05	3.45	19.92	23.00	192.25
5	2	804.55	1.59	9.18	10.59	88.43	88.43	1.88	7.08	5413.90	85.97	497.21	573.44	4787.33	3.45	19.93	22.99	191.90
6	2	800.52	1.58	8.91	10.85	93.41	93.41	1.93	7.27	5330.48	84.43	474.84	578.25	4979.30	3.38	19.03	23.18	199.59
7	2	788.09	1.59	8.44	11.29	102.34	102.34	2.02	7.59	5195.19	82.40	438.68	586.43	5316.67	3.30	17.58	23.51	213.12
8	2	772.97	1.59	7.95	11.80	112.90	112.90	2.13	7.97	5054.08	80.56	401.70	596.18	5706.15	3.23	16.10	23.90	228.73
9	2	766.61	1.60	7.53	12.18	121.63	121.63	2.22	8.29	4954.08	79.36	373.14	603.21	6025.67	3.18	14.96	24.18	241.54
10	2	762.52	1.59	6.97	12.78	135.13	135.13	2.35	8.78	4816.31	76.68	335.79	615.52	6508.43	3.07	13.46	24.67	260.89
11	2	762.01	1.59	6.67	13.10	143.72	143.72	2.44	9.09	4739.46	75.17	316.03	621.06	6811.67	3.01	12.67	24.89	273.04
12	2	757.21	1.57	7.02	12.75	136.40	136.40	2.36	8.82	4803.45	75.51	337.01	612.54	6552.04	3.03	13.51	24.55	262.64
13	2	760.73	1.56	7.33	12.44	129.41	129.41	2.29	8.57	4870.24	75.78	356.89	605.86	6302.78	3.04	14.31	24.29	252.64
14	2	755.56	1.54	7.53	12.23	124.21	124.21	2.24	8.38	4924.61	76.04	370.92	602.18	6116.84	3.05	14.87	24.14	245.19
15	2	752.08	1.54	7.66	12.08	120.27	120.27	2.20	8.24	4968.71	76.42	380.80	600.42	5975.94	3.06	15.26	24.07	239.54
16	2	754.92	1.53	8.02	11.70	110.45	110.45	2.10	7.88	5088.67	77.96	408.31	595.17	5620.44	3.12	16.37	23.86	225.29
17	2	759.42	1.53	7.82	11.92	114.91	114.91	2.15	8.04	5032.41	77.10	398.74	599.86	5782.56	3.09	15.78	24.05	231.79
18	2	763.79	1.53	7.51	12.24	122.22	122.22	2.22	8.31	4948.34	75.81	371.72	605.48	6047.91	3.04	14.90	24.27	242.43
19	2	751.44	1.54	8.18	11.50	110.22	110.22	2.10	7.87	5090.60	78.29	416.41	585.62	5610.90	3.14	16.69	23.47	224.91
20	2	738.19	1.54	8.62	11.06	101.00	101.00	2.01	7.54	5216.98	80.13	449.91	576.79	5269.15	3.21	18.03	23.12	211.21
21	2	744.15	1.54	8.67	11.10	101.84	101.84	2.02	7.57	5199.17	79.86	450.87	576.90	5294.94	3.20	18.07	23.12	212.25
22	2	762.97	1.54	8.50	11.26	105.79	105.79	2.06	7.71	5143.71	79.11	437.42	579.18	5441.55	3.17	17.53	23.22	218.12

23	2	783.69	1.54	8.45	11.32	107.58	107.58	2.08	7.78	5118.87	78.83	432.44	579.66	5506.71	3.16	17.33	23.24	220.73
24	2	815.61	1.54	7.57	12.26	124.64	124.64	2.25	8.40	4916.71	75.72	372.29	602.79	6128.19	3.04	14.92	24.16	245.65
25	2	825.30	1.70	7.96	11.66	116.04	116.04	2.16	8.08	5015.17	85.36	399.01	584.97	5819.56	3.42	15.99	23.45	233.27
26	2	822.43	1.94	8.89	10.46	99.05	99.05	1.99	7.47	5241.57	101.79	465.87	548.48	5192.01	4.08	18.67	21.99	208.12
27	2	805.29	2.08	10.02	9.19	78.82	78.82	1.79	6.74	5600.49	116.27	560.95	514.57	4414.40	4.66	22.49	20.63	176.95
28	2	783.64	2.14	10.95	8.18	59.92	59.92	1.60	6.05	6083.71	130.07	666.04	497.66	3645.10	5.21	26.70	19.95	146.11
29	2	778.62	2.21	11.30	7.84	51.18	51.18	1.51	5.74	6377.68	140.82	720.93	499.75	3263.88	5.64	28.90	20.03	130.83
30	2	782.07	2.11	10.90	8.38	58.48	58.48	1.58	6.00	6121.83	129.29	667.04	513.25	3580.35	5.18	26.74	20.57	143.52

