



UNIVERSIDAD  
DE PIURA

REPOSITORIO INSTITUCIONAL  
PIRHUA

# ANÁLISIS TERMODINÁMICO Y DETERMINACIÓN DE INDICADORES ENERGÉTICOS DE HORNILLAS PANELERAS EN OPERACIÓN

Beto Wong-Gálvez

Piura, mayo de 2017

FACULTAD DE INGENIERÍA

Departamento de Ingeniería Mecánico-Eléctrica

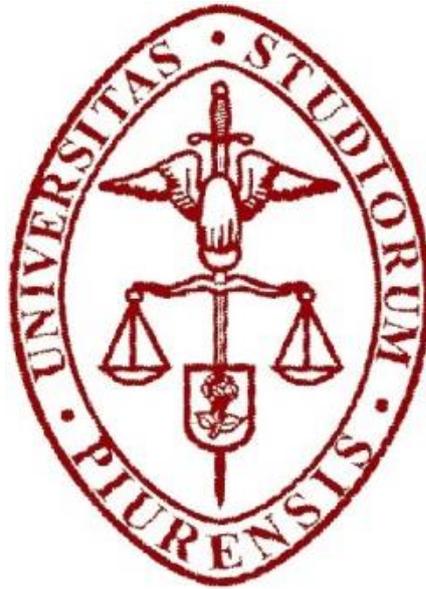
Wong, B. (2017). *Análisis termodinámico y determinación de indicadores energéticos de hornillas paneleras en operación* (Tesis de licenciatura en Ingeniería Mecánico-Eléctrica). Universidad de Piura, Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Mecánico-Eléctrica. Piura, Perú.



Esta obra está bajo una [licencia](#)  
[Creative Commons Atribución-](#)  
[NoComercial-SinDerivadas 2.5 Perú](#)

[Repositorio institucional PIRHUA – Universidad de Piura](#)

**UNIVERSIDAD DE PIURA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**



**“Análisis termodinámico y determinación de indicadores energéticos de hornillas  
paneleras en operación”**

Tesis para optar el Título de  
Ingeniero Mecánico-Eléctrico

**Beto Daniel de Jesús Wong Gálvez**

Asesor: Dr. Ing. Rafael Saavedra Garcia Zabaleta

Piura, mayo de 2017



*A **Dios**, por las bendiciones y obsequios que recibo día a día.*

*A **María G.** y **William W.**, por creer en mí, pero sobre todo por brindarme todo su amor.*

*A **María Z.**, por su invaluable apoyo y aliento en mi educación.*

*Especialmente dedicado a **Anthony** y **Brenda**.*



## Prólogo

Actualmente, la producción de panela granulada juega un rol importante en el desarrollo económico y social de varias Asociaciones en la Sierra de la Región Piura, cuyos ingresos por la venta de panela están mejorando su calidad de vida.

El motivo de la presente investigación es desarrollar una metodología para realizar un análisis termodinámico que permita determinar la cantidad y calidad de la energía durante la producción de panela, de tal forma que estos datos puedan ser considerados para el mejoramiento del diseño de hornillas paneleras. Con ello se podrá conocer el estado actual de la hornilla panelera y así, identificar las mejoras tecnológicas que se podrían implementar para incrementar la competitividad de la cadena productiva de panela granulada, aumentando la eficiencia energética y de producción de los módulos paneleros.

Es oportuno el agradecimiento a las personas que hicieron posible la realización de la presente tesis: al Dr. Ing. Rafael Saavedra García Zabaleta, en representación de la Universidad de Piura, como mi asesor de tesis, por su paciencia, dedicación y asesoramiento durante la realización de la misma, que ha significado un notable aporte en mi formación como profesional; al Dr. Ing. Mario Daniel Marcelo Aldana y al Dr. Ing. Raúl La Madrid Olivares, por la confianza puesta en mi persona; al Dr. Ing. Elder M. Mendoza Orbegoso, Ing. Luis O. Delgado Ramírez, Ing. Jorge A. Estremadoyro Ruíz e Ing. Jose L. Uriol Paulini, por su amistad, apoyo y consejos que han significado un constante aliento para la finalización de este trabajo; y a mis amigos que siempre me apoyan y de los cuales, las palabras de aliento son infaltables.

Finalmente, agradezco a Innóvate Perú (FINCyT) por el financiamiento de esta tesis en el ámbito del proyecto “Optimización energética del proceso de elaboración de azúcar orgánica mediante la implementación de un intercambiador de calor de tipo pirotubular”, a través del convenio N° 136-PNICP-PIAP-2015.



## **Resumen**

El objetivo de la investigación es desarrollar una metodología basada en el análisis termodinámico que permita determinar indicadores energéticos y de producción con la finalidad de conocer el estado actual de la hornilla panelera y del proceso de producción, para identificar las mejoras tecnológicas (innovaciones) que se podrían implementar para incrementar la competitividad de la cadena productiva de panela granulada, aumentando la eficiencia energética y de producción en los módulos paneleros.

El presente trabajo de tesis consiste en un estudio teórico-experimental. Se pretende estudiar el proceso de combustión y el de transferencia de calor en el ducto de gases para definir adecuadamente las fórmulas a utilizar en el análisis termodinámico. Luego se realizarán pruebas experimentales para tomar mediciones de temperaturas, velocidad de los gases de combustión, concentración de dichos gases, etc.

Para poder validar la metodología desarrollada se comparará los datos obtenidos de la metodología con los datos de diseño del módulo del caso de estudio.



## Índice general

<b>Prólogo</b> .....	<b>i</b>
<b>Resumen</b> .....	<b>i</b>
<b>Índice general</b> .....	<b>iii</b>
<b>Índice de figuras</b> .....	<b>vi</b>
<b>Índice de tablas</b> .....	<b>vii</b>
<b>Introducción</b> .....	<b>1</b>
<b>Nomenclatura</b> .....	<b>3</b>
<b>Capítulo 1 Fundamentos de Termodinámica y Transferencia de Calor</b> .....	<b>5</b>
1.1.    Volumen de control no reactivo .....	5
1.1.1. Principio de la conservación de la masa .....	5
1.1.2. Principio de la conservación de la energía .....	6
1.1.3. Principio del incremento de la entropía .....	7
1.1.4. Principio de disminución y destrucción de exergía.....	9
1.2.    Reacciones químicas: combustión .....	11
<b>1.2.1. Composición del aire seco</b> .....	<b>11</b>
1.3.    Volumen de control reactivo .....	13
1.3.1. Principio de la conservación de la masa en sistemas reactivos .....	14
1.3.2. Principio de la conservación de la energía en sistemas reactivos .....	18
1.3.3. Principio del incremento de la entropía .....	23
1.3.4. Principio de disminución y destrucción de exergía.....	24
1.4.    Determinación de la entalpía y entropía molares según las tablas termodinámicas JANAF .....	25
<b>Capítulo 2 Análisis termodinámico y definición de indicadores energéticos y de producción en hornillas paneleras en fase de diseño u operación</b> .....	<b>29</b>
2.1.    Cámara de combustión.....	30
2.1.1. Balance de masa.....	30
2.1.2. Balance de energía .....	32
2.1.3. Balance de entropía .....	34
2.1.4. Balance de exergía .....	35
2.2.    Ducto de humos .....	36
2.2.1. Balance de masa.....	36

2.2.2. Balance de energía .....	36
2.2.3. Balance de entropía .....	39
2.2.4. Balance de exergía .....	41
2.3. Indicadores energéticos y de producción .....	42
2.3.1. Índice de rendimiento de cultivo .....	42
2.3.2. Índice de rendimiento del bagazo .....	42
2.3.3. Índice de pérdidas de los gases de combustión .....	43
2.3.4. Índice de pérdidas de energía por transferencia de calor .....	43
2.3.5. Índice de rendimiento global de un módulo panelero .....	43
2.3.6. Eficiencia energética de la hornilla .....	44
2.3.7. Índice de capacidad real de producción .....	44
<b>Capítulo 3 Procedimientos y equipos para la medición de parámetros energéticos y de producción .....</b>	<b>45</b>
3.1. Principales equipos e instrumentos de medición.....	45
3.1.1. Analizador de gases .....	45
3.1.2. Sensores de temperatura.....	54
3.1.3. Refractómetro.....	58
3.1.4. Higrómetro .....	60
3.1.5. Lista de otros materiales, equipos e instrumentos.....	61
3.2. Procedimientos.....	63
3.2.1. Pesaje de bagazo combustible.....	63
3.2.2. Pesaje de la caña de azúcar .....	65
3.2.3. Pesaje de bagazo fresco.....	65
3.2.4. Medición de intervalos de tiempos .....	66
3.2.5. Medición del porcentaje de extracción .....	67
3.2.6. Medición de la temperatura y composición de los gases en la base de la chimenea..	68
3.2.7. Medición de la velocidad de los gases en la base de la chimenea.....	68
3.2.8. Medición de la temperatura del jugo en las pailas y en el ducto de gases .....	69
3.2.9. Medición de grados Brix de los jugos.....	70
3.2.10. Medición de las condiciones ambientales .....	71
3.2.11. Pesaje del bagacillo .....	72
3.2.12. Pesaje de la cachaza .....	72
3.2.13. Pesaje de la panela granulada.....	73
<b>Capítulo 4 Caso estudio: Análisis termodinámico y determinación de indicadores energéticos y de producción en la hornilla panelera de Cruz Misionera – Hualambi – Jililí – Ayabaca.....</b>	<b>75</b>
4.1. Estructura del programa de cálculo.....	75
4.1.1. Etapa de pre-proceso .....	76
4.1.2. Etapa de proceso .....	77
4.1.3. Etapa de post-proceso .....	78

4.2. Simulación del caso de estudio .....	79
<b>Conclusiones .....</b>	<b>83</b>
<b>Referencias bibliográficas .....</b>	<b>85</b>
<b>Anexo A Evaluación y diagnóstico del analizador de gases .....</b>	<b>89</b>
<b>Anexo B Intercambio de datos entre el analizador GreenLine 8000 y una PC .....</b>	<b>93</b>
<b>Anexo C Tablas de termocuplas J, K, T, R, S, B y RTD Pt100.....</b>	<b>99</b>
<b>Anexo D Precauciones y consideraciones al usar termocuplas .....</b>	<b>103</b>
<b>Anexo E Configuración de los transmisores 4-20mA .....</b>	<b>105</b>
<b>Anexo F Módulo de adquisición de datos .....</b>	<b>109</b>
1. Sistema de alimentación y protección eléctrica.....	109
2. Sistema de adquisición de datos .....	109
3. Sistema de visualización y registro de datos .....	112
3.1. Pantalla Temp. ....	113
3.2. Pantalla Registro .....	113
3.3. Pantalla Trend .....	116
3.4. Pantalla Setup.....	116
<b>Anexo G Confección de un bolso de lona .....</b>	<b>119</b>
<b>Anexo H Código en MATLAB .....</b>	<b>121</b>
<b>Anexo I Análisis Gravimétrico del bagazo seco.....</b>	<b>137</b>

## Índice de figuras

Figura 2.1 - Esquema de análisis del sistema termodinámico simplificado. ....	29
Figura 2.2 – Esquema de una hornilla panelera y sus componentes. ....	30
Figura 3.1 - Analizador de gases GreenLine 8000. ....	46
Figura 3.2 - Partes del MCU en el analizador de gases GreenLine 8000. ....	47
Figura 3.3 - Partes del RCU en el analizador de gases GreenLine 8000. ....	49
Figura 3.4 - Sonda de análisis de gases. ....	51
Figura 3.5 - Sonda de presión diferencial (Tubo Pitot). ....	51
Figura 3.6 - Conexión de la sonda de análisis de gases. ....	52
Figura 3.7 - Conexión de la sonda de presión diferencial (Tubo Pitot). ....	52
Figura 3.8 - Conexión de la manguera de evacuación de condensados. ....	53
Figura 3.9 - Termocupla tipo K. ....	55
Figura 3.10 - (a) RTD con cabezal. (b) RTD sumergible con transmisor 4-20 mA. ....	57
Figura 3.11 - Refractómetro portátil de la Universidad de Piura. ....	59
Figura 3.12 - Partes de un refractómetro portátil. ....	59
Figura 3.13 - Higrómetro Mini T-RH. ....	61
Figura 3.14 - Llenado de la lona con el bagazo combustible. ....	65
Figura 3.15 - Alza de la lona con el bagazo combustible. ....	65
Figura 3.16 - Esquema de instalación de los sensores de temperatura en la hornilla panelera. ....	71
Figura 3.17 - Pesaje de la panela granulada. ....	74
Figura 4.1 - Diagrama de flujo básico de la estructura del programa de cálculo. ....	76
Figura 4.2 - Diagrama de flujo de la estructura del programa de cálculo en MATLAB. ..	77
Figura 4.3 - Diagrama de Sankey o de flujos de energía de la hornilla panelera para el caso de estudio. ....	82

## Índice de tablas

Tabla 1.1 - Composición del aire seco en base molar o en volumen. ....	12
Tabla 1.2 - Composición simplificada del aire seco en base molar o en volumen. ....	12
Tabla 1.3 - Composición del aire seco en base en masa. ....	13
Tabla 1.4 - Coeficientes para las propiedades termodinámicas de las especies. ....	27
Tabla 3.1 - Descripción de las partes del MCU. ....	48
Tabla 3.2 - Descripción de las partes del RCU. ....	50
Tabla 3.3 - Características de las termocuplas más comunes. ....	55
Tabla 3.4 - Tabla de coeficientes de variación de resistencia por grado de temperatura. ..	57
Tabla 3.5 - Descripción de los sensores de temperaturas utilizados. ....	58
Tabla 3.6 - Datos del refractómetro portátil de la Universidad de Piura. ....	59
Tabla 3.7 - Escalas del refractómetro a utilizar en nuestro módulo. ....	60
Tabla 3.8 - Especificaciones técnicas del higrómetro Mini T-RH. ....	61
Tabla 3.9 - Lista de equipos, instrumentos, accesorios y otros materiales para toma de datos experimentales. ....	61
Tabla 3.10 - Descripción de las temperaturas indicadas en el esquema de la figura 16. ....	71
Tabla 4.1 - Magnitudes solicitadas por el programa con sus respectivas unidades. ....	76
Tabla 4.2 - Magnitudes mostradas por el programa con sus respectivas unidades. ....	78
Tabla 4.3 - Valores ingresados al programa para realizar el análisis termodinámico. ....	79



## **Introducción**

La Universidad de Piura ha gestionado y ejecutado proyectos de investigación orientados a desarrollar innovaciones tecnológicas en la agroindustria de la panela granulada. Se ha implementado una metodología de diseño y construcción de hornillas paneleras, obteniéndose como resultado un módulo de producción tipo Ward-Cimpa, único en el Perú, logrando aumentar los índices de producción (mayores ingresos económicos), disminuir las emisiones de gases contaminantes y reducir el consumo de bagazo.

Para el desarrollo de estos proyectos, se han ampliado y generado conocimientos y técnicas en temas relacionados a la transferencia de calor, dinámica de fluidos computacional, etc. También se han realizados mediciones en campo para hacer un monitoreo del comportamiento de la hornilla utilizando la instrumentación adecuada.

Con la tesis propuesta se desea definir una metodología para realizar un análisis termodinámico aplicable a cualquier módulo de producción de panela; con el propósito de determinar su eficiencia térmica y capacidad productiva, también identificar las posibles oportunidades de mejora e innovación en cada módulo analizado.

En el Capítulo 1 se presenta los fundamentos de Termodinámica y Transferencia de Calor necesarios para desarrollar un análisis termodinámico en cualquier volumen de control; y también incluye el enfoque utilizado para calcular las propiedades de entalpía y entropía de una mezcla sin quemar y quemada. En el Capítulo 2 se podrá observar la aplicación de todos los conceptos vistos en el anterior capítulo para desarrollar una metodología para el análisis termodinámico en una hornilla panelera en general. El Capítulo 3 muestra los distintos equipos e instrumentos de medición y los procedimientos que deben realizarse para una adecuada obtención de la información necesaria para el análisis termodinámico. Finalmente, en el Capítulo 4 se describe el código desarrollado para el caso de estudio, incluyendo la información obtenida del módulo panelero seleccionado y los resultados del análisis termodinámico.



## Nomenclatura

$a_r$	Cantidad de moles de oxígeno real por mol de combustible.	$n$	Cantidad de moles, [kmol]
$a_t$	Cantidad de moles de oxígeno teórico por mol de combustible.	$\dot{n}_i$	Tasa de flujo molar del componente i-ésimo, [kmol/s]
$A$	Área, [m <sup>2</sup> ]	$\tilde{n}_i$	Cantidad de moles del componente i-ésimo por kmol de combustible
$^{\circ}B$	Grados Brix	$p$	Presión, [kPa]
$c_p$	Calor específico a presión constante, [kJ/kg · K]	$p_i$	Presión parcial, [kPa]
$d$	Deficiencia de aire	$p_0$	Presión ambiente
$e$	Exceso de aire	$PCI$	Poder calorífico inferior, [kJ/kg combustible]
$E$	Energía total, [kJ]	$PCS$	Poder calorífico superior, [kJ/kg combustible]
$ec$	Energía cinética específica, [kJ/kg]	$PE$	Porcentaje de extracción, [%]
$ep$	Energía potencial específica, [kJ/kg]	$\tilde{q}$	Transferencia total de calor por kmol de combustible, [kJ/kmol]
$g$	Aceleración de la gravedad, [m/s <sup>2</sup> ]	$Q$	Transferencia total de calor, [kJ]
$h$	Entalpía específica, $u + Pv$ , [kJ/kg]	$\dot{Q}$	Tasa de transferencia de calor, [kW]
$h_{fg}$	Calor latente de vaporización, [kJ/kg]	$R$	Constante del gas, [kJ/kg · K]
$\tilde{h}_c$	Entalpía de combustión, [kJ/kmol de combustible]	$R_u$	Constante universal de los gases, [kJ/kmol · K]
$\tilde{h}_f$	Entalpía de formación, [kJ/kmol]	$s$	Entropía específica, [kJ/kg · K]
$\tilde{h}_R$	Entalpía de reacción, [kJ/kmol]	$S$	Entropía total, [kJ/K]
$m$	Masa, [kg]	$s_{gen}$	Generación específica de entropía, [kJ/kg · K]
$\dot{m}$	Tasa de flujo de masa, [kg/s]	$S_{gen}$	Generación total de entropía, [kJ/K]
$M$	Masa molar, [kg/kmol]		

$t$	Tiempo, [s]
$T$	Temperatura, [°C o K]
$T_{bs}$	Temperatura de bulbo seco, [°C]
$V$	Volumen total, [m <sup>3</sup> ]
$V$	Velocidad, [m/s]
$V_{prom}$	Velocidad promedio [m/s]
$\tilde{w}$	Trabajo total por kmol de combustible, [kJ/kmol]
$W$	Trabajo total, [kJ]
$\dot{W}$	Potencia, [kW]
$x$	Fracción en masa
$\tilde{x}$	Fracción molar
$X$	Exergía total, [kJ]
$X_{dest}$	Destrucción de exergía total, [kJ]
$\dot{X}_{dest}$	Tasa de destrucción de exergía total, [kW]
$z$	Elevación, [m]

### Letras griegas

$\Delta$	Cambio finito de cantidad
$\lambda$	Gradiente térmico, [K/m]
$\rho$	Densidad, [kg/m <sup>3</sup> ]
$\phi$	Humedad relativa
$\psi$	Exergía de corriente, [kJ/kg]
$\omega$	Humedad específica o absoluta, [kg H <sub>2</sub> O/kg de aire seco]

### Subíndices

$a$	Aire
$aislado$	Sistema aislado
$ah$	Aire húmedo
$as$	Aire seco
$atm$	Atmosférico
$bg$	Bagazo
$bh$	Base húmeda
$bgf$	Bagazo fresco
$bgh$	Bagazo húmedo
$bgs$	Bagazo seco
$bs$	Base seca
$ca$	Caña de azúcar

$cc$	Cámara de combustión
$cch$	Cachaza
$ch$	Chimenea
$eb$	Ebullición
$entrada$	Condiciones a la entrada
$fg$	Diferencia de propiedades de líquido saturado y vapor saturado
$g$	Gases de combustión
$gen$	Generación
$i$	i-ésimo componente
$jcl$	Jugo clarificado
$k$	k-ésimo componente
$p$	Productos
$pc$	Pérdidas por combustión
$pp$	Pérdidas en las paredes
$prom$	Valor promedio
$R$	Reactivos
$ref$	Estado de referencia
$s$	Superficie
$salida$	Condiciones a la salida
$sat$	Saturado
$sis$	Sistema
$t$	Transversal
$VC$	Volumen de control
0	Estado muerto
1	Estado inicial o a la entrada
2	Estada final o a la salida.

### Superíndices

$\dot{\phantom{x}}$ (punto superior)	Cantidad por unidad de tiempo
$\tilde{\phantom{x}}$ (tilde nasal)	Cantidad por unidad molar
$^\circ$ (círculo)	Estado estándar

# Capítulo 1

## Fundamentos de Termodinámica y Transferencia de Calor<sup>1</sup>

Un sistema se define como una cantidad de materia o una región en el espacio elegida para análisis. La frontera se define como la superficie real o imaginaria que separa al sistema de los alrededores y, en términos matemáticos, tiene espesor cero y no puede contener masa ni ocupar volumen en el espacio.

Un sistema cerrado, también llamado masa de control, consta de una cantidad fija de masa y ninguna otra puede cruzar la frontera; pero la energía, en forma de calor o trabajo, puede cruzar la frontera y el volumen de un sistema cerrado no tiene que ser fijo. Un sistema aislado es un caso particular de los sistemas cerrados en el que no se permite que la energía cruce la frontera.

Un sistema abierto, o volumen de control, es una región elegida apropiadamente en el espacio, y tanto la masa como la energía pueden cruzar la frontera. Un volumen de control puede ser fijo en tamaño y forma, como también podría implicar una frontera móvil.

### 1.1. Volumen de control no reactivo

#### 1.1.1. Principio de la conservación de la masa

La masa es una propiedad conservada que no es posible crear ni destruir durante un proceso. Para sistemas cerrados, el principio de conservación de la masa se usa de modo implícito al requerir que la masa del sistema permanezca constante durante un proceso. Por el contrario, para volúmenes de control, la masa puede cruzar fronteras, de modo que se debe mantener un registro de la cantidad de masa que entra y sale.

Se llama **flujo másico** a la cantidad de masa que pasa por una sección transversal por unidad de tiempo. El flujo másico diferencial del fluido que pasa por un pequeño elemento de área  $dA_t$  en una sección transversal de flujo es proporcional a  $dA_t$ , la densidad del fluido  $\rho$  y la componente de la velocidad de flujo normal a  $dA_t$ , que se denota como  $V_n$ , y se expresa como:

$$\delta \dot{m} = \rho V_n dA_t \quad (1.1)$$

---

<sup>1</sup> El presente capítulo ha sido elaborado utilizando las referencias bibliográficas [3], [17], [18] y [24].

En muchas aplicaciones, la densidad es en esencia uniforme sobre la sección transversal del tubo. Sin embargo, la velocidad nunca es uniforme en una sección transversal debido a que el fluido se adhiere a la superficie y, por lo tanto, tiene velocidad cero en la pared (a esto se denomina condición de no deslizamiento). Por ello, es necesario definir una velocidad promedio  $V_{\text{prom}}$  como el valor promedio de  $V_n$  en toda la sección transversal. Así, para los flujos tanto incompresibles como compresibles donde  $\rho$  es uniforme en  $A_t$ , el flujo másico se define como:

$$\dot{m} = \rho V_{\text{prom}} A_t \quad [\text{kg/s}] \quad (1.2)$$

Para flujo compresible, se puede considerar a  $\rho$  como la densidad promedio en la sección transversal.