Fuente: Investigación de los autores

\*0: tiro natural, 1: Velocidad baja, 2: Velocidad alta

### Plana-CIMPA, 180 Kg/h, 40%ALP

Registro	Regimen Ventilador*	Temperatura cámara	CO %Vol	CO2 %Vol	O2 %Vol	N2 %Vol	Exceso %	Lambda	Masa de gases secos por Kg de bagazo (kg)	Volumen total de gases secos (litros)	CO (L)	CO2 (L)	O2 (L)	N2 (L)	CO gmoles/Kg bagazo seco	CO2 gmoles/Kg bagazo seco	O2 gmoles/Kg bagazo seco	N2 gmoles/Kg bagazo seco
1	0	805.02	1.57	7.60	10.96	79.88	94.85	1.95	8.21	6231.50	97.71	473.34	682.85	4977.59	3.92	18.97	27.37	227.92
2	0	806.07	1.60	8.07	10.46	79.87	85.84	1.86	7.84	5943.65	95.34	479.53	621.47	4747.32	3.82	19.22	24.91	217.37
3	0	788.84	1.63	8.01	10.50	79.86	86.39	1.86	7.86	5961.87	96.94	477.67	626.00	4761.27	3.89	19.15	25.09	218.01
4	0	779.94	1.64	7.96	10.54	79.85	86.91	1.87	7.88	5978.96	98.29	476.16	630.18	4774.32	3.94	19.09	25.26	218.61
5	0	771.33	1.66	8.00	10.52	79.83	86.39	1.86	7.86	5962.45	98.86	476.76	627.01	4759.82	3.96	19.11	25.13	217.95
6	0	734.71	1.64	7.95	10.58	79.83	87.61	1.88	7.91	6000.99	98.42	476.96	634.90	4790.71	3.94	19.12	25.45	219.36
7	0	701.46	1.60	7.56	11.02	79.83	95.72	1.96	8.24	6259.42	99.95	472.96	689.79	4996.72	4.01	18.96	27.65	228.79
8	0	699.43	1.56	7.12	11.50	79.82	105.36	2.05	8.63	6566.88	102.63	467.30	755.45	5241.50	4.11	18.73	30.28	240.00
9	0	733.10	1.54	6.83	11.82	79.81	112.11	2.12	8.91	6782.34	104.37	463.37	801.40	5413.20	4.18	18.57	32.12	247.86
10	0	767.93	1.52	6.96	11.68	79.84	109.28	2.09	8.79	6691.63	102.03	466.01	781.32	5342.28	4.09	18.68	31.32	244.62
11	0	756.49	1.54	7.08	11.59	79.79	107.35	2.07	8.71	6629.37	102.28	469.09	768.48	5289.52	4.10	18.80	30.80	242.20
12	0	753.02	1.56	7.30	11.40	79.74	103.31	2.03	8.55	6499.26	101.39	474.19	740.92	5182.77	4.06	19.01	29.70	237.31
13	0	777.01	1.59	7.73	10.98	79.70	95.04	1.95	8.21	6234.28	99.25	481.78	684.52	4968.72	3.98	19.31	27.44	227.51
14	0	800.04	1.88	8.36	10.26	79.50	80.45	1.80	7.62	5773.56	108.77	482.44	592.37	4589.98	4.36	19.34	23.74	210.17
15	0	795.08	2.04	8.81	9.73	79.42	71.40	1.71	7.25	5486.88	112.15	483.50	553.76	4357.46	4.50	19.38	21.40	199.52