El **principio de conservación de la masa** para un volumen de control se puede expresar como: *la transferencia neta de masa hacia o desde el volumen de control durante un intervalo de tiempo  $\Delta t$  es igual al cambio neto (incremento o disminución) en la masa total dentro del volumen de control durante  $\Delta t$* . Es decir,

$$m_{\text{entrada}} - m_{\text{salida}} = \Delta m_{\text{VC}} \quad [\text{kg}] \quad (1.3)$$

Donde  $\Delta m_{\text{VC}} = m_{\text{final}} - m_{\text{inicial}}$  es el cambio en la masa del volumen de control durante el proceso. También se puede expresar en la forma de tasa como:

$$\dot{m}_{\text{entrada}} - \dot{m}_{\text{salida}} = dm_{\text{VC}}/dt \quad [\text{kg/s}] \quad (1.4)$$

En el caso de un proceso de **flujo estacionario con corriente única**, la cantidad total de masa contenida dentro de un volumen de control no cambia con el tiempo ( $m_{\text{VC}} = \text{constante}$ ). En este tipo de procesos, es de especial interés la cantidad de masa que fluye por unidad de tiempo, es decir, el flujo másico  $\dot{m}$ . En estos casos, el estado termodinámico de entrada se denota con el subíndice 1, y el de salida con el subíndice 2. Entonces, el principio de conservación de la masa para un sistema general de flujo estacionario con corriente única se reduce a la siguiente expresión.

$$\text{Flujo estacionario (corriente única): } \dot{m}_1 = \dot{m}_2 \rightarrow \rho_1 V_1 A_1 = \rho_2 V_2 A_2 \quad [\text{kg/s}] \quad (1.5)$$

### 1.1.2. Principio de la conservación de la energía

Un proceso de flujo estacionario es aquel en el que las propiedades del fluido pueden cambiar de un punto a otro dentro del volumen de control, pero en cualquiera de esos puntos permanecen constantes en el tiempo.

Cabe recordar que las propiedades del fluido en una sección son comúnmente consideradas uniformes e igual a un valor promedio. Así, las propiedades del fluido en una entrada o salida pueden ser especificadas por los valores promedio únicos. Además, las interacciones de calor o trabajo entre un sistema de flujo estacionario y sus alrededores no cambian con el tiempo. Por lo tanto, la potencia que entrega un sistema y la tasa de

transferencia de calor hacia o desde el sistema permanece constante durante un proceso de flujo estacionario.

Durante un proceso de flujo estacionario, el contenido de energía total dentro de un volumen de control permanece constante ( $E_{VC} = \text{constante}$ ); por lo tanto, el cambio en la energía total del volumen de control es cero ( $\Delta E_{VC} = 0$ ). Entonces, la forma de tasa del balance de energía generalmente se reduce a la siguiente expresión:

$$\underbrace{\dot{E}_{\text{entrada}} - \dot{E}_{\text{salida}}}_{\text{Tasa de transferencia de energía neta por calor, trabajo y masa}} = \underbrace{\cancel{\frac{dE_{\text{sis}}}{dt}}^{0(\text{estable})}}_{\text{Tasa de cambio de la energía total del sistema}} = 0 \quad (1.6)$$

o bien

$$\underbrace{\dot{E}_{\text{entrada}}}_{\text{Tasa de transferencia de energía neta de entrada por calor, trabajo y masa}} = \underbrace{\dot{E}_{\text{salida}}}_{\text{Tasa de transferencia de energía neta de salida por calor, trabajo y masa}} \quad [\text{kW}] \quad (1.7)$$

De manera explícita, la ecuación (1.7) puede escribirse como:

$$\dot{Q}_{\text{entrada}} + \dot{W}_{\text{entrada}} + \sum_{\text{entrada}} \dot{m} \underbrace{\left( h + \frac{V^2}{2} + gz \right)}_{\text{por cada entrada}} = \dot{Q}_{\text{salida}} + \dot{W}_{\text{salida}} + \sum_{\text{salida}} \dot{m} \underbrace{\left( h + \frac{V^2}{2} + gz \right)}_{\text{por cada salida}} \quad (1.8)$$

Cuando se tiene una sola corriente, la ecuación (1.8) se reduce a:

$$\dot{Q} + \dot{W} = \dot{m} \left[ h_2 - h_1 + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \right] \quad (1.9)$$

Donde  $\dot{Q}$  es la tasa de transferencia de calor entre el volumen de control y sus alrededores [kW],  $\dot{W}$  representa las formas restantes de trabajo por unidad de tiempo [kW],  $\Delta h = h_2 - h_1$  el cambio en la entalpía de un fluido en los estados termodinámicos de salida y entrada [kJ/kg],  $\Delta ec = (V_2^2 - V_1^2)/2$  y  $\Delta ep = g(z_2 - z_1)$  son los cambios en las energías cinética y potencial por unidad de masa, respectivamente [J/kg].

### 1.1.3. Principio del incremento de la entropía

La segunda ley de la termodinámica conduce a la definición de una propiedad llamada entropía, que es una medida del desorden molecular o aleatoriedad de un sistema. Esta ley implica que todo proceso llevado a cabo en la realidad conlleva a una generación de entropía ocasionada por la transferencia de calor, el flujo másico e irreversibilidades.

La entropía puede transferirse hacia o desde un sistema por dos mecanismos de transferencia: calor y flujo másico. La transferencia de calor hacia un sistema aumenta la entropía y la transferencia de calor desde un sistema la disminuye. La masa contiene tanto entropía como energía, y los contenidos de éstas en un sistema son proporcionales a la masa.

Por otro lado, las irreversibilidades como: la fricción, el proceso de mezclado, las reacciones químicas, la transferencia de calor a través de una diferencia de temperatura finita, la expansión libre, y la compresión o expansión rápida, siempre ocasionan que la entropía de un sistema aumente.

El balance de entropía para cualquier sistema que experimenta cualquier proceso (incluyendo los sistemas reactivos) se expresa como:

$$\underbrace{S_{entrada} - S_{salida}}_{\substack{\text{Transferencia neta} \\ \text{de entropía por} \\ \text{calor y masa}}} + \underbrace{S_{gen}}_{\substack{\text{Generación} \\ \text{de entropía}}} = \underbrace{\Delta S_{sis}}_{\substack{\text{Cambio de} \\ \text{entropía en} \\ \text{el sistema}}} \quad [\text{kJ/K}] \quad (1.10)$$

o, en forma de tasa, como:

$$\underbrace{\dot{S}_{entrada} - \dot{S}_{salida}}_{\substack{\text{Tasa de transferencia} \\ \text{neta de entropía por} \\ \text{calor y masa}}} + \underbrace{\dot{S}_{gen}}_{\substack{\text{Tasa de} \\ \text{generación} \\ \text{de entropía}}} = \underbrace{\frac{dS_{sis}}{dt}}_{\substack{\text{Tasa de cambio} \\ \text{de entropía} \\ \text{en el sistema}}} \quad [\text{kW/K}] \quad (1.11)$$

Las relaciones generales de balance de entropía, ecuaciones (1.10) y (1.11), pueden expresarse para los volúmenes de control como:

$$\sum \frac{Q_k}{T_k} + \sum m_{entrada} s_{entrada} - \sum m_{salida} s_{salida} + S_{gen} = (S_2 - S_1)_{VC} \quad [\text{kJ/K}] \quad (1.12)$$

o, en forma de tasa, como:

$$\sum \frac{\dot{Q}_k}{T_k} + \sum \dot{m}_{entrada} s_{entrada} - \sum \dot{m}_{salida} s_{salida} + \dot{S}_{gen} = \frac{dS_{VC}}{dt} \quad [\text{kW/K}] \quad (1.13)$$

La relación de balance de entropía para un proceso general de flujo estacionario puede obtenerse de la anterior ecuación ya que el segundo miembro es igual a cero. Reacomodando los términos se obtiene:

$$\text{Flujo estacionario: } \dot{S}_{gen} = \sum \dot{m}_{salida} s_{salida} - \sum \dot{m}_{entrada} s_{entrada} - \sum \frac{\dot{Q}_k}{T_k} \quad [\text{kW/K}] \quad (1.14)$$

Para dispositivos con un solo flujo (una entrada y una salida), se tiene:

$$\text{Flujo estacionario, un solo flujo: } \dot{S}_{gen} = \dot{m}(s_{salida} - s_{entrada}) - \sum \frac{\dot{Q}_k}{T_k} \quad [\text{kW/K}] \quad (1.15)$$

Para el caso de un dispositivo adiabático con un solo flujo, la ecuación (1.13) se simplifica como:

$$\text{Flujo estacionario, un solo flujo, adiabático: } \dot{S}_{\text{gen}} = \dot{m}(s_{\text{salida}} - s_{\text{entrada}}) \quad [\text{kW/K}] \quad (1.16)$$

Cabe recordar que a presiones diferentes a  $p_0 = 1 \text{ atm}$  para cualquier temperatura  $T$ , los valores de entropía por unidad de mol, para un gas ideal, pueden obtenerse mediante la siguiente ecuación:

$$\tilde{s}(T, p) = \tilde{s}^\circ(T, p_0) - R_u \ln \frac{p}{p_0} \quad [\text{kJ/kmol} \cdot \text{K}] \quad (1.17)$$

Para mezclas de gases ideales, es necesario tener cuidado al evaluar la  $\Delta s$  de los componentes, ya que la entropía de un gas ideal depende de la presión o el volumen del componente, así como de su temperatura. El cambio de entropía por unidad de masa y de mol de gases individuales en una mezcla de gases ideales durante un proceso se determina por:

$$\Delta s_i = s_{i,2}^o - s_{i,1}^o - R_i \ln \frac{p_{i,2}}{p_{i,1}} \cong c_{p,i} \ln \frac{T_{i,2}}{T_{i,1}} - R_i \ln \frac{p_{i,2}}{p_{i,1}} \quad [\text{kJ/kg} \cdot \text{K}] \quad (1.18)$$

o

$$\Delta \tilde{s}_i = \tilde{s}_{i,2}^o - \tilde{s}_{i,1}^o - R_u \ln \frac{p_{i,2}}{p_{i,1}} \cong \tilde{c}_{p,i} \ln \frac{T_{i,2}}{T_{i,1}} - R_u \ln \frac{p_{i,2}}{p_{i,1}} \quad [\text{kJ/kmol} \cdot \text{K}] \quad (1.19)$$

donde  $p_{i,2}$  y  $p_{i,1}$  son las presiones parciales del componente  $i$ -ésimo de la mezcla a la salida y a la entrada, respectivamente. Las aproximaciones en la (1.18) y (1.19) se utilizan cuando los componentes de la mezcla se comportan como gases perfectos.

#### 1.1.4. Principio de disminución y destrucción de exergía

Un sistema entrega el máximo trabajo posible cuando experimenta un proceso reversible del estado termodinámico inicial especificado al estado de su ambiente, es decir, el estado muerto<sup>2</sup>. Esto representa el potencial de trabajo útil del sistema en el estado especificado y se denomina exergía.

Cabe resaltar que la exergía de un sistema termodinámico en un estado especificado depende de las condiciones del medio (estado muerto) así como de las propiedades del sistema, y que representa el límite superior en la cantidad de trabajo que un dispositivo puede entregar sin violar cualquier ley termodinámica.

La propiedad exergía sirve como una valiosa herramienta en la determinación de la calidad de la energía y en la comparación de los potenciales de trabajo de diferentes fuentes de energía o sistemas.

---

<sup>2</sup> Estado muerto: estado en equilibrio termodinámico con el ambiente.

El principio de disminución de exergía es la contraparte del principio de incremento de entropía, el cual establece que la exergía de un sistema aislado durante un proceso siempre disminuye o, en el caso límite de un proceso reversible, permanece constante; en otros términos, la exergía nunca aumenta y es destruida durante un proceso real.

$$\Delta X_{\text{aislado}} = (X_2 - X_1)_{\text{aislado}} \leq 0 \quad (1.20)$$

La exergía destruida es proporcional a la entropía generada y se expresa como:

$$X_{\text{destruida}} = T_0 \cdot S_{\text{gen}} \geq 0 \quad (1.21)$$

La exergía destruida representa el potencial de trabajo perdido y también se denomina irreversibilidad o trabajo perdido. Las ecuaciones (1.20) y (1.21) para la disminución y la destrucción de exergía son aplicables a cualquier clase de sistema que experimenta cualquier tipo de proceso.

Tomando la dirección positiva de la transferencia de calor hacia el sistema y la dirección positiva de la transferencia desde el sistema, las relaciones generales de balance de exergía pueden expresarse en forma explícita para un volumen de control como:

$$X_{\text{calor}} - X_{\text{trabajo}} + X_{\text{masa,entrada}} - X_{\text{masa,salida}} - X_{\text{destruida}} = (X_2 - X_1)_{\text{VC}} \quad (1.22)$$

o

$$\sum \left( 1 - \frac{T_0}{T_k} \right) \dot{Q}_k - \left[ \dot{W} - p_0 (V_2 - V_1) \right] + \sum_{\text{entrada}} \dot{m} \psi - \sum_{\text{salida}} \dot{m} \psi - \dot{X}_{\text{destruida}} = (X_2 - X_1)_{\text{VC}} \quad (1.23)$$

También puede expresarse en la forma de tasa como:

$$\sum \left( 1 - \frac{T_0}{T_k} \right) \dot{Q}_k - \left[ \dot{W} - p_0 \frac{dV_{\text{VC}}}{dt} \right] + \sum_{\text{entrada}} \dot{m} \psi - \sum_{\text{salida}} \dot{m} \psi - \dot{X}_{\text{destruida}} = \frac{dX_{\text{VC}}}{dt} \quad (1.24)$$

La relación anterior puede enunciarse como: la tasa de cambio de la exergía dentro del volumen de control durante un proceso es igual a la tasa neta de transferencia de exergía a través de la frontera del volumen de control por calor, trabajo y flujo másico menos la tasa de destrucción de exergía dentro de la frontera del volumen de control.

La exergía de flujo (o corriente) se denota por  $\psi$  y se expresa como:

$$\psi = (h - h_0) - T_0 (s - s_0) + \frac{V^2}{2} + gz \quad (1.25)$$

Los sistemas de flujo estacionario no experimentan cambio en sus contenidos de masa, energía, entropía y exergía, así como en sus volúmenes. Entonces la forma de tasa del balance de exergía para un proceso de flujo estacionario se reduce a:

$$\sum \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right) \dot{Q}_k - \dot{W} + \sum_{\text{entrada}} \dot{m}\psi - \sum_{\text{salida}} \dot{m}\psi - \dot{X}_{\text{destruida}} = 0 \quad (1.26)$$

Para un dispositivo de flujo estacionario y una sola corriente, la relación anterior se reduce aún más a:

$$\sum \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right) \dot{Q}_k - \dot{W} + \dot{m}(\psi_1 - \psi_2) - \dot{X}_{\text{destruida}} = 0 \quad (1.27)$$

donde los subíndices 1 y 2 representan los estados de entrada y salida,  $\dot{m}$  es el flujo másico, y el cambio de exergía de una corriente de fluido cuando experimenta un proceso desde el estado 1 hasta el 2 está dado por:

$$\psi_1 - \psi_2 = (h_1 - h_2) - T_0(s_1 - s_2) + \frac{V_1^2 - V_2^2}{2} + g(z_1 - z_2) \quad (1.28)$$

## 1.2. Reacciones químicas: combustión

Cuando se trabaja con sistemas no reactivos, es necesario considerar sólo los cambios en la **energía interna sensible** (asociada a los cambios de temperatura y presión) y la **energía interna latente** (asociada a los cambios de fase). Pero cuando se trabaja con sistemas reactivos, también se debe considerar el cambio en la **energía interna química** (asociada a la destrucción y formación de enlaces químicos entre los átomos).

En la presente sección se trata sobre un tipo particular de reacción química conocida como **combustión**, la cual es una reacción química exotérmica en la que se oxida un combustible convirtiendo su energía química en calor.

Los componentes que existen antes de la reacción reciben el nombre de **reactivos** y los componentes que existen después de la reacción se denominan **productos**.

El comburente u oxidante empleado con mayor frecuencia en los procesos de combustión es el aire atmosférico o húmedo, debido a su disponibilidad inmediata y no demanda un costo.

### 1.2.1. Composición del aire seco

En condiciones ambientales, el aire seco se comporta como una mezcla de gases ideales. Por lo tanto, su composición en base molar coincide con aquella en volumen, como se muestra en la Tabla 1.1. La masa molar media de aire seco es igual a 28.97 kg aire seco/kmol aire seco.

En el análisis de los procesos de combustión se trabaja con una composición simplificada del aire seco en base molar o en volumen, la cual se muestra en la Tabla 1.2.

**Tabla 1.1 - Composición del aire seco en base molar o en volumen.**

Composición del aire seco	Fracción molar porcentual en base molar o en volumen
Oxígeno (O <sub>2</sub> )	20.9 %
Nitrógeno (N <sub>2</sub> )	78.1 %
Argón (Ar)	0.9 %
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	
Helio (He)	
Neón (Ne)	0.1 %
Hidrógeno (H <sub>2</sub> )	

Fuente: Referencia bibliográfica [18].

**Tabla 1.2 - Composición simplificada del aire seco en base molar o en volumen.**

Composición del aire seco	Fracción molar porcentual en base molar o en volumen
Oxígeno (O <sub>2</sub> )	21 %
Nitrógeno (N <sub>2</sub> )	79 %

Fuente: Referencia bibliográfica [18].

Se recuerda que en una mezcla de gases ideales, las fracciones de presión, de volumen y molar de un componente son idénticas en un determinado estado termodinámico.

$$\frac{p_i}{p} = \frac{V_i}{V} = \frac{n_i}{n} = \tilde{x}_i \quad (1.29)$$

La fracción molar porcentual se define como:

$$\tilde{x}_i \% = \frac{n_i}{n} \times 100 = 100\tilde{x}_i \quad (1.30)$$

Cabe recordar que en 1 kmol de aire seco se tendrá 0.21 kmol de oxígeno y 0.79 kmol de nitrógeno. La masa molar del aire seco se determina como:

$$M_{\text{aire seco}} = \tilde{x}_{O_2} M_{O_2} + \tilde{x}_{N_2} M_{N_2}$$

$$M_{\text{aire seco}} = 0.21(32) + 0.79(28) = 28.84 \frac{\text{kg aire seco}}{\text{kmol aire seco}}$$

La fracción en masa de cada componente del aire seco se calcula como:

$$x_{O_2} = \tilde{x}_{O_2} \frac{M_{O_2}}{M_{\text{aire seco}}} = 0.21 \frac{32}{28.84} = 0.233 \frac{\text{kg oxígeno}}{\text{kg aire seco}}$$

$$x_{N_2} = \tilde{x}_{N_2} \frac{M_{N_2}}{M_{\text{aire seco}}} = 0.79 \frac{28}{28.84} = 0.767 \frac{\text{kg nitrógeno}}{\text{kg aire seco}}$$

Se tiene que en 1 kg de aire seco se tendrá 0.233 kg de oxígeno y 0.767 kg de nitrógeno.

La fracción en masa porcentual se define como:

$$x_i \% = \frac{m_i}{m} \times 100 = 100x_i \quad (1.31)$$

En la Tabla 1.3 se muestra la composición del aire seco en base en masa.

**Tabla 1.3 - Composición del aire seco en base en masa.**

<b>Composición del aire seco</b>	<b>Fracción en masa porcentual en base en masa</b>
Oxígeno (O <sub>2</sub> )	23.3 %
Nitrógeno (N <sub>2</sub> )	76.7 %

Fuente: Referencia bibliográfica [18].

A temperaturas de combustión moderadas (por debajo de una temperatura local de 1300 K), el nitrógeno se comporta como un gas inerte y no reacciona con otros elementos químicos. Aun así, influye de manera considerable pues suele entrar a una cámara de combustión en grandes cantidades a temperaturas bajas y salir a temperaturas considerablemente altas, absorbiendo una considerable cantidad de energía química liberada por el combustible durante la combustión.

El vapor de agua total proviene: (i) la combustión del hidrógeno contenido en el combustible con el oxígeno del aire seco, (ii) del vapor de agua del aire atmosférico y (iii) del agua del combustible (si fuera el caso). A temperaturas de combustión moderadas (por debajo de una temperatura local de 2300 K), no se presenta el fenómeno de la disociación y el vapor de agua puede tratarse como un gas inerte.

Sin embargo, a temperaturas muy altas, el vapor de agua se disocia en hidrógeno (H<sub>2</sub>) y oxígeno (O<sub>2</sub>), así como en hidrógeno monoatómico (H), oxígeno monoatómico (O) y en hidroxilo (OH). Estas reacciones químicas son endotérmicas, disminuyendo la temperatura de los gases de combustión.

Cuando los gases de combustión se enfrían por debajo de la temperatura de punto de rocío del vapor de agua, una parte de la humedad se condensa. Por ello, cuando se quema combustibles con presencia de azufre es importante predecir la temperatura de punto de rocío ya que puede formarse ácido sulfúrico, el cual es muy corrosivo y da origen a la lluvia ácida.

### 1.3. Volumen de control reactivo

En la práctica, tanto el aire seco como el atmosférico y los productos de combustión se consideran como una mezcla de gases ideales. A continuación se presentan las hipótesis para los modelos de reacciones de combustión que se tratan en la presente sección:

- El vapor de agua presente en los productos de combustión no se disocia.
- El oxígeno en exceso contenido en los gases de combustión no se disocia.
- Todo el hidrógeno del combustible reacciona con el oxígeno del aire seco para formar agua.
- El vapor de agua proveniente del aire atmosférico permanece inerte y no se disocia.

- El nitrógeno permanece inerte y no reacciona con el oxígeno.

Además, para los sistemas termodinámicos reactivos se cuenta con las siguientes hipótesis:

- Flujo estacionario.
- Propiedades uniformes en cada sección donde el fluido cruza la superficie de control.
- El área de cada sección es plana y perpendicular al vector velocidad del fluido de trabajo.
- Número finito de entradas y salidas.

### 1.3.1. Principio de la conservación de la masa en sistemas reactivos

La masa total de cada elemento se conserva durante una reacción química. Además, el número total de átomos de cada elemento también se conserva durante una reacción química.

Asimismo, se debe cumplir que la masa total de los reactivos es igual a la masa total de los productos. Sin embargo, el número total de moles de los reactivos no es necesariamente igual al número total de moles de los productos. Por consiguiente, el número total de moles no se conserva durante una reacción química.

#### 1.3.1.1. Combustión completa

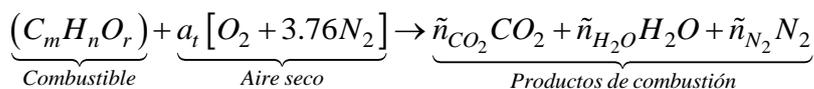
Un proceso de combustión se considera completo si todo el carbono en el combustible se transforma en dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), todo el hidrógeno se transforma en ( $\text{H}_2\text{O}$ ) y todo el azufre, si lo hay, se transforma en dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ).

Cabe recordar que la ceniza en un combustible sólido es químicamente inerte durante una combustión.

#### 1.3.1.2. Combustión estequiométrica o teórica

Es el proceso de combustión ideal durante el cual un combustible se quema por completo con aire estequiométrico o teórico, el cual se define como la mínima cantidad de aire seco necesaria para la combustión completa de un combustible. De esta manera, el oxígeno no estará presente sin combinarse en los productos de combustión. Un proceso de combustión que se lleve a cabo con una cantidad de aire menor al teórico resultará incompleto.

La ecuación de la reacción química de 1 kmol de combustible ( $\text{C}_m\text{H}_n\text{O}_r$ ) con aire seco en un proceso de combustión estequiométrica o teórica se escribe como:



Se tiene 4 ecuaciones del balance de masa de los elementos y 4 incógnitas de la ecuación de la reacción química. Por lo tanto, el sistema se puede resolver.

$$\begin{aligned}
C \quad m = \tilde{n}_{CO_2} & \rightarrow \tilde{n}_{CO_2} = m \text{ kmol } CO_2 / \text{kmol } C_m H_n O_r \\
H \quad n = 2\tilde{n}_{H_2O} & \rightarrow \tilde{n}_{H_2O} = \frac{n}{2} \text{ kmol } H_2O / \text{kmol } C_m H_n O_r \\
O \quad r + 2a_t = 2\tilde{n}_{CO_2} + \tilde{n}_{H_2O} & \rightarrow a_t = m + \frac{n}{4} - \frac{r}{2} \text{ kmol } O_2 / \text{kmol } C_m H_n O_r \\
N \quad 2a_t (3.76) = 2\tilde{n}_{N_2} & \rightarrow \tilde{n}_{N_2} = 3.76a_t \text{ kmol } N_2 / \text{kmol } C_m H_n O_r
\end{aligned}$$

Reemplazando se obtiene:

$$C_m H_n O_r + \left( m + \frac{n}{4} - \frac{r}{2} \right) [O_2 + 3.76N_2] \rightarrow mCO_2 + \frac{n}{2} H_2O + 3.76 \left( m + \frac{n}{4} - \frac{r}{2} \right) N_2$$

La composición de los gases de combustión puede darse tanto en **base seca** como en **base húmeda**. La diferencia radica en que en base seca no se toma en cuenta el vapor de agua presente en los productos de combustión para expresar el número de moles totales de los productos de combustión.

En algunas ocasiones se tiene que las fracciones molares porcentuales de algunos componentes en los gases de combustión son muy pequeñas en comparación a otras. Para ello se suelen utilizar las medidas partes por millón en volumen húmedo o partes por millón en volumen seco del componente i-ésimo, que se definen como:

$$ppmv_i = 10^{-6} \frac{\tilde{n}_i}{\tilde{n}_{g,bh}} = 10^{-6} \tilde{x}_{i,bh}$$

$$ppmvd_i = 10^{-6} \frac{\tilde{n}_i}{\tilde{n}_{g,bs}} = 10^{-6} \tilde{x}_{i,bs}$$

Si se desea determinar el número de moles de agua por mol de combustible presente en el aire atmosférico conociendo la humedad relativa ( $\phi$ ), la temperatura de bulbo seco ( $T_{bs}$ ) y la presión atmosférica ( $p_{atm}$ ) del aire húmedo, se procede de la siguiente manera:

$$\phi = \frac{P_{H_2O,ah}}{P_g @ T_{bs,ah}}$$

Para mezclas de gases ideales y perfectos se cumple:

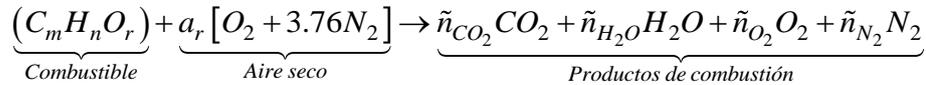
$$\frac{n_{H_2O,ah}}{n_{as} + n_{H_2O,ah}} = \frac{P_{H_2O,ah}}{P_{atm}}$$

Dividiendo el numerador y denominador de la primera fracción entre el número de moles de combustible se obtiene:

$$\frac{\tilde{n}_{H_2O,ah}}{\tilde{n}_{as} + \tilde{n}_{H_2O,ah}} = \frac{P_{H_2O,ah}}{P_{atm}}$$

### 1.3.1.3. Combustión completa con exceso de aire

La ecuación de la reacción química de 1 kmol de combustible ( $C_mH_nO_r$ ) con aire seco en un proceso de combustión completa con exceso de aire se expresa como:



Se define el exceso de aire como sigue:

$$e = \frac{m_{ar} - m_{at}}{m_{at}} = \frac{a_r - a_t}{a_t}$$

Por lo tanto:

$$a_r = (1 + e)a_t$$

Se tiene 4 ecuaciones del balance de masa de los elementos y 4 incógnitas de la ecuación de la reacción química. Por lo tanto, el sistema se puede resolver.

$$\begin{array}{ll} C & m = \tilde{n}_{CO_2} \quad \rightarrow \quad \tilde{n}_{CO_2} = m \text{ kmol } CO_2 / \text{kmol } C_mH_nO_r \\ H & n = 2\tilde{n}_{H_2O} \quad \rightarrow \quad \tilde{n}_{H_2O} = \frac{n}{2} \text{ kmol } H_2O / \text{kmol } C_mH_nO_r \\ O & r + 2a_t = 2\tilde{n}_{CO_2} + \tilde{n}_{H_2O} + 2\tilde{n}_{O_2} \quad \rightarrow \quad \tilde{n}_{O_2} = ea_t \text{ kmol } O_2 / \text{kmol } C_mH_nO_r \\ N & 2a_r(3.76) = 2\tilde{n}_{N_2} \quad \rightarrow \quad \tilde{n}_{N_2} = 3.76a_r \text{ kmol } N_2 / \text{kmol } C_mH_nO_r \end{array}$$

Reemplazando se obtiene:



Donde:

$$a_t = \left( m + \frac{n}{4} - \frac{r}{2} \right)$$

Es interesante observar que el número de moles de oxígeno ( $O_2$ ) libres en los gases de combustión es igual a  $e \cdot a_t$ .

### 1.3.1.4. Combustión incompleta con deficiencia o defecto de aire

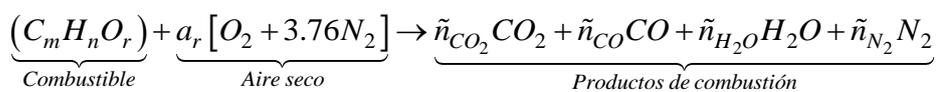
Un proceso de combustión es incompleto si los productos de combustión contienen algo de combustible o componentes inquemados, como C, CO,  $H_2$ , OH, etc.

Una combustión incompleta puede darse por alguna de las siguientes 3 causas:

- Cantidad de aire insuficiente.
- Mezclado insuficiente entre el oxígeno y el combustible durante el limitado tiempo en que quedan en contacto, aun cuando exista una mayor cantidad de oxígeno que la estequiométrica.
- La disociación, la cual se vuelve importante a elevadas temperaturas.

Cabe recordar que el oxígeno posee una mayor afinidad de reaccionar con el hidrógeno que con el carbono. Por lo tanto, el hidrógeno presente en el combustible se quema por completo formando vapor de agua ocasionando que una parte del carbono termine como monóxido de carbono (CO) o como simples partículas (hollín) en los productos.

La ecuación de la reacción química de 1 kmol de combustible ( $C_mH_nO_r$ ) con aire seco en un proceso de combustión incompleta con deficiencia de aire se expresa como:



Se define la deficiencia de aire como sigue:

$$d = \frac{m_{at} - m_{ar}}{m_{at}} = \frac{a_t - a_r}{a_t}$$

Por lo tanto:

$$a_r = (1-d)a_t$$

Se tiene 4 ecuaciones del balance de masa de los elementos y 4 incógnitas de la ecuación de la reacción química. Por lo tanto, el sistema se puede resolver.

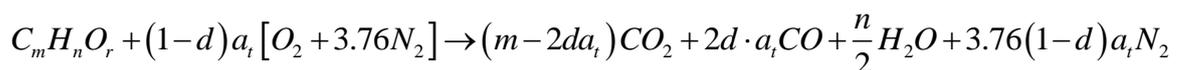
$$C \quad m = \tilde{n}_{CO_2} + \tilde{n}_{CO} \quad \rightarrow \quad \tilde{n}_{CO_2} = m - 2da_t \quad \text{kmol } CO_2 / \text{kmol } C_mH_nO_r$$

$$H \quad n = 2\tilde{n}_{H_2O} \quad \rightarrow \quad \tilde{n}_{H_2O} = \frac{n}{2} \quad \text{kmol } H_2O / \text{kmol } C_mH_nO_r$$

$$O \quad r + 2a_r = 2\tilde{n}_{CO_2} + \tilde{n}_{CO} + \tilde{n}_{H_2O} \quad \rightarrow \quad \tilde{n}_{CO} = 2da_t \quad \text{kmol } CO / \text{kmol } C_mH_nO_r$$

$$N \quad 2a_r(3.76) = 2\tilde{n}_{N_2} \quad \rightarrow \quad \tilde{n}_{N_2} = 3.76a_r \quad \text{kmol } N_2 / \text{kmol } C_mH_nO_r$$

Reemplazando se obtiene:

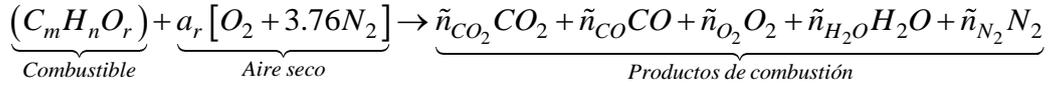


Donde:

$$a_t = \left( m + \frac{n}{4} - \frac{r}{2} \right)$$

### 1.3.1.5. Combustión incompleta con exceso de aire

La ecuación de la reacción química de 1 kmol de combustible ( $C_mH_nO_r$ ) con aire seco en un proceso de combustión incompleta con exceso de aire se expresa como:



Se tiene 4 ecuaciones del balance de masa de los elementos y 5 incógnitas de la ecuación de la reacción química. Por lo tanto, el sistema no se puede resolver a menos que se cuente con un dato adicional o un modelo de combustión que proporcione una ecuación adicional, como la constante de equilibrio  $K_p$  para el equilibrio químico de las mezcla de gases ideales.

$$\begin{aligned} C \quad m &= \tilde{n}_{CO_2} + \tilde{n}_{CO} & \rightarrow \quad \tilde{n}_{CO_2} &= m - \tilde{n}_{CO} \quad \text{kmol } CO_2 / \text{kmol } C_mH_nO_r \\ H \quad n &= 2\tilde{n}_{H_2O} & \rightarrow \quad \tilde{n}_{H_2O} &= \frac{n}{2} \quad \text{kmol } H_2O / \text{kmol } C_mH_nO_r \\ O \quad r + 2a_r &= 2\tilde{n}_{CO_2} + \tilde{n}_{CO} + 2\tilde{n}_{O_2} + \tilde{n}_{H_2O} & \rightarrow \quad \tilde{n}_{O_2} &= \frac{2ea_t + \tilde{n}_{CO}}{2} \quad \text{kmol } O_2 / \text{kmol } C_mH_nO_r \\ N \quad 2a_r(3.76) &= 2\tilde{n}_{N_2} & \rightarrow \quad \tilde{n}_{N_2} &= 3.76a_r \quad \text{kmol } N_2 / \text{kmol } C_mH_nO_r \end{aligned}$$

Donde:

$$a_t = \left( m + \frac{n}{4} - \frac{r}{2} \right)$$

### 1.3.2. Principio de la conservación de la energía en sistemas reactivos

Para poder utilizar la ecuación de conservación de la energía para sistemas termodinámicos reactivos hay que adaptarla para tener en cuenta el cambio de la energía química como consecuencia de la variación de la composición química durante la reacción y debe aparecer en forma explícita el número de moles de los elementos y compuesto por kmol de combustible en los reactantes y productos, puesto que es la forma cómo aparecen en las ecuaciones de las reacciones químicas.

Si se considera que:

$$\Delta \dot{E}_c = \sum_{\text{productos}} \dot{m}_i \left( \frac{V^2}{2} \right)_i - \sum_{\text{reactantes}} \dot{m}_i \left( \frac{V^2}{2} \right)_i \quad (1.32)$$

$$\Delta \dot{E}_p = \sum_{\text{productos}} \dot{m}_i (gz)_i - \sum_{\text{reactantes}} \dot{m}_i (gz)_i \quad (1.33)$$

La ecuación de conservación de la energía para sistemas termodinámicos de flujo estacionario se define como:

$$\begin{aligned}
\dot{Q} - \dot{W} &= \sum_{\text{productos}} \dot{m}_i h_i(T_p, p_p) - \sum_{\text{reactantes}} \dot{m}_i h_i(T_R, p_R) + \Delta \dot{E}_c + \Delta \dot{E}_p \\
\dot{Q} - \dot{W} &= \sum_{\text{productos}} \dot{n}_i M_i h_i(T_p, p_p) - \sum_{\text{reactantes}} \dot{n}_i M_i h_i(T_R, p_R) + \Delta \dot{E}_c + \Delta \dot{E}_p \\
\dot{Q} - \dot{W} &= \sum_{\text{productos}} \dot{n}_i \tilde{h}_i(T_p, p_p) - \sum_{\text{reactantes}} \dot{n}_i \tilde{h}_i(T_R, p_R) + \Delta \dot{E}_c + \Delta \dot{E}_p \quad [\text{W}] \quad (1.34)
\end{aligned}$$

Donde  $\tilde{h}_i(T, p)$  es la entalpía molar o por unidad de mol del componente  $i$ -ésimo a una temperatura y presión dadas [kJ/kmol], y  $\dot{n}_i$  el flujo molar de un producto o reactante cualquiera [kmol/s].

El cálculo de los valores de  $\tilde{h}_i$  introduce una dificultad exclusiva de los sistemas reactivos. Una manera común de presentar estos datos es en forma de tablas. En los apéndices de los libros Cengel [3] y Wark [24] se presentan muchas tablas de datos termodinámicos de gases ideales. Recuérdese, sin embargo, que los valores de entropía de estas tablas dependen de la elección del estado de referencia. En el presente trabajo, para el cálculo de las entalpías molares se utilizarán las tablas termodinámicas JANAF del programa de equilibrio de la NASA (ver apartado 1.4).

Se introduce el concepto de **entalpía de formación** de un compuesto, la cual se define como la variación de entalpía que tiene lugar cuando se forma 1 kmol de compuesto a partir de sus elementos en el estado estable, cuando el compuesto y sus elementos se encuentran en el mismo estado termodinámico de referencia.

La entalpía de formación de un compuesto químico a la temperatura  $T_{ref}$  y a la presión  $p_{ref}$  se expresa como:

$$\Delta \tilde{h}_f(T_{ref}, p_{ref}) = \tilde{h}_{\text{compuesto}}(T_{ref}, p_{ref}) - \sum_{\substack{\text{elementos} \\ \text{estables}}} \tilde{n}_i \tilde{h}_i(T_{ref}, p_{ref}) \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kmol compuesto}} \right] \quad (1.35)$$

La entalpía de un compuesto químico a la temperatura  $T_{ref}$  y a la presión  $p_{ref}$  se expresa como:

$$\tilde{h}_{\text{compuesto}}(T_{ref}, p_{ref}) = \Delta \tilde{h}_f(T_{ref}, p_{ref}) + \sum_{\substack{\text{elementos} \\ \text{estables}}} \tilde{n}_i \tilde{h}_i(T_{ref}, p_{ref}) \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kmol compuesto}} \right] \quad (1.36)$$

Para unificar los datos de  $\Delta \tilde{h}_f$ , el estado de referencia elegido es 25 °C (298 K) y 1 atm, que se conoce como el estado de referencia estándar.

En el cálculo de la entalpía de formación se considera que la entalpía de un elemento en su estado estable a la temperatura de 25 °C y 1 atm de presión es cero,  $\tilde{h}_{\text{elemento estable}}(298 \text{ K}, 1 \text{ atm}) = 0 \text{ kJ/kmol de compuesto}$ .

La entalpía de formación de un elemento en su estado estable a la temperatura de 25 °C y 1 atm de presión es cero,  $(\Delta\tilde{h}_{f,298}^{\circ})_{\text{elemento estable}} = 0$  kJ/kmol de elemento. La entalpía por unidad de mol de un elemento en su estado estable a la temperatura y presión de 25 °C y 1 atm, respectivamente, es cero  $\tilde{h}_{i,\text{elemento estable}}(298\text{ K}, 1\text{ atm}) = 0$  kJ/kmol de elemento.

La ecuación (1.36) queda expresada como:

$$\tilde{h}_{\text{compuesto}}(298\text{ K}, 1\text{ atm}) = \Delta\tilde{h}_{f,298}^{\circ} \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kmol compuesto}} \right] \quad (1.37)$$

Cuando la entalpía de formación de un compuesto tiene signo negativo significa que la reacción es exotérmica, y viceversa. Por otro lado, cuando se evalúa la entalpía de un compuesto a una temperatura  $T$  y una presión  $p$  dadas, diferentes de las del estado de referencia estándar se debe sumar a la ecuación (1.37) la variación de entalpía entre el estado de referencia a 25 °C y 1 atm y el estado termodinámico especificado. Esto es:

$$\tilde{h}_{\text{compuesto}}(T, p) = \underbrace{\Delta\tilde{h}_{f,298}^{\circ}}_1 + \underbrace{\tilde{h}_{T,p} - \tilde{h}_{298}^{\circ}}_2 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kmol compuesto}} \right] \quad (1.38)$$

Así, la entalpía de un compuesto puro cualquiera se compone de dos partes, la asociada con su formación a partir de sus elementos estables en un estado de referencia y la ligada a un cambio de estado a composición constante.

Substituyendo la expresión (1.38) en la ecuación (1.34) se obtiene:

$$\begin{aligned} \dot{Q} - \dot{W} = & \sum_{\text{productos}} \dot{n}_i (\Delta\tilde{h}_{f,298}^{\circ} + \tilde{h}_{T,p} - \tilde{h}_{298}^{\circ})_i - \sum_{\text{reactantes}} \dot{n}_i (\Delta\tilde{h}_{f,298}^{\circ} + \tilde{h}_{T,p} - \tilde{h}_{298}^{\circ})_i \\ & + \Delta\dot{E}_c + \Delta\dot{E}_p \quad [\text{W}] \end{aligned} \quad (1.39)$$

Se recuerda que para el caso de gases ideales, la entalpía es función sólo de la temperatura, por lo tanto:

$$\begin{aligned} \dot{Q} - \dot{W} = & \sum_{\text{productos}} \dot{n}_i (\Delta\tilde{h}_{f,298}^{\circ} + \tilde{h}_T - \tilde{h}_{298}^{\circ})_i - \sum_{\text{reactantes}} \dot{n}_i (\Delta\tilde{h}_{f,298}^{\circ} + \tilde{h}_T - \tilde{h}_{298}^{\circ})_i \\ & + \Delta\dot{E}_c + \Delta\dot{E}_p \quad [\text{W}] \end{aligned} \quad (1.40)$$

Como los cálculos en combustión se suelen basar en la cantidad de combustible que está presente, es habitual reescribir la ecuación de la conservación de la energía por unidad de mol de combustible. Por lo tanto, el calor que cruza la superficie de control por unidad de mol de combustible, el trabajo intercambiado en la superficie de control por unidad de mol de combustible y el número de moles del componente  $i$ -ésimo por unidad de mol de combustible se expresan como:

$$\tilde{q} = \frac{\dot{Q}}{\dot{n}_{\text{combustible}}}; \quad \tilde{w} = \frac{\dot{W}}{\dot{n}_{\text{combustible}}}; \quad \tilde{n}_i = \frac{\dot{n}_i}{\dot{n}_{\text{combustible}}}$$

Dividiendo la (1.40) entre el flujo molar de combustible se obtiene:

$$\begin{aligned} \tilde{q} - \tilde{w} = & \sum_{\text{productos}} \tilde{n}_i \left( \Delta \tilde{h}_{f,298}^{\circ} + \tilde{h}_{T,p} - \tilde{h}_{298}^{\circ} \right)_i - \sum_{\text{reactantes}} \tilde{n}_i \left( \Delta \tilde{h}_{f,298}^{\circ} + \tilde{h}_{T,p} - \tilde{h}_{298}^{\circ} \right)_i \\ & + \Delta \tilde{e}_c + \Delta \tilde{e}_p \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kmol combustible}} \right] \end{aligned} \quad (1.41)$$

Para gases ideales:

$$\begin{aligned} \tilde{q} - \tilde{w} = & \sum_{\text{productos}} \tilde{n}_i \left( \Delta \tilde{h}_{f,298}^{\circ} + \tilde{h}_T - \tilde{h}_{298}^{\circ} \right)_i - \sum_{\text{reactantes}} \tilde{n}_i \left( \Delta \tilde{h}_{f,298}^{\circ} + \tilde{h}_T - \tilde{h}_{298}^{\circ} \right)_i \\ & + \Delta \tilde{e}_c + \Delta \tilde{e}_p \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kmol combustible}} \right] \end{aligned} \quad (1.42)$$

La **entalpía de reacción** se define como la diferencia entre la entalpía de los productos en un estado termodinámico específico y la entalpía de los reactivos en el mismo estado.

El cambio en la entalpía durante una reacción química de un proceso de combustión se define como:

$$\begin{aligned} \Delta \tilde{h}_R(T, p) = & \sum_{\text{productos}} \tilde{n}_i \left( \Delta \tilde{h}_{f,298}^{\circ} + \tilde{h}_{T,p} - \tilde{h}_{298}^{\circ} \right)_i - \sum_{\text{reactantes}} \tilde{n}_i \left( \Delta \tilde{h}_{f,298}^{\circ} + \tilde{h}_{T,p} - \tilde{h}_{298}^{\circ} \right)_i \\ & \left[ \text{kJ/kmol combustible} \right] \end{aligned} \quad (1.43)$$

Para gases ideales:

$$\begin{aligned} \Delta \tilde{h}_R(T) = & \sum_{\text{productos}} \tilde{n}_i \left( \Delta \tilde{h}_{f,298}^{\circ} + \tilde{h}_T - \tilde{h}_{298}^{\circ} \right)_i - \sum_{\text{reactantes}} \tilde{n}_i \left( \Delta \tilde{h}_{f,298}^{\circ} + \tilde{h}_T - \tilde{h}_{298}^{\circ} \right)_i \\ & \left[ \text{kJ/kmol combustible} \right] \end{aligned} \quad (1.44)$$

El valor de la entalpía de reacción en el estado estándar de referencia se expresa como:

$$\Delta \tilde{h}_{R,298}^{\circ} = \sum_{\text{productos}} \tilde{n}_i \left( \Delta \tilde{h}_{f,298}^{\circ} \right)_i - \sum_{\text{reactantes}} \tilde{n}_i \left( \Delta \tilde{h}_{f,298}^{\circ} \right)_i \quad \left[ \text{kJ/kmol combustible} \right] \quad (1.45)$$

Separando los términos en el segundo miembro de la ecuación (1.41) y sustituyendo la ecuación (1.45), la ecuación de conservación de la energía para un sistema reactivo de flujo permanente se expresa como:

$$\begin{aligned} \tilde{q} - \tilde{w} = & \Delta \tilde{h}_{R,298}^{\circ} + \sum_{\text{productos}} \tilde{n}_i \left( \tilde{h}_{T,p} - \tilde{h}_{298}^{\circ} \right)_i - \sum_{\text{reactantes}} \tilde{n}_i \left( \tilde{h}_{T,p} - \tilde{h}_{298}^{\circ} \right)_i + \Delta \tilde{e}_c + \Delta \tilde{e}_p \\ & \left[ \text{kJ/kmol combustible} \right] \end{aligned} \quad (1.46)$$

Para gases ideales:

$$\tilde{q} - \tilde{w} = \Delta \tilde{h}_{R,298}^{\circ} + \sum_{\text{productos}} \tilde{n}_i (\tilde{h}_T - \tilde{h}_{298})_i - \sum_{\text{reactantes}} \tilde{n}_i (\tilde{h}_T - \tilde{h}_{298})_i + \Delta \tilde{e}_c + \Delta \tilde{e}_p \quad (1.47)$$

[kJ/kmol combustible]

Se define la **entalpía de combustión de un combustible** como la entalpía de reacción por unidad de mol de combustible en el estado de referencia estándar durante un proceso de combustión completa.

$$\Delta \tilde{h}_c = \Delta \tilde{h}_{R,298}^{\circ} = \sum_{\text{productos}} \tilde{n}_i (\Delta \tilde{h}_{f,298}^{\circ})_i - \sum_{\text{reactantes}} \tilde{n}_i (\Delta \tilde{h}_{f,298}^{\circ})_i \quad [\text{kJ/kmol combustible}] \quad (1.48)$$

También puede definirse como la cantidad de calor liberado durante la combustión completa (con aire estequiométrico o con exceso de aire) de 1 kmol de combustible en un proceso de flujo estable cuando tanto los reactivos como los productos se encuentran en el estado de referencia estándar.