16	0	809.07	2.16	8.93	9.55	79.37	68.14	1.68	7.12	5385.36	116.11	480.81	514.19	4274.26	4.65	19.27	20.61	195.71
17	0	842.02	2.24	9.22	9.18	79.36	62.80	1.63	6.90	5216.34	117.05	480.74	479.07	4139.48	4.69	19.27	19.20	189.54
18	0	848.60	2.34	9.46	8.87	79.33	58.37	1.58	6.72	5076.61	118.69	480.04	450.40	4027.48	4.76	19.24	18.05	184.41
19	0	810.32	2.09	9.23	9.21	79.47	64.06	1.64	6.96	5253.98	110.02	484.84	483.79	4175.34	4.41	19.43	19.39	191.18
20	0	799.98	2.00	9.16	9.36	79.49	66.63	1.67	7.06	5333.32	106.56	488.53	498.99	4239.24	4.27	19.58	20.00	194.11
21	0	814.06	1.91	9.25	9.30	79.54	66.53	1.67	7.06	5328.18	101.66	492.75	495.73	4238.04	4.08	19.75	19.87	194.05
22	0	805.01	1.83	9.12	9.49	79.56	69.52	1.70	7.18	5421.84	99.44	494.26	514.42	4313.73	3.99	19.81	20.62	197.52
23	0	783.36	1.73	8.75	9.96	79.56	77.04	1.77	7.48	5659.54	97.91	495.10	563.69	4502.85	3.92	19.85	22.60	206.18
24	0	781.00	1.72	8.72	10.00	79.56	77.71	1.78	7.51	5680.49	97.82	495.11	568.05	4519.52	3.92	19.85	22.77	206.94
25	0	768.12	1.68	8.55	10.19	79.58	80.94	1.81	7.64	5782.88	97.04	494.55	589.16	4602.13	3.89	19.82	23.62	210.73
26	0	747.33	1.66	8.32	10.46	79.55	85.51	1.86	7.83	5928.36	98.41	493.48	620.34	4716.13	3.94	19.78	24.87	215.95
27	0	732.85	1.65	8.29	10.50	79.56	86.21	1.86	7.85	5950.41	98.06	493.17	624.79	4734.38	3.93	19.77	25.04	216.78
28	0	725.11	1.64	8.35	10.44	79.57	85.27	1.85	7.82	5920.04	97.21	494.44	618.05	4710.34	3.90	19.82	24.77	215.68
29	0	719.92	1.63	8.50	10.25	79.63	82.29	1.82	7.70	5825.33	94.72	495.15	596.98	4638.48	3.80	19.85	23.93	212.39
30	0	737.69	1.63	8.62	10.14	79.61	80.53	1.81	7.62	5768.74	94.26	497.03	584.95	4592.50	3.78	19.92	23.45	210.28
1	2	832.93	2.01	8.90	9.64	79.45	70.38	1.70	7.49	5660.45	113.78	504.01	545.55	4497.11	4.56	20.20	21.87	205.92
2	2	840.73	1.90	8.88	9.80	79.42	73.44	1.73	7.61	5758.09	109.63	511.09	564.41	4572.96	4.39	20.49	22.62	209.39
3	2	853.96	1.81	9.02	9.71	79.47	72.76	1.73	7.59	5732.57	103.64	516.85	556.40	4555.67	4.15	20.72	22.30	208.60
4	2	852.55	1.75	9.30	9.40	79.55	68.94	1.69	7.42	5604.93	97.86	521.26	526.98	4458.83	3.92	20.89	21.12	204.16
5	2	838.95	1.70	9.42	9.24	79.65	67.03	1.67	7.34	5541.27	94.09	521.77	511.79	4413.62	3.77	20.91	20.51	202.09
6	2	816.93	1.67	9.68	8.88	79.77	62.62	1.63	7.16	5395.90	90.22	522.11	479.37	4304.20	3.62	20.93	19.22	197.08
7	2	806.08	1.63	9.38	9.18	79.81	66.72	1.67	7.33	5531.89	90.28	518.67	507.83	4415.11	3.62	20.79	20.36	202.16
8	2	824.57	1.60	9.10	9.49	79.81	71.17	1.71	7.52	5679.04	91.09	516.57	539.05	4532.33	3.65	20.71	21.61	207.53
9	2	875.36	1.60	8.88	9.74	79.78	74.84	1.75	7.67	5800.24	92.57	515.06	565.18	4627.43	3.71	20.65	22.65	211.88
10	2	905.60	1.83	9.14	9.37	79.66	67.99	1.68	7.38	5578.38	101.86	510.09	522.81	4443.63	4.08	20.45	20.96	203.47
11	2	924.66	1.92	9.28	9.15	79.65	64.49	1.64	7.24	5464.64	104.70	507.34	500.12	4352.48	4.20	20.34	20.05	199.29
12	2	930.43	1.99	9.39	8.99	79.63	61.98	1.62	7.13	5383.09	107.12	505.58	484.05	4286.34	4.29	20.27	19.40	196.27
13	2	907.14	2.04	9.22	9.18	79.56	63.99	1.64	7.22	5450.64	111.30	502.77	500.15	4336.42	4.46	20.15	20.05	198.56
14	2	863.39	2.06	8.90	9.48	79.56	67.91	1.68	7.38	5582.43	115.11	496.61	529.44	4441.27	4.61	19.91	21.22	203.36
15	2	839.82	1.84	8.37	10.12	79.66	78.66	1.79	7.83	5934.98	109.44	496.64	600.86	4728.04	4.39	19.91	24.09	216.49
16	2	849.05	1.79	8.28	10.28	79.65	81.41	1.81	7.95	6024.19	108.07	498.80	619.05	4798.27	4.33	19.99	24.81	219.71