Considerando un proceso de combustión que no incluye interacciones de trabajo y que los cambios en las energías cinética y potencial son insignificantes, se obtiene:

$$\tilde{q} - \tilde{w} = \Delta \tilde{h}_{R,298}^0 + \sum_{\text{productos}} \tilde{n}_i (\tilde{h}_T - \tilde{h}_{298})_i - \sum_{\text{reactantes}} \tilde{n}_i (\tilde{h}_T - \tilde{h}_{298})_i + \Delta \tilde{e}_c + \Delta \tilde{e}_p$$

$$\tilde{q} - \overset{=0}{\tilde{w}} = \Delta \tilde{h}_{R,298}^0 + \overbrace{\sum_{\text{productos}} \tilde{n}_i (\tilde{h}_T - \tilde{h}_{298})_i}^{=0} - \overbrace{\sum_{\text{reactantes}} \tilde{n}_i (\tilde{h}_T - \tilde{h}_{298})_i}^{=0} + \overset{=0}{\Delta \tilde{e}_c} + \overset{=0}{\Delta \tilde{e}_p}$$

$$\tilde{q} = \Delta \tilde{h}_{R,298}^0 = \Delta \tilde{h}_c \quad [\text{kJ/kmol combustible}] \quad (1.49)$$

El **poder calorífico de un combustible** es la cantidad de calor liberado durante la combustión completa de 1 kg de combustible en un proceso de flujo estable cuando los reactivos y productos se encuentran en el estado de referencia estándar.

$$PC = \frac{|\Delta \tilde{h}_c|}{M_{\text{combustible}}} \quad [\text{kJ/kg combustible}] \quad (1.50)$$

El valor del poder calorífico depende de la fase del agua en los productos de combustión: el poder calorífico superior (PCS) cuando el agua en los productos de combustión está en forma líquida y el poder calorífico inferior (PCI) cuando el agua en los productos de combustión está en forma de vapor. Ambos poderes caloríficos se relacionan por medio de la siguientes expresiones:

$$PCS = PCI + \frac{m_{H_2O,g}}{m_{\text{combustible}}} h_{fg,H_2O@25^\circ C} \quad [\text{kJ/kg combustible}] \quad (1.51)$$

$$PCS = PCI + \tilde{n}_{H_2O,g} \frac{M_{H_2O}}{M_{\text{combustible}}} h_{fg,H_2O@25^\circ C} \quad [\text{kJ/kg combustible}] \quad (1.52)$$

### 1.3.3. Principio del incremento de la entropía

El análisis termodinámico de un proceso resulta incompleto sin el estudio de los aspectos de la segunda ley. Resulta interesante evaluar la exergía y la destrucción de exergía, ambas relacionadas con la entropía. Cabe resaltar que las entropías de los constituyentes individuales siempre se deben evaluar de manera apropiada con una base común.

El balance de entropía para un sistema abierto o volumen de control se expresa mediante la ecuación (1.13) como:

$$\underbrace{\sum \frac{\dot{Q}_k}{T_k}}_{\substack{\text{Tasa de transferencia} \\ \text{neta de entropía} \\ \text{por calor}}} + \underbrace{\sum \dot{m}_{\text{entrada}} s_{\text{entrada}} - \sum \dot{m}_{\text{salida}} s_{\text{salida}}}_{\substack{\text{Tasa de transferencia neta} \\ \text{de entropía por masa}}} + \underbrace{\dot{S}_{\text{gen}}}_{\substack{\text{Tasa de} \\ \text{generación} \\ \text{de entropía} \\ \text{dentro del VC}}} = \underbrace{\frac{dS_{\text{VC}}}{dt}}_{\substack{\text{Tasa de cambio} \\ \text{de entropía} \\ \text{dentro del VC}}} \quad [\text{kW/K}] \quad (1.13)$$

donde  $T_k$  es la temperatura absoluta en la superficie de control donde  $\dot{Q}_k$  la cruza. Para el caso de flujo estacionario, la (1.13) se transforma en la ecuación (1.14).

$$\dot{S}_{\text{gen}} = \sum \dot{m}_{\text{salida}} s_{\text{salida}} - \sum \dot{m}_{\text{entrada}} s_{\text{entrada}} - \sum \frac{\dot{Q}_k}{T_k} \quad (1.14)$$

Para el caso de un sistema termodinámico reactivo, la (1.14) se expresa como:

$$\dot{S}_{\text{gen}} = \sum_{\text{productos}} \dot{m}_{i,p} s_{i,p}(T_p, p_{i,p}) - \sum_{\text{reactantes}} \dot{m}_{i,R} s_{i,R}(T_R, p_{i,R}) - \sum \frac{\dot{Q}_k}{T_k} \quad [\text{kW/K}]$$

$$\dot{S}_{\text{gen}} = \sum_{\text{productos}} \dot{n}_{i,p} M_{i,p} s_{i,p}(T_p, p_{i,p}) - \sum_{\text{reactantes}} \dot{n}_{i,R} M_{i,R} s_{i,R}(T_R, p_{i,R}) - \sum \frac{\dot{Q}_k}{T_k} \quad [\text{kW/K}]$$

$$\dot{S}_{\text{gen}} = \sum_{\text{productos}} \dot{n}_{i,p} \tilde{s}_{i,p}(T_p, p_{i,p}) - \sum_{\text{reactantes}} \dot{n}_{i,R} \tilde{s}_{i,R}(T_R, p_{i,R}) - \sum \frac{\dot{Q}_k}{T_k} \quad [\text{kW/K}]$$

Dividiendo entre el flujo molar de combustible  $\dot{n}_{\text{combustible}}$  se obtiene:

$$\tilde{s}_{\text{gen}} = \underbrace{\sum_{\text{productos}} \tilde{n}_{i,p} \tilde{s}_{i,p}(T_p, p_{i,p}) - \sum_{\text{reactantes}} \tilde{n}_{i,R} \tilde{s}_{i,R}(T_R, p_{i,R})}_{\substack{\text{Transferencia neta de entropía por masa}}} - \underbrace{\sum \frac{\tilde{q}_k}{T_k}}_{\substack{\text{Transferencia neta} \\ \text{de entropía por calor}}} \quad [\text{kW/K}] \quad (1.53)$$

donde:

$$\sum \frac{\tilde{q}_k}{T_k} = \sum_k \frac{\tilde{q}_{\text{entrada},k}}{T_k} - \sum_k \frac{\tilde{q}_{\text{salida},k}}{T_k}$$

La entropía por unidad de mol del componente  $i$ -ésimo de una mezcla de gases ideales a la temperatura ( $T$ ) y a la componente de presión ( $p_i$ ) se expresa como:

$$\tilde{s}_{i,ideal}(T, p_i) = \tilde{s}_i^\circ(T) - R_u \ln \frac{p_i}{p^\circ} + \tilde{s}_i(T_{ref}, p_{ref}) \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kmol del componente-i} \cdot \text{K}} \right] \quad (1.54)$$

Cabe recordar que la entropía de una sustancia pura cristalina a la temperatura absoluta de cero Kelvin es cero. Además, si se sustituye el valor de  $p^\circ$  por una atmósfera en la (1.54) se obtiene:

$$\tilde{s}_{i,ideal}(T, p_i) = \tilde{s}_i^\circ(T) - R_u \ln p_i \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kmol del componente-i} \cdot \text{K}} \right] \quad (1.55)$$

Donde la componente de presión o presión parcial del componente  $i$ -ésimo ( $p_i$ ) se expresa en atmósferas.

Sustituyendo la (1.29) y la (1.55) en la (1.53) se obtiene:

$$\begin{aligned} \tilde{s}_{gen} = & \sum_{\text{productos}} \tilde{n}_{i,p} \left( \tilde{s}_{i,p}^\circ(T) - R_u \ln \tilde{x}_{i,p} p_p \right) - \sum_{\text{reactantes}} \tilde{n}_{i,R} \left( \tilde{s}_{i,R}^\circ(T) - R_u \ln \tilde{x}_{i,R} p_R \right) \\ & - \sum \frac{\tilde{q}_k}{T_k} \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kmol de combustible} \cdot \text{K}} \right] \end{aligned} \quad (1.56)$$

Donde  $p_p$  y  $p_R$  son las presiones absolutas de las mezclas de gases ideales de los productos y reactivos expresadas en atmósferas.

En la expresión (1.56) es importante saber si el combustible y el aire entran por separados o premezclados, puesto que esta información influirá en la determinación de las fracciones molares de los reactivos ( $\tilde{x}_{i,R}$ ).

En la presente tesis, se presenta el caso en el que el combustible y el aire seco entran por separado. De este modo, en la expresión (1.56), las fracciones molares del combustible y del oxígeno y nitrógeno presentes en el aire seco valdrán 1, 0.21 y 0.79 respectivamente.

#### 1.3.4. Principio de disminución y destrucción de exergía

Existen dos formas de hallar la exergía destruida: desarrollando un balance exergético en el volumen de control o a partir de la entropía generada.

Para la primera forma, según la convención de signos de la termodinámica, el balance de exergía para un sistema abierto o volumen de control se define como:

$$\begin{aligned}
& \underbrace{\sum \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right) \dot{Q}_k}_{\text{Tasa de transferencia neta de exergía por calor}} - \underbrace{\left(\dot{W} - p_0 \frac{dV_{VC}}{dt}\right)}_{\text{Tasa de transferencia neta de exergía por trabajo}} \\
& + \underbrace{\sum_{\text{entradas}} \dot{m}_{\text{entrada}} \psi_{\text{entrada}} - \sum_{\text{salidas}} \dot{m}_{\text{salida}} \psi_{\text{salida}}}_{\text{Tasa de transferencia neta de exergía por masa}} - \underbrace{\dot{X}_{\text{destruida}}}_{\text{Tasa de destrucción de exergía}} = \underbrace{\frac{dX_{VC}}{dt}}_{\text{Tasa de cambio de exergía dentro del VC}}
\end{aligned} \tag{1.57}$$

Si el flujo es estacionario y el volumen de control no varía en el tiempo, se obtiene:

$$\sum \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right) \dot{Q}_k - \dot{W} + \sum_{\text{entradas}} \dot{m}_{\text{entrada}} \psi_{\text{entrada}} - \sum_{\text{salidas}} \dot{m}_{\text{salida}} \psi_{\text{salida}} - \dot{X}_{\text{destruida}} = 0 \tag{1.58}$$

La segunda forma se utilizará para comprobar lo hallado en la ecuación (1.58). La exergía destruida por mol de combustible se define como:

$$\tilde{x}_{\text{destruida}} = T_0 \cdot \tilde{s}_{\text{gen}} = \tilde{w}_{\text{reversible}} - \tilde{w}_{\text{real}} \quad [\text{kJ/kmol combustible}] \tag{1.59}$$

Donde  $T_0$  es la temperatura absoluta de los alrededores,  $\tilde{s}_{\text{gen}}$  es la entropía generada por unidad de mol de combustible,  $\tilde{w}_{\text{reversible}}$  es el trabajo reversible por unidad de mol de combustible y  $\tilde{w}_{\text{real}}$  es el trabajo real por mol de combustible realizado durante el proceso de combustión.

Cuando el proceso de combustión no involucra trabajo real, el trabajo reversible y la exergía destruida por unidad de mol de combustible son idénticos.

#### 1.4. Determinación de la entalpía y entropía molares según las tablas termodinámicas JANAF<sup>3</sup>

Cuando se realizan un gran número de cálculos o se requiere una alta precisión, los cálculos de procesos en ingeniería se llevan a cabo en un computador. Las relaciones con el modelo de composición y/o propiedades termodinámicas de las mezclas de gases sin quemar y quemadas se han desarrollado para el uso en un computador. Estos varían considerablemente en el rango de aplicación y precisión.

Los modelos más completos están basados en la curva polinómica que se ajusta a los datos termodinámicos para cada especie en la mezcla y los supuestos de que (1) la mezcla no quemada se congela en la composición y (2) la mezcla quemada está en equilibrio. El enfoque utilizado como base para la representación de los datos de la tabla termodinámica JANAF [21] en el programa de equilibrio de la NASA<sup>4</sup> se resume aquí, ya que es

<sup>3</sup> JANAF: Joint Army-Navy-NASA-Air Force Interagency Propulsion Committee.

<sup>4</sup> Programa desarrollado por el Centro de Investigación Lewis de la NASA durante los últimos 45 años y que se orienta a calcular las composiciones químicas en equilibrio y propiedades de mezclas complejas, incluyendo determinados estados termodinámicos. Asociado con el programa se encuentran bases de datos independientes con propiedades de transporte y propiedades termodinámicas de especies individuales.

coherente con el enfoque utilizado para calcular propiedades de la mezcla sin quemar y quemadas.

Para cada especie  $i$  en su estado estándar a la temperatura  $T$  (K), la entalpía de estado estándar de la especie  $i$  está dada entonces por:

$$\frac{\tilde{h}_i}{R_u T} = a_{i1} + \frac{a_{i2}}{2} T + \frac{a_{i3}}{3} T^2 + \frac{a_{i4}}{4} T^3 + \frac{a_{i5}}{5} T^4 + \frac{a_{i6}}{T}$$

Asimismo, la entropía de la especie  $i$  en su estado estándar se expresa como sigue:

$$\frac{\tilde{s}_i^\circ}{R_u} = a_{i1} \ln T + a_{i2} T + \frac{a_{i3}}{2} T^2 + \frac{a_{i4}}{3} T^3 + \frac{a_{i5}}{4} T^4 + a_{i7}$$

Los valores de los coeficientes  $a_{ij}$  para CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CO, H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, OH, NO, O y H del programa de la NASA se dan en la Tabla 1.4. Se presentan dos rangos de temperatura: el rango de 300 K a 1000 K es apropiado para los cálculos de propiedades de la mezcla sin quemar; y el rango de 1000 K a 5000 K es apropiado para los cálculos de propiedades de la mezcla quemada.

Tabla 1.4 - Coeficientes para las propiedades termodinámicas de las especies.

Especie	Rango de Temperatura (K)	$a_{i1}$	$a_{i2}$	$a_{i3}$	$a_{i4}$	$a_{i5}$	$a_{i6}$	$a_{i7}$
CO <sub>2</sub>	1000 – 5000	0.44608x10 <sup>1</sup>	0.30982x10 <sup>-2</sup>	-0.12393x10 <sup>-5</sup>	0.22741x10 <sup>-9</sup>	-0.15526x10 <sup>-13</sup>	-0.48961x10 <sup>5</sup>	-0.98636x10 <sup>0</sup>
	300 – 1000	0.24008x10 <sup>1</sup>	0.87351x10 <sup>-2</sup>	-0.66071x10 <sup>-5</sup>	0.20022x10 <sup>-8</sup>	0.63274x10 <sup>-15</sup>	-0.48378x10 <sup>5</sup>	0.96951x10 <sup>1</sup>
H <sub>2</sub> O	1000 – 5000	0.27168x10 <sup>1</sup>	0.29451x10 <sup>-2</sup>	-0.80224x10 <sup>-6</sup>	0.10227x10 <sup>-9</sup>	-0.48472x10 <sup>-14</sup>	-0.29906x10 <sup>5</sup>	0.66306x10 <sup>1</sup>
	300 – 1000	0.40701x10 <sup>1</sup>	-0.11084x10 <sup>-2</sup>	0.41521 x10 <sup>-5</sup>	-0.29637x10 <sup>-8</sup>	0.80702x10 <sup>-12</sup>	-0.30280x10 <sup>5</sup>	-0.32270x10 <sup>0</sup>
CO	1000 – 5000	0.29841x10 <sup>1</sup>	0.14891x10 <sup>-2</sup>	-0.57900x10 <sup>-6</sup>	0.10365x10 <sup>-9</sup>	-0.69354x10 <sup>-14</sup>	-0.14245x10 <sup>5</sup>	0.63479x10 <sup>1</sup>
	300 – 1000	0.37101x10 <sup>1</sup>	-0.16191x10 <sup>-2</sup>	0.36924x10 <sup>-5</sup>	-0.20320x10 <sup>-8</sup>	0.23953x10 <sup>-12</sup>	-0.14356x10 <sup>5</sup>	0.29555x10 <sup>1</sup>
H <sub>2</sub>	1000 – 5000	0.31002x10 <sup>1</sup>	0.51119x10 <sup>-3</sup>	0.52644x10 <sup>-7</sup>	-0.34910x10 <sup>-10</sup>	0.36945x10 <sup>-14</sup>	-0.87738x10 <sup>3</sup>	-0.19629x10 <sup>1</sup>
	300 – 1000	0.30574x10 <sup>1</sup>	0.26765x10 <sup>-2</sup>	-0.58099x10 <sup>-5</sup>	0.55210 x10 <sup>-8</sup>	-0.18123x10 <sup>-11</sup>	-0.98890x10 <sup>3</sup>	-0.22997x10 <sup>1</sup>
O <sub>2</sub>	1000 – 5000	0.36220x10 <sup>1</sup>	0.73618x10 <sup>-3</sup>	-0.19652x10 <sup>-6</sup>	0.36202x10 <sup>-10</sup>	-0.28946x10 <sup>-14</sup>	-0.12020x10 <sup>4</sup>	0.36151x10 <sup>1</sup>
	300 – 1000	0.36256x10 <sup>1</sup>	-0.18782x10 <sup>-2</sup>	0.70555x10 <sup>-5</sup>	-0.67635x10 <sup>-8</sup>	0.21556x10 <sup>-11</sup>	-0.10475x10 <sup>4</sup>	0.43053x10 <sup>1</sup>
N <sub>2</sub>	1000 – 5000	0.28963x10 <sup>1</sup>	0.15155x10 <sup>-2</sup>	-0.57235x10 <sup>-6</sup>	0.99807x10 <sup>-10</sup>	-0.65224x10 <sup>-14</sup>	-0.90586x10 <sup>3</sup>	0.61615x10 <sup>1</sup>
	300 – 1000	0.36748x10 <sup>1</sup>	-0.12082x10 <sup>-2</sup>	0.23240x10 <sup>-5</sup>	-0.63218x10 <sup>-9</sup>	-0.22577x10 <sup>-12</sup>	-0.10612x10 <sup>4</sup>	0.23580x10 <sup>1</sup>
OH	1000 – 5000	0.29106x10 <sup>1</sup>	0.95932x10 <sup>-3</sup>	-0.19442x10 <sup>-6</sup>	0.13757x10 <sup>-10</sup>	0.14225x10 <sup>-15</sup>	0.39354x10 <sup>4</sup>	0.54423x10 <sup>1</sup>
NO	1000 – 5000	0.31890x10 <sup>1</sup>	0.13382x10 <sup>-2</sup>	-0.52899x10 <sup>-6</sup>	0.95919x10 <sup>-10</sup>	-0.64848x10 <sup>-14</sup>	0.98283x10 <sup>4</sup>	0.67458x10 <sup>1</sup>
O	1000 – 5000	0.25421x10 <sup>1</sup>	-0.27551x10 <sup>-4</sup>	-0.31028x10 <sup>-8</sup>	0.45511x10 <sup>-11</sup>	-0.43681x10 <sup>-15</sup>	0.29231x10 <sup>5</sup>	0.49203x10 <sup>1</sup>
H	1000 – 5000	0.25x10 <sup>1</sup>	0.0	0.0	0.0	0.0	0.25472x10 <sup>5</sup>	-0.46012 x10 <sup>0</sup>

Fuente: NASA Equilibrium Code.



## Capítulo 2

### Análisis termodinámico y definición de indicadores energéticos y de producción en hornillas paneleras en fase de diseño u operación<sup>5</sup>

En la hornilla panelera se definen dos volúmenes de control: uno en la cámara de combustión en donde se realiza la quema del bagazo y otro en el ducto de humos donde fluyen los gases producto de la combustión (ver Figura 2.1). Los términos que aparecen en dicha figura se pueden leer en la nomenclatura de esta tesis.

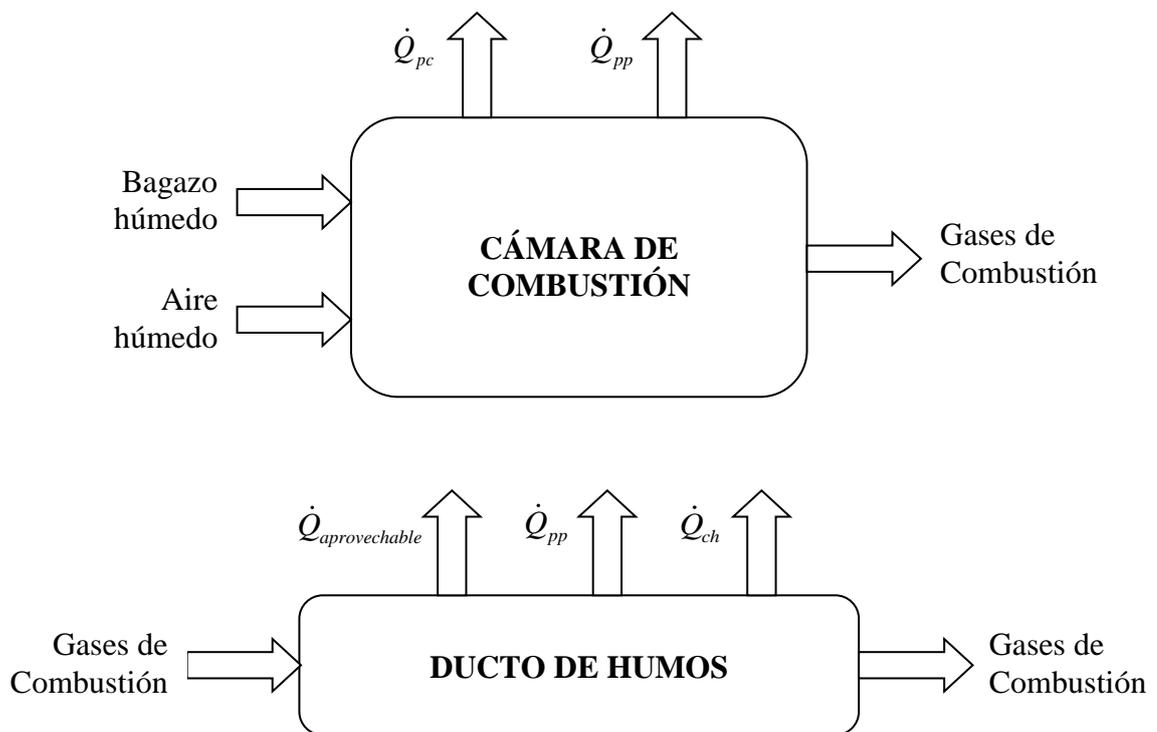


Figura 2.1 - Esquema de análisis del sistema termodinámico simplificado.  
Fuente: Elaboración propia.