17	2	858.59	1.73	8.10	10.49	79.69	85.33	1.85	8.12	6153.20	106.45	498.16	645.35	4903.24	4.27	19.97	25.87	224.51
18	2	855.44	1.69	7.73	10.86	79.72	92.11	1.92	8.40	6378.01	107.53	493.15	692.91	5084.42	4.31	19.77	27.77	232.81
19	2	835.74	1.66	7.55	11.07	79.72	96.06	1.96	8.57	6508.50	108.30	491.26	720.62	5188.31	4.34	19.69	28.89	237.57
20	2	807.08	1.65	7.13	11.50	79.73	104.44	2.04	8.92	6787.11	111.72	483.79	780.52	5411.09	4.48	19.39	31.29	247.77
21	2	765.48	1.60	6.25	12.47	79.69	126.44	2.26	9.85	7516.17	119.96	469.61	937.12	5989.48	4.81	18.82	37.56	274.25
22	2	732.08	1.71	6.35	12.36	79.58	122.46	2.22	9.68	7386.45	126.31	469.19	912.96	5877.99	5.06	18.81	36.60	269.15
23	2	757.89	1.84	7.27	11.34	79.55	99.37	1.99	8.71	6822.57	121.72	481.59	750.73	5268.52	4.88	19.30	30.09	241.24
24	2	807.16	1.93	8.30	10.16	79.61	78.65	1.79	7.83	5936.64	114.34	492.50	603.40	4726.40	4.58	19.74	24.19	216.42
25	2	837.57	1.99	9.28	9.05	79.69	62.71	1.63	7.16	5408.53	107.41	501.91	489.36	4309.84	4.31	20.12	19.62	197.34
26	2	851.75	2.01	9.76	8.50	79.73	55.92	1.56	6.88	5183.65	104.09	505.92	440.61	4133.02	4.17	20.28	17.66	189.25
27	2	889.13	1.90	9.64	8.69	79.76	58.84	1.59	7.00	5277.81	100.28	508.99	458.75	4209.79	4.02	20.40	18.39	192.76
28	2	891.31	1.80	9.33	9.08	79.79	64.33	1.64	7.23	5457.96	98.02	509.34	495.58	4355.02	3.93	20.42	19.87	199.41
29	2	855.82	1.72	8.97	9.52	79.79	70.75	1.71	7.50	5669.12	97.51	508.41	539.70	4523.50	3.91	20.38	21.63	207.13
30	2	822.59	1.66	8.50	10.08	79.76	79.37	1.79	7.86	5953.42	99.06	505.80	600.11	4748.45	3.97	20.27	24.05	217.43
1	1	907.26	1.53	8.40	10.77	79.30	91.80	1.92	8.76	6634.47	101.51	557.30	714.40	5261.27	4.07	22.34	28.64	240.91
2	1	889.58	1.60	8.63	10.37	79.40	84.40	1.84	8.44	6383.12	102.39	550.99	661.80	5067.94	4.10	22.09	26.53	232.05
3	1	906.92	1.69	9.26	9.63	79.42	72.47	1.72	7.91	5972.59	101.06	553.30	575.04	4743.20	4.05	22.18	23.05	217.19
4	1	946.45	1.74	9.62	9.24	79.40	66.83	1.67	7.66	5777.81	100.30	555.83	533.87	4587.81	4.02	22.28	21.40	210.07
5	1	955.38	1.75	9.26	9.66	79.33	72.48	1.72	7.91	5973.60	104.78	553.16	577.05	4738.62	4.20	22.17	23.13	216.98
6	1	926.75	1.76	8.65	10.33	79.25	82.55	1.83	8.35	6322.17	111.40	546.99	653.21	5010.57	4.47	21.93	26.18	229.43
7	1	911.46	1.68	8.16	10.95	79.20	93.63	1.94	8.84	6702.50	112.87	547.19	733.79	5308.65	4.52	21.93	29.41	243.08
8	1	901.32	1.59	7.53	11.70	79.18	108.98	2.09	9.52	7230.75	115.26	544.62	845.71	5725.16	4.62	21.83	33.90	262.15
9	1	878.25	1.55	7.16	12.11	79.18	118.46	2.18	9.94	7557.69	117.14	541.13	915.09	5984.33	4.70	21.69	36.68	274.02
10	1	882.33	1.62	7.88	11.21	79.28	99.07	1.99	9.08	6890.58	111.77	543.25	772.57	5462.99	4.48	21.78	30.97	250.14
11	1	921.21	1.66	8.62	10.39	79.33	84.35	1.84	8.43	6382.29	105.82	549.90	663.25	5063.32	4.24	22.04	26.59	231.84
12	1	922.96	1.68	9.18	9.78	79.37	74.71	1.75	8.01	6048.61	101.50	555.26	591.31	4800.54	4.07	22.26	23.70	219.81
13	1	914.68	1.68	9.55	9.34	79.42	68.52	1.69	7.74	5835.15	98.26	557.37	545.00	4634.51	3.94	22.34	21.85	212.21
14	1	914.35	1.70	9.96	8.84	79.49	61.92	1.62	7.45	5607.63	95.55	558.52	495.94	4457.62	3.83	22.39	19.88	204.11
15	1	919.27	1.62	9.67	9.23	79.48	67.44	1.67	7.69	5796.40	93.90	560.40	534.89	4607.21	3.76	22.46	21.44	210.96
16	1	903.21	1.58	9.33	9.56	79.53	72.39	1.72	7.91	5967.53	94.05	556.65	570.73	4746.10	3.77	22.31	22.88	217.32
17	1	899.61	1.56	9.12	9.75	79.57	75.25	1.75	8.03	6067.07	94.40	553.32	591.66	4827.69	3.78	22.18	23.72	221.05

18	1	898.47	1.62	9.41	9.39	79.58	69.62	1.70	7.79	5874.10	95.16	552.64	551.46	4674.84	3.81	22.15	22.11	214.06
19	1	900.66	1.64	9.44	9.36	79.56	69.18	1.69	7.77	5858.94	95.85	553.08	548.63	4661.37	3.84	22.17	21.99	213.44
20	1	877.14	1.65	9.44	9.32	79.58	68.52	1.69	7.74	5837.30	96.43	551.04	544.27	4645.56	3.87	22.09	21.82	212.71
21	1	848.07	1.87	10.06	8.56	79.51	57.37	1.57	7.25	5455.92	102.24	549.08	466.81	4337.79	4.10	22.01	18.71	198.62
22	1	834.25	2.19	10.56	7.94	79.32	48.67	1.49	6.86	5160.27	112.91	544.92	409.52	4092.92	4.53	21.84	16.42	187.41
23	1	834.74	2.50	10.64	7.75	79.11	45.13	1.45	6.71	5043.40	125.98	536.82	390.76	3989.83	5.05	21.52	15.66	182.69
24	1	834.77	2.82	10.83	7.40	78.95	40.12	1.40	6.49	4876.18	137.70	527.99	360.64	3849.84	5.52	21.16	14.46	176.28
25	1	860.00	3.12	10.91	7.18	78.79	36.79	1.37	6.34	4766.24	148.61	520.09	342.22	3755.32	5.96	20.85	13.72	171.95
26	1	870.50	3.22	10.73	7.32	78.73	37.58	1.38	6.38	4796.26	154.54	514.54	351.09	3776.09	6.19	20.63	14.07	172.90
27	1	896.78	3.08	10.65	7.46	78.82	39.48	1.39	6.46	4859.79	149.68	517.47	362.35	3830.29	6.00	20.74	14.52	175.38
28	1	897.93	2.80	10.49	7.73	78.98	43.45	1.43	6.63	4992.20	139.58	523.78	385.80	3943.04	5.60	21.00	15.46	180.55
29	1	894.01	2.50	10.20	8.18	79.11	49.64	1.50	6.91	5201.00	130.13	530.71	425.65	4114.51	5.22	21.27	17.06	188.40
30	1	875.52	2.31	10.20	8.27	79.22	51.61	1.52	6.99	5265.26	121.42	537.27	435.33	4171.24	4.87	21.54	17.45	191.00

Fuente: Investigación de los autores

\*0: tiro natural, 1: Velocidad baja, 2: Velocidad alta

### Plana-CIMPA, 220 Kg/h, 40%ALP

Registro	Regimen Ventilador*	Temperatura cámara	CO %Vol	CO2 %Vol	O2 %Vol	N2 %Vol	Exceso %	Lambda	Masa de gases secos por Kg de bagazo (kg)	Volumen total de gases secos (litros)	CO (L)	CO2 (L)	O2 (L)	N2 (L)	CO gmoles/Kg bagazo seco	CO2 gmoles/Kg bagazo seco	O2 gmoles/Kg bagazo seco	N2 gmoles/Kg bagazo seco
1	0	829.09	2.40	9.92	8.24	79.44	50.88	1.51	6.75	5629.27	135.10	558.20	464.08	4471.89	5.42	22.38	18.60	179.25
2	0	808.35	2.33	9.96	8.18	79.53	50.49	1.50	6.74	5614.79	130.94	559.23	459.07	4465.56	5.25	22.42	18.40	179.00
3	0	782.77	2.30	10.07	8.05	79.57	49.34	1.49	6.69	5571.22	128.36	561.13	448.59	4433.13	5.15	22.49	17.98	177.70
4	0	784.67	2.33	10.22	7.91	79.53	47.81	1.48	6.62	5513.44	128.46	563.69	436.22	4385.06	5.15	22.60	17.49	175.77
5	0	806.88	2.38	10.38	7.71	79.53	45.64	1.46	6.53	5433.10	129.09	563.96	419.00	4321.05	5.17	22.61	16.80	173.21
6	0	811.54	2.44	10.50	7.52	79.54	43.36	1.43	6.43	5349.99	130.33	561.96	402.32	4255.38	5.22	22.53	16.13	170.58
7	0	830.96	2.46	10.64	7.36	79.54	41.53	1.42	6.35	5282.07	129.83	562.22	388.55	4201.46	5.20	22.54	15.57	168.41