En adición, en la Figura 2.2 se aprecia el esquema básico de una hornilla panelera y sus componentes.

<sup>5</sup> El presente capítulo ha sido elaborado utilizando las referencias bibliográficas [8], [11], [13], [14] y [19].

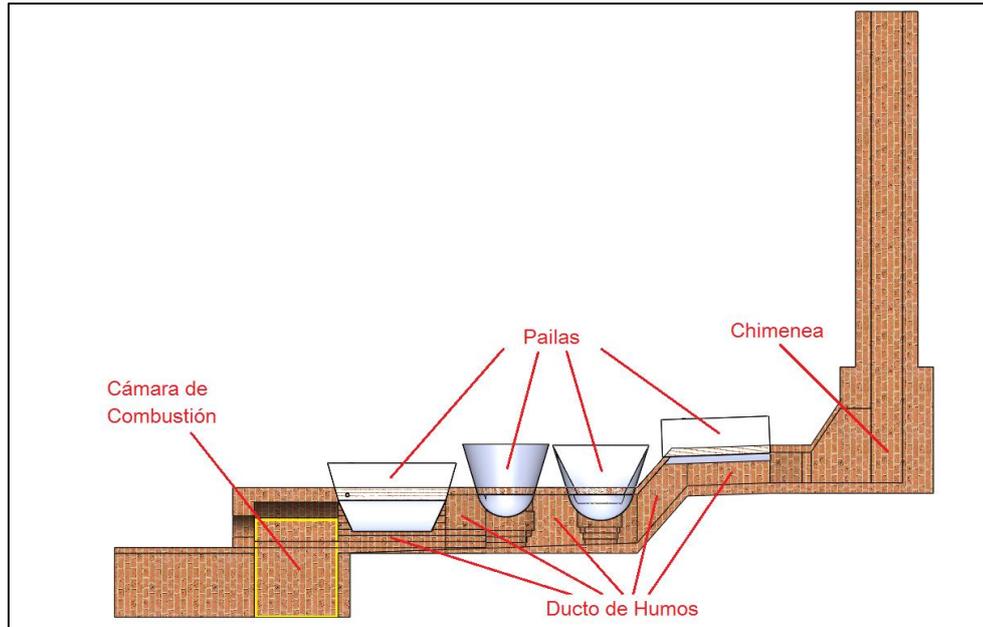


Figura 2.2 – Esquema de una hornilla panelera y sus componentes.  
Fuente: Elaboración propia.

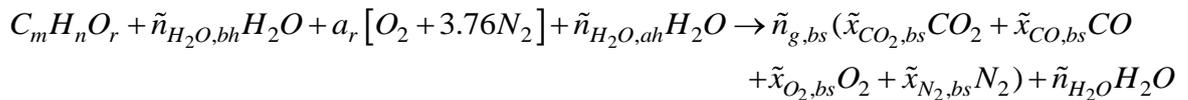
## 2.1. Cámara de combustión

### 2.1.1. Balance de masa

La composición química del bagazo seco se considera como  $C_{0.2984}H_{0.4918}O_{0.2097}$  (Hugot, 1986). Por lo tanto, su peso molecular se expresa como:

$$M_{\text{bagazo seco}} = 12.011 \cdot m + 1.008 \cdot n + 15.999 \cdot r = 7.4348 \text{ kg/kmol}$$

Se considera que a la cámara de combustión ingresa bagazo húmedo, con 30% de humedad aproximadamente, y aire atmosférico con una humedad relativa de 60%, y se producen gases de combustión y residuos u hollín (que no será considerado en el análisis). La ecuación química para la combustión incompleta con exceso de aire húmedo y bagazo húmedo es la siguiente:



Normalmente, del analizador de gases se obtienen la composición en base seca del  $CO_2$ ,  $CO$  y  $O_2$  en forma de fracción molar. Por ello, la anterior ecuación presenta 6 incógnitas: el número de moles de agua en el bagazo húmedo por mol de combustible en base seca ( $\tilde{n}_{H_2O,bh}$ ), la cantidad de moles de oxígeno real por mol de combustible en base seca ( $a_r$ ), el número de moles de agua en el aire húmedo por mol de combustible en base seca ( $\tilde{n}_{H_2O,ah}$ ), el número de moles de los gases de combustión en base seca por mol de combustible en base seca ( $\tilde{n}_{g,bs}$ ), la fracción molar de nitrógeno en base seca ( $\tilde{x}_{N_2,bs}$ ) y el número de moles de agua en los gases de combustión por mol de combustible en base seca ( $\tilde{n}_{H_2O}$ ).

Con los datos de humedad y masa molar del bagazo combustible, y la masa molar del agua, se puede calcular el número de moles de agua presentes en el bagazo de la siguiente manera:

$$\phi_{bagazo} = \frac{m_{H_2O,bgh}}{m_{bgs} + m_{H_2O,bgh}}$$

$$\phi_{bagazo} (m_{bgs}) + \phi_{bagazo} (m_{H_2O,bgh}) = m_{H_2O,bgh}$$

$$\phi_{bagazo} (m_{bgs}) = m_{H_2O,bgh} (1 - \phi_{bagazo})$$

$$\phi_{bagazo} (M_{bgs} \cdot n_{bgs}) = (M_{H_2O} \cdot n_{H_2O,bgh}) (1 - \phi_{bagazo})$$

$$\tilde{n}_{H_2O,bh} = \frac{\phi_{bagazo} \cdot M_{bgs}}{(1 - \phi_{bagazo}) \cdot M_{H_2O}} \quad (2.1)$$

También, con los datos de humedad y temperatura del aire atmosférico, y la altitud a la que se encuentra la hornilla panelera, se puede calcular el número de moles de agua presentes en el aire atmosférico de la siguiente manera:

$$p_z = p_0 \left( \frac{T_0 + \lambda z}{T_0} \right)^{-\frac{g}{R_a \lambda}} \quad (2.2)$$

$$p_{H_2O,ah} = \phi_a \times p_{sat @ T_{bs,ah}} \quad (2.3)$$

Entonces, el número de moles de agua en el aire húmedo por kmol de combustible en base seca se determina de la página 15 como:

$$\tilde{n}_{H_2O,ah} = \frac{p_{H_2O,ah} \times (\tilde{n}_{as})}{p_z - p_{H_2O,ah}} = \frac{p_{H_2O,ah} \times (4.76 \times a_r)}{p_z - p_{H_2O,ah}} \quad (2.4)$$

Donde  $z$  es la altitud (m),  $p_z$  es la presión a la altitud de  $z$  metros,  $p_0$  y  $T_0$  son la presión y temperatura en las condiciones estándar a la altitud de 0 m ( $p_0 = 101.325$  kPa y  $T_0 = 288$  K),  $\lambda$  es el gradiente térmico ( $\lambda = -6.5 \times 10^{-3}$  K/m),  $g$  es la aceleración gravitacional ( $g = 9.8$  m/s<sup>2</sup>),  $R_a$  es la constante de gas del aire ( $R_a = 287$  J/kg · K),  $p_{H_2O,ah}$  es la presión parcial de vapor de agua en el aire húmedo y  $p_{sat @ T_{bs,ah}}$  es la presión de saturación a la temperatura de bulbo seco del aire húmedo.

Además, se cuenta con cuatro relaciones lineales correspondientes a la conservación atómica de la reacción química:

- Balance de C:

$$m = \tilde{n}_{g,bs} (\tilde{x}_{CO_2,bs} + \tilde{x}_{CO,bs})$$

- Balance de H:

$$n + 2 \times \tilde{n}_{H_2O,bh} + 2 \times \tilde{n}_{H_2O,ah} = 2 \times \tilde{n}_{H_2O}$$

- Balance de O:

$$r + \tilde{n}_{H_2O,bh} + 2 \times a_r + \tilde{n}_{H_2O,ah} = \tilde{n}_{g,bs} (2 \times \tilde{x}_{CO_2,bs} + \tilde{x}_{CO,bs} + 2 \times \tilde{x}_{O_2,bs}) + \tilde{n}_{H_2O}$$

- Balance de N:

$$2 \times 3.76 \times a_r = \tilde{n}_{g,bs} (2 \times \tilde{x}_{N_2,bs})$$

Por otro lado, se debe tener en cuenta que la suma de las fracciones molares en base seca de los gases de combustión es igual a uno, y se expresa como sigue:

$$\sum_{i_p} \tilde{x}_{i_p} = 1 \quad (2.5)$$

Como se observa, se cuenta con siete ecuaciones lineales para hallar las seis incógnitas que el problema plantea. Por lo tanto, la ecuación (2.5) se puede utilizar para comprobar la fracción molar de  $N_2$ .

Después de hallar las incógnitas de la ecuación química, se puede calcular el número de moles de cada uno de los productos en los gases de combustión:

$$\tilde{n}_{CO_2} = \tilde{n}_{g,bs} \cdot \tilde{x}_{CO_2,bs} \quad (2.6)$$

$$\tilde{n}_{CO} = \tilde{n}_{g,bs} \cdot \tilde{x}_{CO,bs} \quad (2.7)$$

$$\tilde{n}_{O_2} = \tilde{n}_{g,bs} \cdot \tilde{x}_{O_2,bs} \quad (2.8)$$

$$\tilde{n}_{N_2} = \tilde{n}_{g,bs} \cdot \tilde{x}_{N_2,bs} \quad (2.9)$$

$$\tilde{n}_{H_2O} = \frac{n}{2} + \tilde{n}_{H_2O,bh} + \tilde{n}_{H_2O,ah} \quad (2.10)$$

### 2.1.2. Balance de energía

Teniendo en cuenta que no se efectúa ningún trabajo, que los cambios de energía cinética y potencial son insignificantes y que los compuestos reactivos de la reacción se encuentran a temperatura ambiente, el balance de energía para esta parte del sistema se expresa como:

$$\dot{Q}_{suministrada} = \dot{Q}_{disponible} + \dot{Q}_{pc} \quad [\text{kW}] \quad (2.11)$$

$$\dot{Q}_{pc} = \dot{Q}_{suministrada} - \dot{Q}_{disponible} \quad [\text{kW}] \quad (2.12)$$

Donde  $\dot{Q}_{suministrada}$  es la potencia térmica suministrada a la cámara de combustión [kW],  $\dot{Q}_{disponible}$  es la potencia térmica disponible [kW] y  $\dot{Q}_{pc}$  son las pérdidas de potencia debido a la combustión incompleta que se presenta [kW]. Además, podemos calcular la eficiencia de combustión como sigue:

$$\eta_{combustión} = \frac{\dot{Q}_{disponible}}{\dot{Q}_{suministrada}} \times 100 \quad [\%] \quad (2.13)$$

Según Soler y Gómez et al (2004):

$$PCI_{bgh} = 17850 - 203.5 \times \omega_{bg,consumido} \quad [\text{kJ/kg combustible}] \quad (2.14)$$

Por lo tanto, la ecuación (2.12) se expresa como:

$$\dot{Q}_{pc} = \dot{m}_{bgh} \cdot PCI_{bgh} - \dot{m}_g \cdot (h(T_{salida,cc}) - h(T_{amb})) \quad [\text{kW}] \quad (2.15)$$

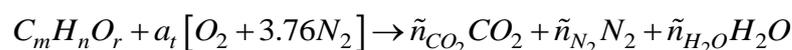
### Forma de determinar la entalpía de formación del bagazo

Primero se calcula la entalpía de combustión del bagazo como sigue:

$$\Delta \tilde{h}_c = -PCI_{bagazo} \times M_{bagazo\ seco} \quad (2.16)$$

Donde  $\Delta \tilde{h}_c$  es la entalpía de combustión del bagazo,  $PCI$  es el poder calorífico inferior del bagazo ( $PCI_{bagazo} = 17793.9$  kJ/kg, según [9]), y  $M_{bagazo\ seco}$  es el peso molecular del bagazo seco.

Luego, se utiliza la ecuación de la reacción química para la combustión completa con aire estequiométrico y bagazo combustible para realizar un balance de masa y de energía.



- Balance de C:

$$m = \tilde{n}_{CO_2,bs}$$

- Balance de H:

$$n = 2 \times \tilde{n}_{H_2O}$$

- Balance de O:

$$r + 2 \times a_t = 2 \times \tilde{n}_{CO_2} + \tilde{n}_{H_2O}$$

- Balance de N:

$$2 \times 3.76 \times a_t = 2 \times \tilde{n}_{N_2}$$

Utilizando la expresión (1.48), se procede a calcular la entalpía de formación del bagazo de la siguiente manera:

$$\Delta\tilde{h}_c = \Delta\tilde{h}_{R,298}^\circ = \sum_{\text{productos}} \tilde{n}_i (\Delta\tilde{h}_{f,298}^\circ)_i - \sum_{\text{reactivos}} \tilde{n}_i (\Delta\tilde{h}_{f,298}^\circ)_i$$

$$\Delta\tilde{h}_c = \tilde{n}_{CO_2} (\Delta\tilde{h}_{f,298}^\circ)_{CO_2} + \tilde{n}_{H_2O} (\Delta\tilde{h}_{f,298}^\circ)_{H_2O} - \cancel{\tilde{n}_{bagazo}^{\neq 1}} (\Delta\tilde{h}_{f,298}^\circ)_{bagazo}$$

$$(\Delta\tilde{h}_{f,298}^\circ)_{bagazo} = \tilde{n}_{CO_2} (\Delta\tilde{h}_{f,298}^\circ)_{CO_2} + \tilde{n}_{H_2O} (\Delta\tilde{h}_{f,298}^\circ)_{H_2O} - \Delta\tilde{h}_c \quad [\text{kJ/kmol de bagazo}] \quad (2.17)$$

Cabe recordar que la variación de la entalpía molar de formación para cada componente de los gases de combustión pueden obtenerse de [3] o de [24]; mientras que la entalpía molar de cada componente a una determinada temperatura se obtienen con los polinomios obtenidos de las tablas termodinámicas JANAF, del programa de la NASA (ver apartado 1.4).

### 2.1.3. Balance de entropía

Se considera un único flujo de calor en la cámara de combustión. Entonces el balance de entropía aplicado en la cámara de combustión se expresa mediante la ecuación (1.56) como:

$$\tilde{s}_{\text{gen}} = \sum_{\text{productos}} \tilde{n}_{i,p} (\tilde{s}_{i,p}^\circ(T) - R_u \ln \tilde{x}_{i,p} p_p) - \sum_{\text{reactivos}} \tilde{n}_{i,R} (\tilde{s}_{i,R}^\circ(T) - R_u \ln \tilde{x}_{i,R} p_R)$$

$$- \frac{\tilde{q}_{pp,cc}}{T_{\text{pared,cc}}} \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kmol de combustible} \cdot \text{K}} \right] \quad (2.18)$$

Donde  $\tilde{n}_{i,p}$  y  $\tilde{n}_{i,R}$  se obtienen del balance de masa,  $\tilde{s}_{i,p}^\circ(T)$  y  $\tilde{s}_{i,R}^\circ(T)$  de las tablas termodinámicas JANAF,  $R_u$  es la constante universal de los gases ( $R_u = 8.31447 \text{ kJ/kmol} \cdot \text{K}$ ),  $\tilde{x}_i$  es la fracción molar de cada componente,  $p$  es la presión absoluta de la mezcla,  $\tilde{q}_{pp,cc}$  es la potencia térmica molar perdida a través de las paredes de la cámara de combustión y  $T_{\text{pared,cc}}$  es la temperatura promedio de las paredes de la cámara de combustión a la cual ocurre la transferencia de calor.

Cabe recordar que el combustible y el aire seco entran por separado. Por lo tanto, las fracciones molares del combustible y del aire seco en la expresión (2.18) valdrán:

$$\tilde{x}_{\text{combustible}} = 1 \frac{\text{kmol combustible}}{\text{kmol combustible}}$$

$$\tilde{x}_{O_2,as} = 0.21 \frac{\text{kmol } O_2}{\text{kmol combustible}}$$

$$\tilde{x}_{N_2,as} = 0.79 \frac{\text{kmol } N_2}{\text{kmol combustible}}$$

Luego, se multiplica el flujo molar de entropía generada hallada en la expresión (2.18) por  $\dot{n}_{combustible}$  para obtener el flujo de entropía generada.

#### 2.1.4. Balance de exergía

Los flujos de exergía que entran al sistema son los de bagazo y aire; mientras que los flujos exergéticos de salida del sistema son los gases de combustión y los de pérdidas por transferencia de calor e inquemados. Este último no se tiene en cuenta en el cálculo de la eficiencia exergética pues es energía que no se aprovecha en el sistema.

Según la convención de signos de la termodinámica, si se asume que el flujo es estacionario, de una sola corriente y el volumen de control no varía en el tiempo, se obtiene que el balance de exergía para un sistema abierto que no realiza algún trabajo se define en la expresión (1.58) como:

$$\sum \left( 1 - \frac{T_0}{T_{pared,cc}} \right) \dot{Q}_{pp,cc} + \sum_{entrada} \dot{m}_{entrada} \psi_{entrada} - \sum_{salida} \dot{m}_{salida} \psi_{salida} - \dot{X}_{destruida} = 0 \quad (2.19)$$

Donde  $T_{pared,cc}$  es la temperatura promedio de las paredes de la cámara de combustión,  $\dot{Q}_{pp,cc}$  es el flujo de calor que se transfiere a través de las paredes de la cámara de combustión hacia el exterior,  $\dot{m}_{entrada}$  y  $\dot{m}_{salida}$  representan a los flujos másicos de entrada y salida,  $\psi_{entrada}$  y  $\psi_{salida}$  la exergía específica de entrada y salida, y  $\dot{X}_{destruida}$  la exergía destruida.

Considerando insignificante los términos que representan a la exergía específica cinética y potencial respecto a otros términos presentes en la ecuación, la exergía específica de los gases se expresa como:

$$\psi_{gases,entrada} = \sum_i \tilde{x}_i \left( \tilde{h}_{i,T_{entrada}} - \tilde{h}_{i,T_0} \right) - T_0 \sum_i \tilde{x}_i \left( \tilde{s}_{i,T_{entrada}} - \tilde{s}_{i,T_0} \right) \quad (2.20)$$

La determinación de la variación de la entalpía molar para cada componente de los gases de combustión se determina con los polinomios obtenidos de las tablas termodinámicas JANAF, del programa de la NASA (ver apartado 1.4).

Cabe recordar que la exergía específica del bagazo seco es igual a su poder calorífico superior igual a  $PCS_{bagazo} = 19259.28$  kJ/kg (Hugot, 1986) [9].

Para comprobar lo hallado en (2.19), ya que el proceso de combustión no involucra trabajo real, el trabajo reversible y la exergía destruida por unidad de mol de combustible son idénticos, la ecuación (1.57) queda expresada como:

$$\tilde{x}_{destruida} = T_0 \cdot \tilde{s}_{gen} = \tilde{w}_{reversible} \quad [\text{kJ/kmol combustible}] \quad (2.21)$$

## 2.2. Ducto de humos

### 2.2.1. Balance de masa

En esta parte de la hornilla panelera se presenta un sistema general de flujo estacionario con corriente única. Por ello, el principio de conservación de la masa queda descrito con la expresión (1.5) de la siguiente forma:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 \rightarrow \rho_1 V_1 A_1 = \rho_2 V_2 A_2 \quad (2.22)$$

Por lo tanto, el flujo másico de entrada al ducto de gases es igual al flujo másico de salida. Además se considera que se presenta una mezcla de gases ideales.

Para hallar el flujo másico de los gases se utiliza la siguiente ecuación:

$$\dot{m}_{gases} = \rho_{gases} V_{gases} A_{flujo} \quad (2.23)$$

Donde  $\rho_{gases}$  es la densidad de la mezcla de gases ideales,  $V_{gases}$  es la velocidad de los gases ideales y  $A_{flujo}$  es el área normal al flujo de gases. Al respecto,  $V_{gases}$  se ha medido con el analizador de gases y el  $A_{flujo}$  se obtiene con los datos del plano de la hornilla. Para hallar  $\rho_{gases}$  se cuenta con la siguiente expresión:

$$\rho_{gases} = \sum x_i \rho_i = \sum (\tilde{x}_i M_i) \left( \frac{R_i T_{salida}}{P_0} \right) = \sum (\tilde{x}_i) \left( \frac{R_u T_{salida}}{P_0} \right) \quad (2.24)$$

Donde  $x_i$  representa la fracción másica de elemento i-ésimo,  $\rho_i$  es la densidad del elemento i-ésimo,  $\tilde{x}_i$  es la fracción molar del elemento i-ésimo obtenido del balance de masa realizado en la cámara de combustión,  $M_i$  es la masa molar del elemento i-ésimo,  $R_i$  es la constante de gas del elemento i-ésimo,  $R_u$  es la constante universal de los gases,  $T_{salida}$  es la temperatura medida en la base de la chimenea y  $p_0$  es la presión del ambiente a la altura que se encuentra el módulo panelero.

### 2.2.2. Balance de energía

Se considera que un flujo másico de gases de combustión atraviesa el ducto de gases para ser evacuados al medio ambiente a través de la chimenea. El balance de energía para esta parte del sistema sería:

$$\dot{Q}_{disponible} = \dot{Q}_{aprovechable} + \dot{Q}_{ch} + \dot{Q}_{pp} \quad [\text{kW}] \quad (2.25)$$

Donde  $\dot{Q}_{disponible}$  es la potencia disponible [kW],  $\dot{Q}_{aprovechable}$  la potencia térmica aprovechada por las pailas [kW],  $\dot{Q}_{ch}$  la potencia térmica que poseen los gases de combustión a la salida del ducto de gases [kW] y  $\dot{Q}_{pp}$  las pérdidas de potencia debido a la transferencia de calor a través de las paredes de toda la hornilla [kW].

Se utilizarán los grados Brix del jugo de caña en la paila prelimpiadora ( $^{\circ}B_{jcl}$ ) y de la panela ( $^{\circ}B_{panela}$ ) para hallar la cantidad de agua evaporada durante el proceso y así obtener la potencia térmica aprovechada por las pailas.

$$\dot{m}_{panela} \times ^{\circ}B_{panela} = \dot{m}_{sacarosa} \quad (2.26)$$

$$\dot{m}_{jcl} \times ^{\circ}B_{jcl} = \dot{m}_{sacarosa} \quad (2.27)$$

Donde  $\dot{m}_{panela}$ ,  $\dot{m}_{jcl}$ ,  $\dot{m}_{sacarosa}$  son el flujo másico de panela, de jugo clarificado y de sacarosa. Igualando las expresiones (2.26) y (2.27) se obtiene:

$$\dot{m}_{jcl} = \frac{^{\circ}B_{panela} \times \dot{m}_{panela}}{^{\circ}B_{jcl}} \quad (2.28)$$

Luego se calculan las cantidades de agua al inicio y término del proceso mediante las siguientes expresiones:

$$\dot{m}_{agua, inicial} = (1 - ^{\circ}B_{jcl}) \times \dot{m}_{jcl} \quad (2.29)$$

$$\dot{m}_{agua, final} = (1 - ^{\circ}B_{panela}) \times \dot{m}_{panela} \quad (2.30)$$

Donde  $\dot{m}_{agua, inicial}$  y  $\dot{m}_{agua, final}$  es el flujo másico de agua al inicio y al final del proceso de evaporación. Con las ecuaciones (2.29) y (2.30) se obtiene el flujo másico de agua evaporada:

$$\dot{m}_{agua, evaporada} = \dot{m}_{agua, inicial} - \dot{m}_{agua, final} \quad (2.31)$$

La potencia térmica aprovechada por las pailas puede calcularse de la siguiente manera:

$$\dot{Q}_{aprovechable} = \dot{Q}_{agua, calentar} + \dot{Q}_{agua, evaporar} + \dot{Q}_{sacarosa, calentar} \quad [\text{kW}] \quad (2.32)$$

Cada uno de los términos del segundo miembro de la anterior ecuación se expresa como:

$$\dot{Q}_{agua, calentar} = \dot{m}_{agua, inicial} \times c_{p, H_2O} \times (T_{eb} - T_0) \quad (2.33)$$

$$\dot{Q}_{agua, evaporar} = \dot{m}_{agua, evaporada} \times h_{fg, H_2O} \quad (2.34)$$

$$\dot{Q}_{sacarosa, calentar} = \dot{m}_{sacarosa} \times c_{p, sacarosa} \times (T_{punteo} - T_0) \quad (2.35)$$

Donde  $c_{p, H_2O}$  es el calor específico del agua ( $c_{p, H_2O} = 4.187 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ ),  $T_{eb}$  es la temperatura de ebullición,  $T_0$  es la temperatura ambiente (298 K),  $h_{fg, H_2O}$  es la entalpía de

evaporización del agua (2257 kJ/kg),  $c_{p,sacarosa}$  es el calor específico de la sacarosa, y  $T_{punteo}$  es la temperatura a la que finaliza el proceso de calentamiento del jugo de caña. Al respecto, utilizando la referencia [12] se tiene:

$$T_{eb} = T_{sat,H_2O} + \Delta T_x \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (2.36)$$

La temperatura de ebullición es mayor que la temperatura de saturación del agua a la presión atmosférica  $T_{sat,H_2O}$  en un incremento  $\Delta T_x$  que depende de los grados Brix del jugo:

$$T_{sat,H_2O} = \frac{3830}{23.19 - \ln(P_{atm})} - 228.32 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (2.37)$$

$$\Delta T_x = 0.2209e^{0.0557(^{\circ}\text{Brix})} \quad (2.38)$$

La potencia térmica con la que son evacuados los gases de combustión hacia la chimenea se calcula con la siguiente expresión:

$$\dot{Q}_{ch} = \sum_i \dot{n}_i (\tilde{h}_i(T_{salida,ducto}) - \tilde{h}_i(T_0)) \quad [\text{kW}] \quad (2.39)$$

donde  $\dot{n}_i$  es el flujo molar de cada compuesto presente en los gases de combustión [kmol/s],  $\tilde{h}_i(T_{salida,ducto})$  la entalpía molar de cada compuesto a la temperatura de salida del ducto de gases [kJ/kmol] y  $\tilde{h}_i(T_0)$  la entalpía molar de cada compuesto a la temperatura ambiente [kJ/kmol].

Con los datos que se obtienen del analizador, mediante un método iterativo, se puede determinar el número de moles de cada componente de los gases de combustión y las entalpías molares se calculan con los polinomios obtenidos de las tablas termodinámicas JANAF, del programa de la NASA (ver apartado 1.4).

Las pérdidas de potencia por transferencia de calor a través de las paredes del ducto de gases se obtienen a partir del balance de energía expresado al inicio.

$$\dot{Q}_{pp} = \dot{Q}_{disponible} - \dot{Q}_{aprovechable} - \dot{Q}_{ch} \quad [\text{kW}] \quad (2.40)$$

Por otro lado, se puede calcular la eficiencia de transferencia y la eficiencia térmica de la hornilla según las siguientes expresiones:

$$\eta_{transferencia} = \frac{\dot{Q}_{aprovechable}}{\dot{Q}_{disponible}} \times 100 \quad [\%] \quad (2.41)$$

$$\eta_{térmica} = \frac{\dot{Q}_{aprovechable}}{\dot{Q}_{suministrada}} \times 100 \quad [\%] \quad (2.42)$$

### 2.2.3. Balance de entropía

En el ducto de gases se considera un flujo de gases estacionario con una entrada y una salida. Además, solo existe calor que sale del sistema; por lo que la ecuación (1.15) queda expresada como:

$$\dot{S}_{\text{gen}} = \dot{m}_{\text{gases}} (s_{\text{salida}} - s_{\text{entrada}}) - \left( \sum \frac{\overset{=0}{\dot{Q}_{\text{entrada},k}}}{T_k} - \sum \frac{\dot{Q}_{\text{salida},k}}{T_k} \right) \quad (2.43)$$

$$\dot{S}_{\text{gen}} = \dot{m}_{\text{gases}} (s_{\text{salida}} - s_{\text{entrada}}) + \sum \frac{\dot{Q}_{\text{salida},k}}{T_k} \quad (2.44)$$

Donde  $\dot{S}_{\text{gen}}$  representa a la entropía generada,  $\dot{m}_{\text{gases}}$  es el flujo másico de gases ideales,  $s_{\text{entrada}}$  y  $s_{\text{salida}}$  son la entropía a la entrada y a la salida del ducto de humos,  $\dot{Q}_{\text{salida},k}$  es la tasa de transferencia de calor hacia el exterior del ducto de gases y  $T_k$  la temperatura a la cual ocurre dicha transferencia de calor.

Se tiene que:

$$\Delta s = s_{\text{salida}} - s_{\text{entrada}} = \sum_{i=1}^k \Delta s_i = \sum_{i=1}^k \frac{\Delta \tilde{s}_i}{M_i} \quad (2.45)$$

Cabe recordar que se tiene una mezcla de gases ideales y que la variación de presión entre las secciones de entrada y de salida es insignificante. Por lo tanto, la ecuación (1.19) queda expresada como:

$$\Delta \tilde{s}_i = \tilde{s}_{i,2}^{\circ} - \tilde{s}_{i,1}^{\circ} \quad (2.46)$$

Combinando las ecuaciones (2.45) y (2.46) se puede hallar la variación de entropía a la entrada y a la salida del ducto de gases de la siguiente manera:

$$s_{\text{sal}} - s_{\text{ent}} = \sum_{i=1}^k \frac{\Delta \tilde{s}_i}{M_i} = \sum_{i=1}^k \frac{\tilde{s}_{i,2}^{\circ} - \tilde{s}_{i,1}^{\circ}}{M_i} \quad (2.47)$$

Entonces, para hallar las entropías molares de los componentes  $i$ -ésimos de las mezclas de gases ideales a la entrada y a la salida del ducto, se recurre a las tablas termodinámicas de JANAF para poder calcularlas.

Se sabe que, en el ducto de gases, la transferencia de calor ocurre a través de las pailas y de las paredes de ladrillo refractario. Para hallar la entropía generada por transferencia de

calor en un tramo del ducto en la que solo se tiene una paila, se sigue la siguiente expresión:

$$\dot{S}_{gen,tramo} = \sum \frac{\dot{Q}_{salida,k}}{T_k} = \frac{\dot{Q}_{salida,paila}}{T_{s,paila}} + \frac{\dot{Q}_{salida,pared}}{T_{s,pared}} \quad (2.48)$$

Para hallar la potencia térmica que se transfiere a la paila se puede utilizar el mismo procedimiento que se describe en el balance de energía. La temperatura a la que ocurre esta transferencia de energía se puede calcular estableciendo la analogía del circuito térmico:

$$\dot{Q}_{salida,paila} = \frac{T_{s,paila} - T_{ebu}}{R_{total,paila}} \quad (2.49)$$

donde:

$$R_{total,paila} = \frac{1}{h_{ebu} \cdot A_{paila}} + \frac{L_{paila}}{k_{paila} \cdot A_{paila}} \quad (2.50)$$

Donde  $h_{ebu}$  es el coeficiente de transferencia de calor por ebullición,  $A_{paila}$  es el área superficial del casquete de la paila,  $L_{paila}$  es el espesor del casquete de la paila y  $k_{paila}$  el coeficiente de transferencia de calor por conducción de la paila.

Cabe tener en cuenta que el espesor de la paila es delgado y que su coeficiente de transferencia térmica es alto, por lo que el segundo término de la ecuación (2.50) puede despreciarse. Con ello, reemplazando la ecuación (2.50) en la (2.49) y reordenando los términos, se tiene la siguiente expresión:

$$T_{s,paila} = \dot{Q}_{salida,paila} \left( \frac{1}{h_{ebu} \cdot A_{paila}} \right) + T_{ebu} \quad (2.51)$$

Para hallar la potencia térmica transferida a través de las paredes de un tramo del ducto de gases, se aplica el mismo procedimiento descrito en el balance de energía. La temperatura a la que ocurre esta transferencia de energía es la temperatura de la superficie de la pared, la cual puede calcularse estableciendo la analogía del circuito térmico:

$$\dot{Q}_{salida,pared} = \frac{T_{s,pared} - T_0}{R_{total,pared}} \quad (2.52)$$

Donde  $R_{total,pared}$  depende de la configuración y construcción de la pared del ducto de gases: ya sea una pared, dos paredes con un vacío de aire entre ellas u otro tipo de configuración. Para el caso de una sola pared de ladrillo entre el ambiente y el ducto de gases, se tiene:

$$R_{total,pared} = \frac{1}{h_{conv} \cdot A_{pared}} + \frac{L_{pared}}{k_{pared} \cdot A_{pared}} \quad [^{\circ}\text{C}/\text{W}] \quad (2.53)$$

Donde  $h_{conv}$  es el coeficiente de transferencia de calor por convección natural,  $A_{pared}$  es el área superficial de un tramo de la pared del ducto de gases,  $L_{pared}$  es el espesor de un tramo de la pared del ducto de gases y  $k_{pared}$  el coeficiente de transferencia de calor por conducción de la pared.

Reemplazando la ecuación (2.53) en la (2.52) y reordenando los términos, se tiene la siguiente expresión:

$$T_{s,pared} = \dot{Q}_{salida,pared} \left( \frac{1}{h_{conv} \cdot A_{pared}} + \frac{L_{pared}}{k_{pared} \cdot A_{pared}} \right) + T_0 \quad (2.54)$$

Cabe resaltar que el análisis térmico con coeficientes de calor expuesto en el presente apartado es un opción para el cálculo del balance de entropía, aunque también se pueden utilizar datos numéricos obtenidos utilizando un programa de mecánica de fluidos computacional.

#### 2.2.4. Balance de exergía

En el ducto de gases se considera un flujo de gases estacionario con una entrada y una salida. Además, solo existe calor que sale del sistema y no se efectúa algún trabajo; por lo que la ecuación (1.27) queda expresada como:

$$\sum \left( 1 - \frac{T_0}{T_k} \right) \dot{Q}_k + \dot{m}_{gases} (\psi_{entrada} - \psi_{salida}) - \dot{X}_{destruida} = 0 \quad (2.55)$$

Donde  $T_k$  es la temperatura promedio de las paredes en cada tramo del ducto de humos,  $\dot{Q}_k$  es el flujo de calor que sale del sistema en cada tramo del ducto de humos,  $\dot{m}_{gases}$  representa al flujo másico de los gases,  $\psi_{entrada}$  y  $\psi_{salida}$  la exergía específica de entrada y salida de cada uno de los componentes de la mezcla de gases, y  $\dot{X}_{destruida}$  la exergía destruida.

Considerando insignificante los términos que representan a la exergía específica cinética y potencial respecto a otros términos presentes en la ecuación, la exergía específica de los gases se expresa como:

$$\psi_{gases,entrada} = \sum_i \tilde{x}_i \left( \tilde{h}_{i,T_{entrada}} - \tilde{h}_{i,T_{salida}} \right) - T_0 \sum_i \tilde{x}_i \left( \tilde{s}_{i,T_{entrada}} - \tilde{s}_{i,T_{salida}} \right) \quad (2.56)$$

La determinación de la variación de la entalpía molar para cada componente de los gases de combustión se determina con los polinomios obtenidos de las tablas termodinámicas JANAF, del programa de la NASA (ver apartado 1.4).

Para comprobar lo hallado en (2.55), ya que el proceso de combustión no involucra trabajo real, el trabajo reversible y la exergía destruida por unidad de mol de combustible son idénticos, la ecuación (1.21) queda expresada como:

$$\tilde{x}_{destruida} = T_0 \cdot \tilde{s}_{gen} = \tilde{w}_{reversible} \quad [\text{kJ/kmol combustible}] \quad (2.57)$$

### 2.3. Indicadores energéticos y de producción

Los indicadores que se definen a continuación se utilizarán para cuantificar y comparar distintos módulos paneleros, con el objetivo de identificar y discutir las mejoras tecnológicas que se podrían implementar.

Los indicadores de operación y energéticos del proceso para este trabajo son 7, con los cuales se puede cuantificar y por lo tanto comparar módulos de producción de azúcar orgánica, para poder seguir innovando y mejorando la construcción de dichos módulos. A continuación se presenta los indicadores energéticos y de producción:

#### 2.3.1. Índice de rendimiento de cultivo

Da cuenta de la forma de cómo se emplean los recursos ya que indica el rendimiento del cultivo, pues dependiendo del tipo de cultivo empleado y de la zona de cultivo, se puede obtener más panela granulada empleando la misma cantidad de caña de azúcar. Es el cociente entre la panela producida y la caña procesada.

$$I_1 = \frac{\dot{m}_{panela}}{\dot{m}_{caña\ molida}} \quad \text{o} \quad I_1 = \frac{m_{panela}}{m_{caña\ molida}}$$

Este parámetro usualmente tiene un valor de 0.1 (10%) según Héctor Velásquez *et al* (2004) [23].

#### 2.3.2. Índice de rendimiento del bagazo

En los trapiches se busca el autoabastecimiento energético mediante el uso del bagazo como combustible después de ser secado a la intemperie. Para poder comparar el bagazo generado (el cual tiene un alto porcentaje de humedad) y el bagazo usado que alimentará la hornilla (con un bajo porcentaje de humedad pues ya ha sido secado) es que este indicador se define con base en el bagazo seco consumido y producido:

$$I_2 = \frac{\dot{m}_{bgs, producido} - \dot{m}_{bgs, consumido}}{\dot{m}_{bgs, producido}} \times 100 \quad \text{o} \quad I_2 = \frac{m_{bgs, producido} - m_{bgs, consumido}}{m_{bgs, producido}} \times 100 \quad [\%]$$

Donde la masa de bagazo seco producido y la masa de bagazo seco consumido se calcula con las siguientes expresiones:

$$m_{bgs, producido} = \frac{m_{bgh, producido} (100 - \omega_{bg, producido})}{100} \quad [\text{kg}]$$

$$m_{bgs,consumido} = \frac{m_{bgh,consumido} (100 - \omega_{bg,consumido})}{100} \quad [\text{kg}]$$

Donde  $\omega_{bg,producido}$  y  $\omega_{bg,consumido}$  son respectivamente, la humedad del bagazo generado y del bagazo consumido.

Este índice da cuenta del bagazo sobrante (valores positivos indican una autosuficiencia energética de la hornilla) o faltante en los trapiches (valores negativos indican que es necesario el uso de combustibles adicionales).

### 2.3.3. Índice de pérdidas de los gases de combustión

Determina qué porcentaje de la energía generada en la cámara de combustión se pierde en los gases de combustión que son evacuados a través de la chimenea.

$$I_3 = \frac{\dot{Q}_{ch}}{\dot{Q}_{disponible}} \times 100 \quad [\%]$$

Las pérdidas excesivas son causadas por un mal diseño de la cámara de combustión, las deficiencias de aire, las bajas temperaturas de los gases de combustión y el contenido de cenizas en los gases de combustión.

Según Velásquez *et al* (2004) [23], valores por encima del 35% se consideran excesivos e inapropiados para cualquier proceso industrial.

### 2.3.4. Índice de pérdidas de energía por transferencia de calor

Determina qué porcentaje de la energía se pierde por las paredes de la hornilla panelera y por la energía contenida en las cenizas. Da una idea de un buen aislamiento térmico, dependiendo de la construcción del módulo panelero, de los materiales y de la tecnología de construcción empleada. Se define de la siguiente manera:

$$I_4 = \frac{\dot{Q}_{pp}}{\dot{Q}_{disponible}} \times 100 \quad [\%]$$

### 2.3.5. Índice de rendimiento global de un módulo panelero

Este indicador da una idea de cuánto bagazo seco se consume por unidad de panela producida. Se calcula de la siguiente manera:

$$I_5 = \frac{\dot{m}_{bgs,consumido}}{\dot{m}_{panela}}$$

Entre más bajo sea este índice, mejor será el rendimiento global (energético y productivo) de la hornilla. Esto dependerá del éxito en la extracción de jugos, en el secado del bagazo, en el proceso de combustión y en el aprovechamiento de la energía en el proceso productivo.

Según Velásquez *et al* (2004) [23], el índice de rendimiento global de un módulo panelero se encuentra entre valores promedio de 1,13 a 1,23 que indican un buen comportamiento y diseño eficiente del módulo panelero, ya que para producir un kilogramo de panela se requiere consumir una menor cantidad de bagazo.

### 2.3.6. Eficiencia energética de la hornilla

Es un índice de suma importancia para diagnosticar el funcionamiento de los trapiches, que se define como el cociente entre la energía aprovechada y la energía disponible del combustible.

$$I_6 = \eta_e = \frac{\dot{Q}_{\text{aprovechable}}}{\dot{Q}_{\text{disponible}}} \times 100 \quad [\%]$$

El valor de este indicador depende de la forma de cómo se aprovecha la energía disponible por el combustible a lo largo del proceso de la obtención de la panela granulada, además de la conveniente ubicación de las pailas y el tipo de paila que se usa para determinada etapa del proceso para que exista una correcta transferencia de calor.

### 2.3.7. Índice de capacidad real de producción

Se determina como el cociente entre la masa de panela producida (kg) respecto al tiempo transcurrido desde el encendido de la hornilla hasta la hora de salida del último punteo. Indica la capacidad de producción de la hornilla.

$$\eta_{\text{panela-tiempo}} = \frac{m_{\text{panela}}}{\Delta t}$$

## **Capítulo 3**

### **Procedimientos y equipos para la medición de parámetros energéticos y de producción**

#### **3.1. Principales equipos e instrumentos de medición**

##### **3.1.1. Analizador de gases**

La Universidad de Piura cuenta con un analizador de gases GreenLine 8000, el cual está equipado con una bomba de aspiración, sonda de caldeo de la muestra y controlador de temperatura, filtro de partículas en suspensión, bomba peristáltica de drenaje condensado; provisto de una comunicación inalámbrica Bluetooth con un alcance de hasta 20 m y una vía alterna con protocolo RS232.

Consta de dos componentes principales: el *MCU (Main Control Unit)* y el *RCU (Remote Control Unit)*, tal y como se muestra en la figura 3.1. Éste último permite enviar instrucciones a la unidad de análisis de gas, administrar los datos almacenados, controlar los datos medidos en tiempo real, imprimir y transferir datos hacia y desde una computadora personal. La memoria interna puede almacenar hasta 9000 datos de análisis.

El analizador de gases GreenLine 8000 muestra las especificaciones técnicas y el desempeño en línea con los “Protocolos”. Estos “Protocolos” son las directrices que prescriben las prestaciones técnicas de los analizadores basados en sensores electroquímicos a utilizar, así como el procedimiento de calibración y pruebas que se deben seguir para asegurar la validación de los datos de emisión.



**Figura 3.1 - Analizador de gases GreenLine 8000.**  
Fuente: Referencia bibliográfica [4].

### **3.1.1.1. Principio de medición**

El gas de combustión se aspira por medio de una sonda mediante una bomba primaria. La muestra se limpia y seca mediante un filtro de polvo y la trampa de condensación. Luego, el gas fluye a través de los sensores para el análisis.

El sensor de  $O_2$  es una celda electroquímica. Las mediciones de gases tóxicos ( $CO$ ,  $SO_2$ ,  $NO$  y  $NO_2$ ) utilizan celdas electroquímicas también. Éstas celdas aseguran resultados precisos para intervalos de tiempo de aproximadamente 60 minutos. Cabe resaltar que GreenLine utiliza aire fresco como referencia (20.95% para las celdas de  $O_2$ ).

La desconexión del instrumento activa un procedimiento de purga de los sensores con aire fresco. Cabe recordar que el establecimiento de la presión de referencia debe hacerse manualmente antes de la medición de presión. Los parámetros medidos y calculados son indicados en una pantalla gráfica LCD (40x56 mm).

### **3.1.1.2. Partes del analizador de gases**

Para un adecuado uso y operación del analizador de gases, resulta necesario conocer todas y cada una de sus partes. En la figura 3.2 se indican los elementos del MCU (ver tabla 3.1).