8	0	851.83	2.42	10.70	7.28	79.60	40.98	1.41	6.33	5261.66	127.12	563.00	383.05	4188.49	5.10	22.57	15.35	167.89
9	0	869.31	2.35	10.72	7.24	79.69	40.95	1.41	6.33	5260.45	123.62	563.71	381.07	4192.05	4.96	22.60	15.27	168.04
10	0	865.57	2.27	10.71	7.26	79.76	41.51	1.42	6.35	5280.49	119.76	565.43	383.57	4211.72	4.80	22.67	15.38	168.82
11	0	850.20	2.21	10.73	7.27	79.79	41.83	1.42	6.37	5291.14	116.93	567.63	384.56	4222.01	4.69	22.75	15.41	169.24
12	0	847.77	2.15	10.64	7.34	79.88	42.88	1.43	6.41	5330.56	114.50	566.96	391.26	4257.84	4.59	22.73	15.68	170.67
13	0	854.70	2.11	10.55	7.44	79.89	44.11	1.44	6.46	5375.96	113.63	567.06	400.19	4295.07	4.56	22.73	16.04	172.17
14	0	857.56	2.03	10.47	7.54	79.96	45.50	1.45	6.52	5426.76	109.95	568.29	409.18	4339.35	4.41	22.78	16.40	173.94
15	0	847.89	1.92	10.46	7.62	80.00	46.83	1.47	6.58	5473.86	105.32	572.35	417.33	4378.87	4.22	22.94	16.73	175.53
16	0	861.52	1.83	10.40	7.69	80.08	47.96	1.48	6.63	5515.07	100.82	573.79	424.00	4416.47	4.04	23.00	17.00	177.03
17	0	868.19	1.78	10.38	7.72	80.11	48.58	1.49	6.66	5537.67	98.79	575.03	427.73	4436.12	3.96	23.05	17.15	177.82
18	0	857.65	1.79	10.41	7.71	80.10	48.41	1.48	6.65	5530.72	98.78	575.64	426.31	4430.00	3.96	23.07	17.09	177.57
19	0	825.98	1.87	10.46	7.62	80.05	47.16	1.47	6.59	5485.55	102.47	573.79	418.22	4391.08	4.11	23.00	16.76	176.01
20	0	824.85	1.93	10.41	7.58	80.08	46.47	1.46	6.56	5462.55	105.21	568.76	414.28	4374.30	4.22	22.80	16.61	175.34
21	0	835.60	1.97	10.32	7.72	79.99	47.67	1.48	6.62	5506.97	108.49	568.32	424.92	4405.24	4.35	22.78	17.03	176.58
22	0	860.52	2.02	10.37	7.68	79.92	47.05	1.47	6.59	5483.78	110.77	568.78	421.37	4382.86	4.44	22.80	16.89	175.68
23	0	869.91	2.03	10.44	7.62	79.91	46.35	1.46	6.56	5457.10	110.78	569.94	415.83	4360.55	4.44	22.85	16.67	174.79
24	0	881.56	2.00	10.50	7.53	79.97	45.67	1.46	6.53	5432.16	108.53	570.59	409.15	4343.88	4.35	22.87	16.40	174.12
25	0	897.94	1.98	10.50	7.60	79.93	46.43	1.46	6.56	5458.71	107.86	573.16	414.64	4363.03	4.32	22.98	16.62	174.89
26	0	909.53	2.00	10.61	7.48	79.91	45.08	1.45	6.51	5408.55	108.17	573.74	404.78	4321.86	4.34	23.00	16.23	173.24
27	0	889.93	2.00	10.67	7.44	79.89	44.57	1.45	6.48	5389.06	107.89	574.90	400.73	4305.53	4.32	23.04	16.06	172.59
28	0	881.51	1.96	10.71	7.37	79.96	44.16	1.44	6.47	5373.60	105.22	575.62	396.14	4296.63	4.22	23.07	15.88	172.23
29	0	891.88	1.87	10.52	7.58	80.03	46.72	1.47	6.58	5468.30	102.15	575.27	414.72	4376.17	4.09	23.06	16.62	175.42
30	0	898.68	1.82	10.39	7.80	80.00	49.46	1.49	6.69	5567.96	101.11	578.40	434.30	4454.14	4.05	23.18	17.41	178.54
1	1	864.55	1.76	10.68	7.65	79.92	48.52	1.49	6.30	5237.92	91.98	559.20	400.60	4186.15	3.69	22.42	16.06	167.80
2	1	845.86	1.80	10.94	7.27	80.00	44.19	1.44	6.13	5087.79	91.58	556.40	369.78	4070.03	3.67	22.30	14.82	163.15
3	1	812.15	1.82	10.96	7.17	80.05	42.93	1.43	6.08	5045.40	91.83	553.19	361.65	4038.74	3.68	22.17	14.50	161.89
4	1	820.74	1.85	10.84	7.30	80.01	44.10	1.44	6.13	5087.18	94.32	551.25	371.16	4070.46	3.78	22.10	14.88	163.16
5	1	848.25	1.94	10.46	7.59	80.01	46.74	1.47	6.23	5184.28	100.47	542.28	393.38	4148.15	4.03	21.74	15.77	166.28
6	1	856.45	1.95	9.86	8.22	79.98	53.72	1.54	6.51	5432.39	105.82	535.42	446.54	4344.61	4.24	21.46	17.90	174.15
7	1	862.93	1.97	9.16	9.01	79.86	63.59	1.64	6.91	5781.01	113.77	529.54	520.98	4616.71	4.56	21.23	20.88	185.06
8	1	873.13	1.98	8.54	9.70	79.78	73.59	1.74	7.32	6134.10	121.21	523.85	595.01	4894.03	4.86	21.00	23.85	196.18