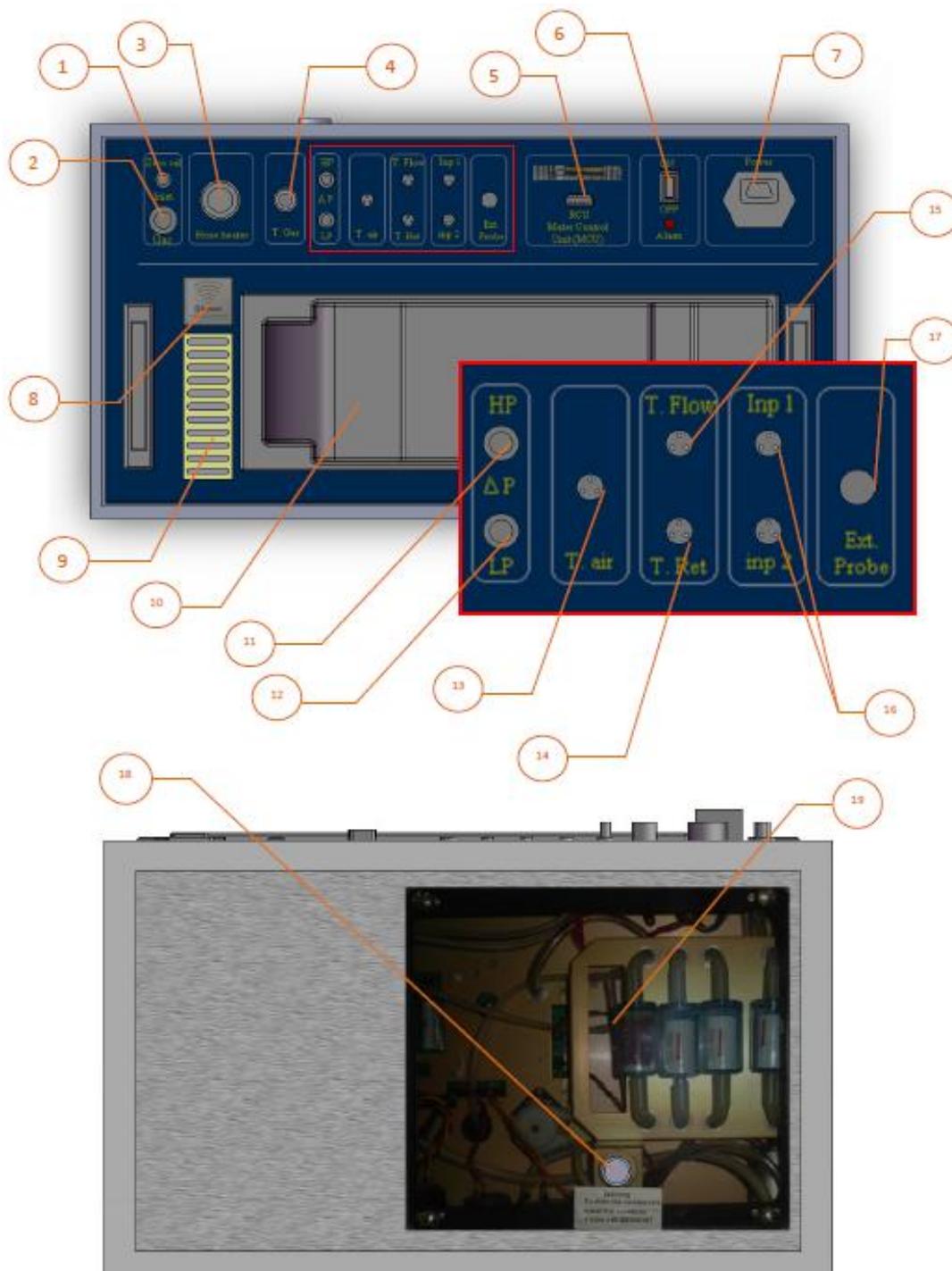


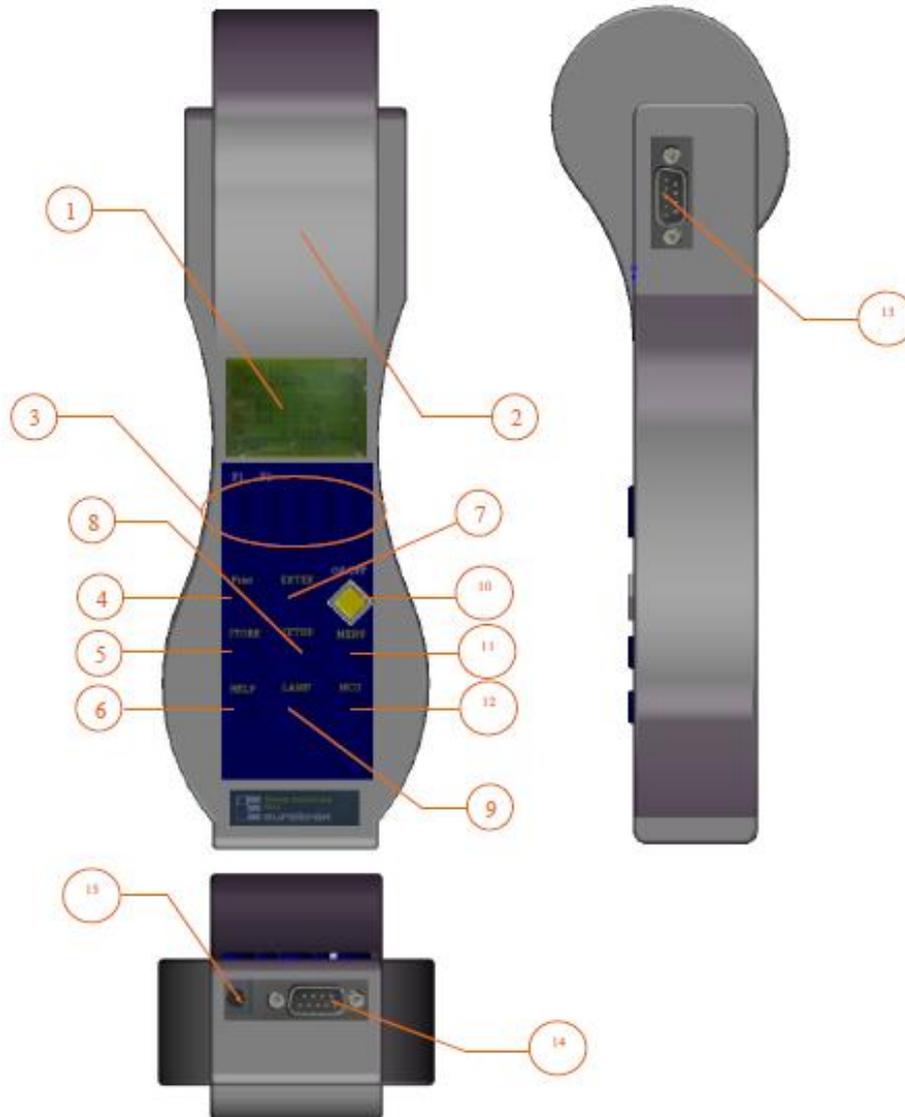
Figura 3.2 - Partes del MCU en el analizador de gases GreenLine 8000.  
Fuente: Referencia bibliográfica [4].

**Tabla 3.1 - Descripción de las partes del MCU.**

<b>Nro.</b>	<b>Nombre</b>	<b>Funcionalidad</b>
1	Conector de la presión de referencia	Tomar medidas de la presión de referencia.
2	Succión de gases para el análisis	Tomar la muestra de gases necesaria en un análisis.
3	Conector para la termocupla de la sonda de medición	Muestrear la temperatura de los gases en cada toma de datos.
4	Conector para termocupla	Medir la temperatura con una sonda auxiliar.
5	Conector RS422	Permitir comunicación directa entre el MCU y el RCU mediante protocolo RS422.
6	Switch de encendido y apagado	Encender y apagar el MCU.
7	Conector de tensión	Alimentar con tensión alterna la batería del MCU.
8	Emisor Bluetooth	Permitir la comunicación inalámbrica entre el MCU y el RCU.
9	Ventilación superior	Permitir la refrigeración de la electrónica del MCU.
10	Guarda de RCU	Guardar la unidad remota en un solo bloque con el MCU.
11	Conector de presión alta	Tomar la medida de la presión alta (manguera con listón rojo) de la sonda de presión diferencial.
12	Conector de presión baja	Tomar la medida de la presión baja (manguera con listón negro) de la sonda de presión diferencial.
13	Conector de termocupla auxiliar	Medir la temperatura de aire ambiente.
14	Conector de termocupla	Medir alguna temperatura de referencia adicional.
15	Conector de termocupla	Medir temperatura de manera aislada de los gases.
16	Entradas analógicas	Sondas o medidores analógicos adicionales (termocuplas, medidores de presión, etc.)
17	Conector de probeta externa	Conector para probeta o sonda adicional.
18	Conector de manguera	Evacuar los condensados de los filtros.
19	Celdas electroquímicas	Elementos necesarios para el análisis y detección de cada componente del gas.

Fuente: Referencia bibliográfica [4].

Por otro lado, el RCU cumple un papel importante en campo, pues programa el MCU para determinar el tiempo de muestreo, el tamaño de las muestras y el transporte de datos. En la figura 3.3 se muestran los elementos del RCU, los cuales son descritos en la tabla 3.2.



**Figura 3.3 - Partes del RCU en el analizador de gases GreenLine 8000.**  
Fuente: Referencia bibliográfica [4].

**Tabla 3.2 - Descripción de las partes del RCU.**

<b>Nro.</b>	<b>Nombre</b>	<b>Funcionalidad</b>
1	Pantalla LCD	Visualización de medidas y funcionalidades de configuración.
2	Impresora	Imprimir resultados de una medida puntual.
3	Botones de selección	Comparten funciones de desplazamiento y selección de funciones en la visualización de parámetros y configuración del analizador.
4	Botón PRINT	Imprime un informe puntual de evaluación.
5	Botón STORE	Ingresa a todas las herramientas de almacenamiento de datos.
6	Botón HELP	Brinda la informa necesaria respecto a HEADER PRINTER y los sensores.
7	Botón ENTER	Permite aceptar la opción escogida en una determinada función.
8	Botón SETUP	Permite cargar y descargar la memoria del MCU y RCU, además de los parámetros del combustible usado.
9	Botón LAMP	Permite encender la lámpara de la pantalla LCD.
10	Botón ON/OFF	Permite encender y apagar el RCU, así como ingresar a configuraciones especiales y conexión con la PC.
11	Botón MENU	Permite visualizar y configurar las diferentes medidas que realiza el analizador.
12	Botón MCU	Brinda el estado de memoria del MCU.
13	Salida RS232 PRINT	Permite una salida a una impresora externa para imprimir resultados de un análisis.
14	Salida RS422	Permite la comunicación directa entre el RCU y MCU y entre el RCU y PC.
15	Alimentación 9V	Permite alimentar la batería del RCU.

Fuente: Referencia bibliográfica [4].

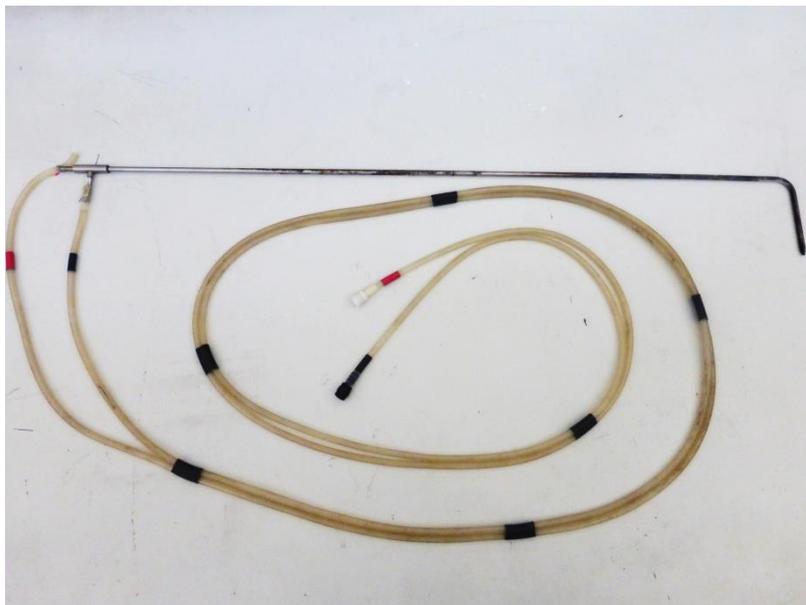
### 3.1.1.3. Conexión de periféricos

El analizador de gases GreenLine 8000 de la Universidad de Piura cuenta con los siguientes periféricos: sonda de análisis de gases (ver figura 3.4), sonda de medición de presión diferencial y velocidad de gases (ver figura 3.5) y termocupla tipo K para medir la temperatura del aire.



**Figura 3.4 - Sonda de análisis de gases.**

Fuente: Elaboración propia, tomada en el Laboratorio de Energía de la Universidad de Piura.



**Figura 3.5 - Sonda de presión diferencial (Tubo Pitot).**

Fuente: Elaboración propia, tomada en el Laboratorio de Energía de la Universidad de Piura.

Todos los periféricos han de ser conectados correctamente para el buen funcionamiento del analizador. Los pasos a seguir para la conexión de los periféricos son los siguientes:

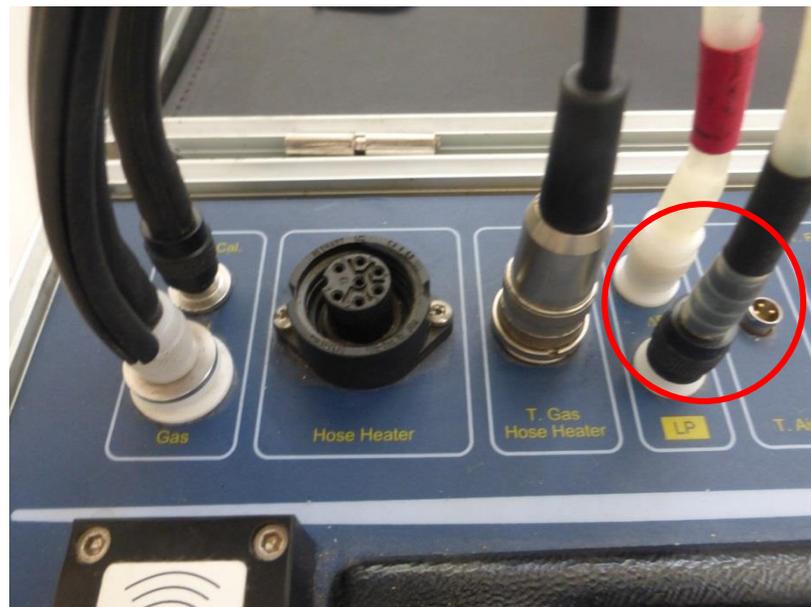
- ✓ Conectar la alimentación del MCU.
- ✓ Conectar la sonda de análisis de gases como se muestra en la figura 3.6.



**Figura 3.6 - Conexión de la sonda de análisis de gases.**

Fuente: Elaboración propia, tomada en el Laboratorio de Energía de la Universidad de Piura.

- ✓ Conectar las sondas de medición de presión diferencial, poniendo en presión alta la marcada con cinta roja y en baja presión la marcada con cinta negra (ver figura 3.7).



**Figura 3.7 - Conexión de la sonda de presión diferencial (Tubo Pitot).**

Fuente: Elaboración propia, tomada en el Laboratorio de Energía de la Universidad de Piura.

- ✓ Conectar la manguera de evacuación de condensados en la parte posterior a la salida de los filtros (ver figura 3.8).



**Figura 3.8 - Conexión de la manguera de evacuación de condensados.**

Fuente: Elaboración propia, tomada en el Laboratorio de Energía de la Universidad de Piura.

#### 3.1.1.4. Encendido del equipo

Los pasos a seguir para el encendido del analizador de gases debe ser realizado en el siguiente orden:

- ✓ Conectar la alimentación del MCU.
- ✓ Conectar todas las sondas.
- ✓ Encender el RCU.
- ✓ Encender el MCU y esperar el tiempo de inicio de operación.
- ✓ Para medir la velocidad y presión de los gases se necesita establecer el punto de referencia. Para ello, antes de iniciar las mediciones, se debe ingresar desde el RCU a **MENU/ MEASURE/ GAS VELOCITY/ Auto**; en la pantalla LCD podrá visualizar los valores de temperatura del gas medidos con las termocupla incorporada en la sonda de medición de gases, así como el valor de presión diferencial y de velocidad de gases medido. Se debe esperar a que estos dos últimos valores se estabilicen por unos segundos, después presionar **ZERO**. De esta manera quedará referenciado el valor cero de diferencia de presiones.
- ✓ Por último, presionar **ESCAPE** hasta llegar a la pantalla principal. Después de esto el analizador está listo para ser programado e iniciar las medidas.

#### 3.1.1.5. Programación del analizador

El análisis a largo plazo permite almacenar un conjunto determinado de datos en un intervalo de tiempo con un tiempo de muestreo indicado por el usuario. Para programar el analizador bajo esta configuración, se deben seguir los siguientes pasos:

- ✓ Primero se debe liberar la memoria del MCU en caso de que esté llena. Para ello, en el RCU, se ingresa a **STORE/ DELETE MEMORY**.
- ✓ Presionar **STORE/ TAG SELECTION/** Seleccionar uno de los TAG creados previamente.

- ✓ **SETUP/ NEXT/ NEXT/ NEXT/ CONF. MCU MEM.** Aparecerá el siguiente menú:
  - Start hour mem: inserte la hora de inicio de adquisición (0 – 23).
  - Start min mem: inserte el minuto del comienzo de adquisición (0 – 59).
  - Length [min]: inserte la longitud de la muestra en minutos.
  - Int. [s]: inserte el tiempo de muestreo en segundos.
 Después de configurar los parámetros, presione **DATE**.
- ✓ Aparece el siguiente menú:
  - Year: inserte el año de inicio de la muestra.
  - Month: inserte el mes de inicio de la muestra
  - Day: inserte el día de inicio de la muestra.
- ✓ Para iniciar la medición presione **START/ START**.
- ✓ Para cargar la configuración al MCU, ir a **SETUP/ LOAD MCU CFG**.
- ✓ Para comprobar el estado de la memoria del MCU y ver el consumo de memoria, presionar el botón MCU y verificar la disminución del espacio de memoria.
- ✓ Terminada la medición, se debe cargar los datos del MCU al RCU y luego transferirlos a una PC. Para ello se ingresa a **SETUP/ LOAD MCU MEAS**.

**IMPORTANTE:** Durante el análisis a veces aparece el mensaje “Zero Err” en alguno de los parámetros. Lo que se debe hacer en estos casos es apagar el equipo, poner la sonda en un lugar con aire fresco y encender el equipo hasta que se restablezca el análisis. Si la falla continúa, llevar el equipo a mantenimiento.

Por otro lado, antes de realizar cualquier tipo de medición, es necesario evaluar el estado actual del analizador de gases según la información que se presenta en el Anexo A.

Después de realizada la toma de muestras se descargan los datos a una PC. Para ello se debe continuar con los pasos descritos en el Anexo B, el cual también incluye información sobre la configuración de la RCU y MCU a través del software GasConfig y los problemas comunes en el intercambio de datos con sus respectivas soluciones.

### 3.1.2. Sensores de temperatura

Una **termocupla** es el sensor de temperatura más utilizado industrialmente (ver figura 3.9). Se componen de dos alambres de distinto material unidos en un extremo por soldadura. Cuando la unión experimenta un cambio de temperatura se crea una tensión, del orden de los milivoltios, la cual aumenta con la temperatura. Este voltaje puede entonces ser interpretado utilizando tablas de referencia de la termocupla para calcular la temperatura.

Estos dispositivos suelen ir encapsulados para protegerlos de las condiciones del proceso industrial en el cual están inmersos, con el fin de reducir drásticamente los efectos de corrosión. En un extremo se encuentra la unión bimetal y en el otro el terminal eléctrico de los cables protegido por un cabezal como elemento de sujeción.



**Figura 3.9 - Termocupla tipo K.**

Fuente: Elaboración propia, tomada en el Laboratorio de Energía de la Universidad de Piura.

Existen diversos tipos de termocuplas, cada uno con sus propias características únicas en términos de rango de temperatura, durabilidad, resistencia a la vibración, resistencia química, y la compatibilidad de las aplicaciones. Para seleccionar adecuadamente el tipo de termocupla a utilizar se debe tener en cuenta el límite superior de temperatura, rango de temperatura, costo, y el tiempo de vida. A continuación, en la tabla 3.3 se muestran las características de las termocuplas más comunes.

**Tabla 3.3 - Características de las termocuplas más comunes.**

Tipo de termocupla	Nombre	$\alpha_{A,B}^6$ ( $10^{-6}V/^{\circ}C$ ) at		Rango de aplicación <sup>7</sup> ( $^{\circ}C$ )	Tolerancia comercial <sup>8</sup> ( $^{\circ}C$ )	Indicaciones de uso
		0 $^{\circ}C$	100 $^{\circ}C$			
Cromel(+)-constantán(-)	E	58.7	67.5	-270 – 1000	$\pm 1.7$	Mayor $\alpha$ , un poco más caro. Alto $\alpha$ , propenso a la corrosión, captación de ruido.
Hierro(+)-constantán(-)	J	50.4	54.3	-210 – 1200	$\pm 2.2$	Buen $\alpha$ , económico para alta temperatura.
Cromel(+)-alumel(-)	K	39.5	41.4	-270 – 1372	$\pm 2.2$	Bajo $\alpha$ , estable, menos costosa que la de tipo S.
Pt-13%Rh(+)-Pt(-)	R	5.3	7.5	-50 – 1767	$\pm 1.4$	Menor $\alpha$ , más estable y costoso, usado como patrón.
Pt-10%Rh(+)-Pt(-)	S	5.4	7.3	-50 – 1767	$\pm 1.4$	Alto $\alpha$ , barato, fácil de hacer.
Cobre(+)-constantán(-)	T	38.7	46.8	-270 – 400	$\pm 0.8$	

Fuente: Referencia bibliográfica [10].

Las termocuplas con una baja sensibilidad, como en el caso de los tipos B, R y S, tienen además una resolución menor. La selección de termocuplas es importante para asegurarse que cubren el rango de temperaturas a determinar.

Cabe precisar que el máximo error que puede tener una termocupla tipo K al medir la temperatura ambiente es de 5  $^{\circ}C$ .

<sup>6</sup> Coeficiente de Seebeck relativo a la combinación de ambos elementos.

<sup>7</sup> Rango de temperaturas en las que las termocuplas pueden ser utilizadas.

<sup>8</sup> Hace referencia a cuánto puede variar el valor de temperatura real de su valor indicado.

La dependencia entre el voltaje entregado por la termocupla y la temperatura no es lineal. Por lo tanto, es deber del instrumento electrónico destinado a mostrar la lectura, efectuar la linealización, es decir tomar los datos de voltaje y conociendo el tipo de termocupla, ver en tablas internas a que temperatura corresponde este voltaje.

Cuando la distancia a los aparatos encargados de tratar la señal eléctrica de estos transductores es larga, se debe utilizar cables de compensación para transportar esta señal sin que la modifique o que la modifique de una manera fácilmente reconocible y reversible para los dispositivos de tratamiento de la señal.

Al tratar de adquirir estos cables compensados se debe indicar el tipo de termocupla al que se conectarán pues son especiales para cada una de ellas. Además, se debe preguntar al proveedor por la polaridad de conexión de estos cables que, al conectarse con la respectiva termocupla, debe respetarse pues de otra forma será imposible obtener una medición sin error.

Por otro lado, cuando se empalman los cables de la termocupla con un conductor normal de cobre se producirán dos nuevas termocuplas con el cobre como metal para ambas, generando un voltaje proporcional a la temperatura ambiente en el punto de empalme. El uso de transmisores 4-20mA ayuda a corregir este error, pues incorporan un termistor que mide la temperatura ambiente en ese punto y la suma para crear la compensación y obtener así la temperatura real.

La prueba básica para verificar el correcto funcionamiento de una termocupla es probar la continuidad entre los dos terminales de la termocupla, luego medir su tensión y mediante tablas encontrar la temperatura exacta a la que corresponde y contrastar con la temperatura ambiente (ver Anexo C). Además, si se desea saber más sobre las precauciones y consideraciones del uso de una termocupla, diríjase al Anexo D.

Un **RTD** (*Resistance Temperature Detector*) es un sensor de temperatura basado en la variación de la resistencia de un conductor ante un cambio en su temperatura (ver figura 3.10). Un aumento de temperatura en el metal ocasiona una mayor agitación térmica haciendo que los electrones se dispersen y reduzcan su velocidad media, aumentando la resistencia.

La variación de la resistencia puede ser expresada de la siguiente manera:

$$R = R_0 (1 + \alpha \Delta T) \quad \left[ \text{m}^2 \cdot \text{°C}/\text{W} \right] \quad (3.1)$$

Donde  $R_0$  es la resistencia a la temperatura de referencia,  $\Delta T$  es la desviación de temperatura y  $\alpha$  es el coeficiente de temperatura del conductor especificado a 0 °C. El coeficiente de temperatura depende del material como se muestra en la tabla 3.4.



Figura 3.10 - (a) RTD con cabezal. (b) RTD sumergible con transmisor 4-20 mA.

Fuente: Elaboración propia, tomada en el Laboratorio de Energía de la Universidad de Piura.

Tabla 3.4 - Tabla de coeficientes de variación de resistencia por grado de temperatura.