9	1	872.23	2.01	7.99	###	79.71	81.45	1.81	7.64	6414.82	128.94	512.42	659.96	5113.51	5.17	20.54	26.45	204.97
10	1	864.75	2.03	7.95	###	79.61	82.75	1.83	7.69	6459.17	131.38	513.63	672.27	5141.89	5.27	20.59	26.95	206.11
11	1	861.29	2.10	8.13	###	79.52	80.22	1.80	7.59	6368.56	133.99	517.64	652.65	5064.28	5.37	20.75	26.16	203.00
12	1	865.47	2.18	8.64	9.67	79.52	71.99	1.72	7.25	6076.96	132.23	524.81	587.52	4832.40	5.30	21.04	23.55	193.70
13	1	857.07	2.22	9.22	8.99	79.56	61.82	1.62	6.84	5719.15	127.19	527.53	514.27	4550.15	5.10	21.15	20.61	182.39
14	1	850.64	2.19	9.53	8.66	79.62	57.05	1.57	6.65	5551.29	121.46	528.93	480.74	4420.16	4.87	21.20	19.27	177.18
15	1	848.75	2.06	9.41	8.82	79.72	60.09	1.60	6.77	5656.39	116.30	532.38	498.67	4509.05	4.66	21.34	19.99	180.74
16	1	860.56	1.90	9.18	9.12	79.81	65.49	1.65	6.99	5843.78	110.80	536.23	532.95	4663.80	4.44	21.49	21.36	186.95
17	1	867.28	1.82	8.94	9.45	79.80	69.91	1.70	7.17	5998.50	108.93	536.03	566.74	4786.81	4.37	21.49	22.72	191.88
18	1	868.95	1.86	9.10	9.30	79.74	68.23	1.68	7.10	5937.58	110.20	540.08	552.43	4734.86	4.42	21.65	22.14	189.80
19	1	862.80	1.89	9.38	8.95	79.78	63.92	1.64	6.93	5785.92	109.24	542.72	517.72	4616.24	4.38	21.75	20.75	185.04
20	1	855.01	1.95	9.57	8.75	79.73	60.84	1.61	6.80	5677.61	110.49	543.23	496.90	4526.99	4.43	21.78	19.92	181.46
21	1	838.63	1.94	9.74	8.55	79.77	57.84	1.58	6.68	5572.32	107.88	542.97	476.32	4445.15	4.32	21.76	19.09	178.18
22	1	827.26	1.87	9.67	8.63	79.83	59.55	1.60	6.75	5631.66	105.20	544.69	486.13	4495.64	4.22	21.83	19.49	180.21
23	1	841.75	1.73	9.12	9.27	79.88	68.52	1.69	7.11	5946.86	103.00	542.59	551.16	4750.11	4.13	21.75	22.09	190.41
24	1	849.01	1.65	8.64	9.90	79.82	77.28	1.77	7.47	6254.38	103.32	540.13	618.93	4992.00	4.14	21.65	24.81	200.10
25	1	855.65	1.56	8.35	###	79.86	82.82	1.83	7.69	6449.39	100.48	538.65	659.64	5150.61	4.03	21.59	26.44	206.46
26	1	865.25	1.56	8.22	###	79.82	85.46	1.85	7.80	6541.96	101.92	537.49	680.63	5221.92	4.09	21.54	27.28	209.32
27	1	857.04	1.63	8.46	###	79.80	81.02	1.81	7.62	6385.63	104.09	540.22	645.46	5095.86	4.17	21.65	25.87	204.27
28	1	837.58	1.67	9.00	9.49	79.84	72.72	1.73	7.28	6091.32	101.85	548.22	578.19	4863.07	4.08	21.98	23.18	194.93
29	1	830.60	1.69	9.40	9.01	79.90	65.85	1.66	7.01	5849.96	98.75	549.90	526.96	4674.35	3.96	22.04	21.12	187.37
30	1	835.82	1.69	9.70	8.68	79.93	60.86	1.61	6.80	5674.88	96.13	550.24	492.35	4536.16	3.85	22.06	19.74	181.83
1	2	954.67	1.70	11.44	7.04	79.81	42.49	1.42	6.15	5089.98	86.73	582.50	358.54	4062.21	3.48	23.35	14.37	162.83
2	2	936.64	1.89	11.83	6.46	79.82	37.03	1.37	5.92	4898.04	92.48	579.34	316.41	3909.81	3.71	23.22	12.68	156.72
3	2	931.55	1.95	12.42	5.76	79.87	31.28	1.31	5.69	4692.41	91.60	582.61	270.28	3747.92	3.67	23.35	10.83	150.23
4	2	932.89	1.96	12.68	5.44	79.92	28.89	1.29	5.59	4606.80	90.14	584.33	250.79	3681.54	3.61	23.42	10.05	147.57
5	2	937.32	1.99	12.70	5.44	79.88	28.70	1.29	5.58	4600.32	91.48	584.06	250.26	3674.52	3.67	23.41	10.03	147.29
6	2	941.87	2.00	12.48	5.62	79.91	30.77	1.31	5.67	4674.71	93.52	583.22	262.53	3735.44	3.75	23.38	10.52	149.73
7	2	966.88	1.72	11.73	6.60	79.95	41.53	1.42	6.11	5052.57	86.83	592.77	333.47	4039.50	3.48	23.76	13.37	161.92
8	2	980.43	1.56	11.02	7.48	79.94	49.64	1.50	6.44	5341.93	83.58	588.47	399.36	4270.52	3.35	23.59	16.01	171.18
9	2	988.60	1.56	10.30	8.29	79.85	56.95	1.57	6.74	5606.35	87.23	577.45	464.88	4476.78	3.50	23.15	18.63	179.45

10	2	990.51	1.52	9.82	8.83	79.83	63.18	1.63	7.00	5829.75	88.73	572.25	514.88	4653.89	3.56	22.94	20.64	186.55
11	2	992.48	1.51	9.86	8.82	79.81	63.15	1.63	6.99	5827.67	88.00	574.38	514.23	4651.07	3.53	23.02	20.61	186.44
12	2	988.39	1.51	10.08	8.55	79.86	59.69	1.60	6.85	5704.37	86.14	575.23	487.61	4555.39	3.45	23.06	19.55	182.60
13	2	978.35	1.51	10.07	8.55	79.87	59.76	1.60	6.86	5707.49	86.18	574.63	488.26	4558.41	3.45	23.03	19.57	182.72
14	2	963.96	1.51	10.10	8.52	79.86	59.40	1.59	6.84	5694.04	85.98	575.33	485.29	4547.45	3.45	23.06	19.45	182.28
15	2	946.50	1.51	10.38	8.19	79.93	55.35	1.55	6.67	5550.07	83.81	575.87	454.37	4436.01	3.36	23.08	18.21	177.82
16	2	941.00	1.58	10.82	7.59	80.01	48.78	1.49	6.40	5317.75	84.13	575.17	403.66	4254.80	3.37	23.06	16.18	170.55
17	2	938.25	2.09	11.21	6.87	79.83	40.73	1.41	6.07	5037.62	105.08	564.52	346.33	4021.69	4.21	22.63	13.88	161.21
18	2	937.80	2.48	11.92	5.92	79.68	31.43	1.31	5.69	4708.88	116.78	561.20	278.95	3751.94	4.68	22.50	11.18	150.39
19	2	941.94	3.03	12.64	4.89	79.44	21.39	1.21	5.28	4357.07	131.85	550.82	212.97	3461.43	5.28	22.08	8.54	138.75
20	2	948.02	3.07	12.91	4.60	79.43	18.38	1.18	5.16	4250.96	130.59	548.63	195.37	3376.37	5.23	21.99	7.83	135.34
21	2	957.72	3.07	13.09	4.50	79.33	17.65	1.18	5.13	4222.65	129.55	552.91	190.19	3350.00	5.19	22.16	7.62	134.28
22	2	961.92	2.59	13.10	4.82	79.49	21.68	1.22	5.29	4356.83	112.67	570.74	210.00	3463.42	4.52	22.88	8.42	138.83
23	2	972.17	2.20	12.45	5.76	79.59	30.84	1.31	5.67	4676.59	102.70	582.33	269.37	3722.19	4.12	23.34	10.80	149.20
24	2	985.47	1.65	11.43	7.16	79.76	45.65	1.46	6.28	5196.80	85.85	593.89	372.09	4144.97	3.44	23.81	14.92	166.15
25	2	999.04	1.61	11.00	7.51	79.89	49.26	1.49	6.42	5329.22	85.59	586.21	400.12	4257.30	3.43	23.50	16.04	170.65
26	2	#####	1.71	11.17	7.24	79.88	46.95	1.47	6.33	5247.63	89.63	586.26	379.72	4192.01	3.59	23.50	15.22	168.04
27	2	#####	1.86	11.51	6.77	79.86	42.99	1.43	6.17	5107.16	95.10	587.73	345.65	4078.68	3.81	23.56	13.86	163.49
28	2	997.53	1.94	11.97	6.20	79.90	37.30	1.37	5.93	4905.17	94.96	587.25	303.92	3919.03	3.81	23.54	12.18	157.09
29	2	985.54	1.98	12.44	5.65	79.92	30.36	1.30	5.65	4661.46	92.48	580.07	263.47	3725.44	3.71	23.25	10.56	149.33
30	2	970.87	2.01	12.58	5.56	79.84	29.27	1.29	5.60	4621.51	93.08	581.39	257.14	3689.91	3.73	23.30	10.31	147.91

Fuente: Investigación de los autores

\*O: tiro natural, 1: Velocidad baja, 2: Velocidad alta