Material	$\alpha$	Material	$\alpha$
Advance	0.00002	Mercurio	0.00089
Aluminio	0.0039	Nicromio	0.00013
Bronce fosforoso	0.002	Níquel	0.0047
Carbón	0.0005	Niquelina	0.0002
Cobre	0.00382	Oro	0.0034
Estaño	0.0042	Plata	0.0038
Hierro	0.0052	Platino	0.0025
Kruppina	0.0007	Plomo	0.0037
Latón	0.002	Tungsteno	0.0041
Manganita	Nulo	Wolframio	0.0045

Fuente: [http://unicrom.com/Tut\\_variacion\\_resistencia\\_con\\_temp.asp](http://unicrom.com/Tut_variacion_resistencia_con_temp.asp).

Un sensor comúnmente utilizado es el RTD Pt100, formado por un alambre de platino cuya resistencia a 0 °C es igual a 100  $\Omega$  y que al aumentar la temperatura aumenta su resistencia eléctrica. El elemento consiste en un arrollamiento muy fino de platino bobinado entre capas de material aislante y protegido por un material cerámico. El comportamiento de la resistencia no es lineal pero si creciente y característico del platino, de tal forma que mediante tablas es posible encontrar la temperatura exacta a la que corresponde (Ver Anexo C).

Al adquirir un RTD se debe especificar al proveedor el diámetro, la longitud y el modo de conexión que se requiere. Existen tres modos de conexión para las Pt100:

- ✓ Conexión con 2 hilos: es el más sencillo pero menos recomendado pues la resistencia de los cables que unen la Pt100 con el instrumento de medición se suman y generan un error inevitable.
- ✓ Conexión con 3 hilos: es el más común y resuelve bastante bien el problema generado por los cables. El único requisito es que los tres cables tengan la misma resistencia pues el sistema de medición se basa en el puente Wheatstone<sup>9</sup>.
- ✓ Conexión con 4 hilos: es el más preciso de todos. Los cables pueden ser de distinta resistencia pero el instrumento receptor es más costoso.

<sup>9</sup> Un puente de Wheatstone se utiliza para medir resistencias desconocidas mediante el equilibrio de los brazos del puente y los circuitos cerrados que se forman.

La prueba básica para verificar el correcto funcionamiento de un RTD es medir la resistencia entre los hilos: si la lectura es del orden de los megohmios está midiendo la resistencia del vacío, esto es, se abrió el circuito; y si la lectura es cercana a  $0 \Omega$  indica que la resistencia se ha fundido.

Cabe resaltar que tanto las RTD como las termocuplas son conectadas a un PLC para almacenar los datos de temperatura cada cierto intervalo de tiempo. La conexión se realiza a través de **transmisores 4-20 mA** que convierten los datos de tensión (o resistencia eléctrica) en miliamperios.

Los transmisores de temperatura se utilizan para evitar pérdidas de tensión (o adición de la resistencia propia del conductor) debido a la longitud del cable, o cuando un regulador o PLC no puede medir directamente la señal desde un sensor de resistencia, pues los transmisores estandarizan la señal transmitida en 4-20 mA.

Al adquirir un transmisor se debe especificar al proveedor el tipo de RTD o termocupla a conectar y el rango de temperatura a medir. Además, para poder configurarlo se debe adquirir el kit de configuración de la misma marca. En nuestro caso, se cuenta con el transmisor digital de temperatura PR533A de PR Electronics (Ver Anexo E).

Los transmisores y el módulo de adquisición de datos (PLC) se deben conectar a través de cable de instrumentación (cable 4-20 mA). En el Anexo F se puede encontrar la información relacionada a la configuración y correcta operación del PLC. Se recomienda recubrir con papel aluminio todos los cables, desde las termocuplas o RTDs hasta el módulo de adquisición de datos; para evitar el contacto directo con salpicaduras de jugo de caña que se encuentra en ebullición en las pailas.

A continuación, en la tabla 3.5 se presenta los distintos sensores de temperatura que se han utilizado en este proyecto.

**Tabla 3.5 - Descripción de los sensores de temperaturas utilizados.**

<b>Sensor</b>	<b>Diámetro (in)</b>	<b>Longitud de bulbo (cm)</b>	<b>Longitud total (cm)</b>	<b>Temp. Máx. (°C)</b>	<b>Observación</b>
Termocuplas tipo R	0.5	60	79	1400	-
Termocuplas tipo K	0.5	60	71.5	1300	-
Sensores RTD Pt100	0.5	26	36.5	600	Con mango de sujeción

Fuente: Elaboración propia.

### 3.1.3. Refractómetro

Se trata de un instrumento óptico que utiliza el principio de la refracción de la luz, cuya escala de medición es el índice de refracción, a partir del cual se pueden obtener distintas escalas específicas (Brix, densidad específica, porcentaje de sal, entre otros). En esta oportunidad será utilizado para la medición de los grados Brix<sup>10</sup> que mide la concentración de sacarosa que contienen los jugos de la caña de azúcar (ver figura 3.11 y figura 3.12).

<sup>10</sup> Los grados Brix miden el cociente total de sacarosa disuelta en un líquido. Su símbolo es °Bx.



**Figura 3.11 - Refractómetro portátil de la Universidad de Piura.**

Fuente: Elaboración propia, tomada en el Laboratorio de Energía de la Universidad de Piura.



**Figura 3.12 - Partes de un refractómetro portátil.**

Fuente: Elaboración propia, tomada en el Laboratorio Energía de la Universidad de Piura.

La Universidad de Piura cuenta con un refractómetro con las características descritas en la tabla 3.6, el cual ha sido utilizado en el presente proyecto. Este refractómetro cuenta con tres escalas cuyos rangos se muestran en la tabla 3.7.

**Tabla 3.6 - Datos del refractómetro portátil de la Universidad de Piura.**

Estilo	Modelo	Rango	Min. Div.	Precisión	Observaciones
Refractómetro de azúcar	RHB0-90	0 a 90 Brix	0.2% Brix	+/- 0.2%	Sin ATC

Fuente: Referencia bibliográfica [5].

**Tabla 3.7 - Escalas del refractómetro a utilizar en nuestro módulo.**

<b>Escala</b>	<b>Valores</b>
Primera escala	0% – 42%
Segunda escala	42% – 71%
Tercera escala	71% – 90%

Fuente: Elaboración propia.

Para depositar la muestra sobre el prisma de refracción se debe utilizar una pipeta de plástico. Se debe tomar precauciones al momento de utilizarlo pues es un instrumento muy delicado. Además, el refractómetro debe estar limpio y calibrado antes de comenzar su funcionamiento.

### **Uso del refractómetro**

Se extrae una muestra del jugo de caña, un par de gotas para ver su nivel de concentración de azúcar. Cabe resaltar que se refiere al jugo de caña que ha pasado por los prelimpiadores y se ha depositado temporalmente en el tanque colector.

Luego se deposita las gotas sobre la parte cristalina del refractómetro, el cual se apunta a un foco de luz intensa, y se ajusta su ocular para obtener una lectura en la escala del refractómetro (grados Brix).

Para la siguiente lectura, se debe limpiar tanto el prisma de refracción como el de incidencia utilizando un algodón o paño. Se emplea agua y luego una mezcla de alcohol – acetona.

### **3.1.4. Higrómetro**

Este instrumento será utilizado para medir la temperatura ambiental y la humedad relativa, es decir, la relación porcentual entre la presión de vapor de agua contenida en el aire y la presión de vapor de agua a la temperatura de saturación (vapor saturado).

El higrómetro consiste en un sensor de humedad conectado a una sonda, que es un material dieléctrico plástico con una constante dieléctrica fija. La humedad registrada hace que el material dieléctrico se dilate, generando un distanciamiento entre las placas con una variación de la geometría del capacitor y reducción de su capacitancia. Estas variaciones de capacitancia causan una modificación en la frecuencia de los componentes electrónicos del instrumento, estas frecuencias son función de la humedad relativa. A su vez, la frecuencia se convierte en voltaje y pasa a ser un valor de humedad relativa que se visualizará en la pantalla.

La Sección Energía de la Universidad de Piura cuenta con un higrómetro de marca Eurotron, modelo Mini T-RH (ver figura 3.13), el cual tiene las siguientes especificaciones técnicas mostradas en la tabla 3.8.



**Figura 3.13 - Higrómetro Mini T-RH.**

Fuente: Elaboración propia, tomada en el Laboratorio de Energía de la Universidad de Piura.

**Tabla 3.8 - Especificaciones técnicas del higrómetro Mini T-RH.**

<b>Función</b>	<b>Rango y resolución</b>	<b>Precisión</b>
Humedad	5.0 a 98.0% RH	±3.5% RH
Termocupla Tipo K (Precisión de la sonda no incluida)	-20 a 1000 °C -4.0 a 1832 °F	±(3.0% lectura + 4°C) ±(3.0% lectura + 7°F)

Fuente: Manual de uso del Higo-Termómetro Mini T-RH de Eurotron.

### **Características**

- ✓ Retención de datos. Pantalla LCD digital grande con indicación de la función.
- ✓ Respuesta rápida para medición de la humedad desde 0.1% RH al 100% RH, con 0.1% RH de resolución y tiempo de respuesta rápido. El rango de medición es de 0% a 100%, pero cerca al 98 % y por debajo del 5 %, la desviación no está especificada.
- ✓ Sensor semiconductor para mediciones de temperatura de 0 °C a 40 °C (32 °F a 104 °F) y termocuplas tipo K con amplias mediciones de temperatura de -20 °C a 1000 °C (4 °F a 1832 °F).

### **3.1.5. Lista de otros materiales, equipos e instrumentos**

A continuación, en la tabla 3.9, se enumeran los distintos equipos, instrumentos, accesorios y otros materiales utilizados en los viajes de campo realizados para la toma de datos experimentales.

**Tabla 3.9 - Lista de equipos, instrumentos, accesorios y otros materiales para toma de datos experimentales.**

<b>Tipo</b>	<b>Objetos</b>
<b>Equipos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ (01) Una laptop.</li> <li>✓ (01) Una cámara o videocámara.</li> <li>✓ (01) Un módulo para el sistema de adquisición de datos.</li> <li>✓ (01) Un taladro con su juego de brocas para concreto y ladrillo.</li> <li>✓ (01) Una amoladora con discos para corte de ladrillo.</li> <li>✓ (01) Un botiquín de primeros auxilios.</li> </ul>

<b>Instrumentos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ (01) Un multímetro (con pilas).</li> <li>✓ (01) Un reloj.</li> <li>✓ (02) Dos balanzas romanas de capacidad máxima 100 kg.</li> <li>✓ (01) Una balanza mecánica de plataforma con billas de capacidad máxima 500 kg.</li> <li>✓ (01) Una escuadras de acero para cantero 16"x24".</li> <li>✓ (01) Una reglas metálica de 60 cm.</li> <li>✓ (01) Un nivel.</li> </ul>
<b>Accesorios</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ (02) Dos cascos de seguridad industrial.</li> <li>✓ (02) Dos visores de seguridad industrial.</li> <li>✓ (02) Dos uniformes de seguridad industrial.</li> <li>✓ (08) Ocho pares de guantes de seguridad industrial.</li> <li>✓ (04) Cuatro lentes de seguridad industrial.</li> <li>✓ (04) Cuatro a más filtros de protección respiratoria.</li> <li>✓ (02) Dos linternas de mano a pilas.</li> <li>✓ (01) Una linterna solar de mano.</li> <li>✓ (01) Una linterna de cabeza.</li> <li>✓ (01) Una cuchilla multiuso de corte tipo x-acto, con agarre de goma.</li> <li>✓ (04) Cuatro desarmadores con punta plana de diferentes tamaños.</li> <li>✓ (02) Dos desarmadores con punta de estrella de diferentes tamaños.</li> <li>✓ (03) Tres cutter.</li> <li>✓ (01) Un alicata universal.</li> <li>✓ (01) Un alicata de corte.</li> <li>✓ (01) Un alicata tipo pinza.</li> <li>✓ (01) Una prensadora de terminales.</li> <li>✓ (01) Un juego de llaves.</li> <li>✓ (01) Un adaptador micro SD a USB.</li> <li>✓ (01) Una tarjeta micro SD 8GB.</li> </ul>
<b>Otros materiales</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ (02) Dos bolsos de lona con sus respectivos accesorios: tiras de driza y anillos de metal.</li> <li>✓ (02) Dos trozos de driza de alta resistencia, aproximadamente 3 m c/u (para colgar las balanzas romanas).</li> <li>✓ (02) Dos tachos o baldes plásticos industriales de alta resistencia de 50 litros cada uno.</li> <li>✓ (01) Un rollo de manguera transparente.</li> <li>✓ (01) Un carrete de extensión eléctrica.</li> <li>✓ (01) Un cable de extensión eléctrica color naranja.</li> <li>✓ (08) Ocho adaptadores de enchufe (tipo plano-redondo y viceversa).</li> <li>✓ (02) Dos rollos de driza fina de 15 m de largo.</li> <li>✓ (01) Una wincha de 5 m.</li> <li>✓ (01) Una wincha de 10 m.</li> <li>✓ (06) Seis pilas tipo D para linternas.</li> <li>✓ (07) Tres pilas tipo AAA para linterna de cabeza.</li> <li>✓ (02) Dos rollos de cinta aislante.</li> <li>✓ (01) Un rollo de cinta masking tape.</li> <li>✓ (02) Dos tablas oficio con broche de metal.</li> <li>✓ (01) Un lapicero.</li> <li>✓ (01) Una tijera.</li> <li>✓ (01) Un rollo de cable vulcanizado 2x20 AWG de 20m.</li> <li>✓ (03) Tres cajas 85x85mm para los transmisores de las RTD Pt100.</li> </ul>

- 
- ✓ (01) Una bolsa de cintillos con 100 unidades de 3.6x150mm.
  - ✓ (01) Una bolsa de cintillos con 100 unidades de 3.6x250mm.
  - ✓ (01) Una caja de bolsas de plástico con cierre hermético resellables.
  - ✓ (04) Cuatro conectores transparentes por cada sensor que se utilice.
  - ✓ (02) Dos rollos de papel aluminio.
  - ✓ (08) Ocho sujetadores prensa en C de 2'.
  - ✓ (12) Doce niples 3/4"x4" galvanizado.
  - ✓ (10) Diez niples 3/4"x2" galvanizado.
  - ✓ (05) Cinco uniones universales de 3/4".
  - ✓ (01) Un rollo de alambre negro 16.
  - ✓ (01) Un diente de sierra.
  - ✓ (01) Un juego de cinceles.
  - ✓ (01) Una comba.
  - ✓ (01) Un martillo.
  - ✓ (01) Una bolsa de 14 unidades de paños Scotch Brite 38cmx38cm.
  - ✓ (01) Una bolsa de trapos industriales.
  - ✓ (01) Un pote de silicona Sikaflex sellador y adhesivo.
  - ✓ (01) Una pistola para silicona.
- 

Fuente: Elaboración propia.

## 3.2. Procedimientos<sup>11</sup>

### 3.2.1. Pesaje de bagazo combustible

El bagazo combustible se encuentra ubicado en la bagacera de cada módulo panelero. Los materiales y equipos que se necesitan para esta tarea son:

- (02) Dos bolsos de lona con sus respectivos accesorios: tiras de driza y anillos de metal. Los detalles para la confección de este prototipo se encuentra en el Anexo G.
- (02) Dos balanzas romanas de capacidad máxima 100 kg.
- (02) Dos trozos de driza de alta resistencia, aproximadamente 3 m c/u. (para colgar las balanzas romanas).
- (08) Ocho pares de guantes de cuero de seguridad industrial.
- (04) Cuatro lentes de seguridad industrial.
- (04) Cuatro a más filtros de protección respiratoria.

Primero se debe ubicar el punto de apoyo donde se instalará el sistema de pesaje utilizando la balanza romana, cuidando los aspectos de seguridad. Se recomienda que sea una viga de concreto armado o estructura de acero, pasante o en voladizo en la zona cercana a la bagacera. Después de haber ubicado el punto de apoyo, se pasa el trozo de driza a través del apoyo, asegurando que no se deslice, e inmediatamente se engancha la balanza romana a una altura prudencial para que siempre se encuentre en suspensión y se pueda tomar una adecuada lectura de las mediciones que haga la balanza.

Se debe iniciar el llenado de cada bolso de lona con el bagazo (u otro material de consumo) que se usará en la hornilla (ver figura 3.14). Cabe recordar que se debe usar correctamente el equipo de seguridad correspondiente para evitar un incidente o accidente.

---

<sup>11</sup> El presente apartado ha sido elaborado utilizando la referencia bibliográfica [19].



**Figura 3.14 - Llenado de la lona con el bagazo combustible.**

Fuente: Elaboración propia, tomada en el módulo panelero Santa Rosa de Chonta, Montero – Ayabaca – Piura.

Luego de llenar el bolso de lona con bagazo, se traslada hasta debajo de la balanza romana instalada y se alza con todo su contenido, con ayuda de 4 personas como mínimo, hasta enganchar los anillos de metal de los extremos de la lona con el gancho de la balanza romana (ver figura 3.15). Se espera un momento hasta que la balanza se estabilice y se anota el peso del bolso lleno. Este procedimiento se repite hasta pesar todo el bagazo que se usará en la hornilla.



**Figura 3.15 - Alza de la lona con el bagazo combustible.**

Fuente: Elaboración propia, tomada en el módulo panelero Santa Rosa de Chonta, Montero – Ayabaca.

Se debe recordar restar el peso del bolso de lona con sus accesorios pues no forma parte del combustible a utilizar en la hornilla. Además, se recomienda separar los montículos de bagazo ya pesado para controlar cuanto bagazo se ha consumido realmente en la hornilla y así no volver a pesar el bagazo excedente en la alimentación de la hornilla.

Con este procedimiento se obtiene:

$m_{bgh}$  : Masa de bagazo húmedo usado en la hornilla [kg]

### 3.2.2. Pesaje de la caña de azúcar

La caña de azúcar se encuentra apilada en el cañatero del módulo panelero para asegurar una operación continua de la misma. Se debe recordar que el tiempo de apronte máximo recomendado es de cinco días para no degradar la calidad de la panela a producir, y cuando la caña se destina a panela y se encuentra madura o sobremadura no se debe almacenar por más de tres días (Hugo García et al, 2007). Los materiales y equipos que se necesitan para esta tarea son:

- (02) Dos bolsos de lona con sus respectivos accesorios: tiras de driza y anillos de metal. Los detalles para la confección de este prototipo se encuentra en el Anexo G.
- (02) Dos balanzas romanas de capacidad máxima 100 kg.
- (02) Dos trozos de driza de alta resistencia, aproximadamente 3 m c/u. (para colgar las balanzas romanas).
- (04) Cuatro pares de guantes de cuero de seguridad industrial.
- (04) Cuatro lentes de seguridad industrial.
- (04) Cuatro a más filtros de protección respiratoria.

Primero se debe ubicar el punto de apoyo donde se instalará el sistema de pesaje utilizando la balanza romana, cuidando los aspectos de seguridad. Se recomienda que sea una viga de concreto armado o estructura de acero, pasante o en voladizo en la zona cercana al cañatero. Después de haber ubicado el punto de apoyo, se pasa el trozo de driza a través del apoyo, asegurando que no se deslice, e inmediatamente se engancha la balanza romana a una altura prudencial para que siempre se encuentre en suspensión y se pueda tomar una adecuada lectura de las mediciones que haga la balanza.

Se llena el bolso de lona con la caña de azúcar que se usarán en la molienda. Cabe recordar que se debe usar correctamente el equipo de seguridad correspondiente para evitar un incidente o accidente.

Luego de llenar el bolso de lona con caña de azúcar, se traslada hasta debajo de la balanza romana instalada y se alza con todo su contenido, con ayuda de 4 personas como mínimo, hasta enganchar los anillos de metal de los extremos de la lona con el gancho de la balanza romana. Se espera un momento hasta que la balanza se estabilice y se anota el peso del bolso lleno. Este procedimiento se repite hasta pesar la caña de azúcar a procesar. Se debe recordar restar el peso del bolso de lona con sus accesorios pues no forma parte de la caña de azúcar a procesar.

Con este procedimiento se obtiene:

$m_{ca}$  : Masa de la caña de azúcar [kg]

### 3.2.3. Pesaje de bagazo fresco

El bagazo fresco se obtiene continuamente del proceso de molienda de la caña. Los materiales y equipos que se necesitan para esta tarea son:

- (02) Dos bolsos de lona con sus respectivos accesorios: tiras de driza y anillos de metal. Los detalles para la confección de este prototipo se encuentra en el Anexo G.
- (02) Dos balanzas romanas de capacidad máxima 100 kg.
- (02) Dos trozos de driza de alta resistencia, aproximadamente 3 m c/u. (para colgar las balanzas romanas).
- (04) Cuatro pares de guantes de cuero de seguridad industrial.
- (04) Cuatro lentes de seguridad industrial.
- (04) Cuatro a más filtros de protección respiratoria.

Primero se debe ubicar el punto de apoyo donde se instalará el sistema de pesaje utilizando la balanza romana, cuidando los aspectos de seguridad. Se recomienda que sea una viga de concreto armado o estructura de acero, pasante o en voladizo en la zona cercana a la sala de molienda. Después de haber ubicado el punto de apoyo, se pasa el trozo de driza a través del apoyo, asegurando que no se deslice, e inmediatamente se engancha la balanza romana a una altura prudencial para que siempre se encuentre en suspensión y se pueda tomar una adecuada lectura de las mediciones que haga la balanza.

Se llena el bolso de lona con el bagazo fresco que sale inmediatamente después de la molienda. Cabe recordar que se debe usar correctamente el equipo de seguridad correspondiente para evitar un incidente o accidente.

Luego de llenar el bolso de lona con bagazo fresco, se traslada hasta debajo de las balanza romana instalada y se alza con todo su contenido, con ayuda de 4 personas como mínimo, hasta enganchar los anillos de metal de los extremos de la lona con el gancho de la balanza romana. Se espera un momento hasta que la balanza se estabilice y se anota el peso del bolso lleno. Este procedimiento se repite hasta pesar todo el bagazo fresco producido.

Se debe recordar restar el peso del bolso de lona con sus accesorios pues no forma parte del bagazo fresco. Además, es importante realizar este pesaje de bagazo fresco de manera inmediata, ya que pierde peso por la evaporación del agua restante contenida.

Con este procedimiento se obtiene:

$$m_{bgf} : \text{Masa de bagazo fresco [kg]}$$

### 3.2.4. Medición de intervalos de tiempos

Los tiempos que se mencionan a continuación deben de anotarse para cada productor de panela granulada y se recomienda el formato horas y dd/mm/aa para luego calcular las diferencias de tiempos correspondientes y poder realizar los balances termodinámicos e indicadores que se desarrollarán en el próximo capítulo. Además, son muy importantes para poder elegir adecuadamente los datos obtenidos de los sensores presentes en el proyecto.

- Tiempo de encendido de la hornilla.
- Tiempo de duración de la molienda de la caña de azúcar (desde el inicio hasta su final).
- Tiempo en que ingresan los jugos en la paila clarificadora.

- Tiempo de duración de cada punteo.
- Tiempo de salida del último punteo.
- Tiempo en que culminan las actividades (Se hace referencia al momento en que se terminó de empacar y pesar el último saco con panela).
- Tiempo en que se realiza alguna pausa o interrupción en el proceso por diversos inconvenientes.

### 3.2.5. Medición del porcentaje de extracción

Los materiales y equipos que se necesitan para esta tarea son:

- (01) Una balanza mecánica de plataforma, con capacidad de 500 kg.
- (02) Dos tachos o baldes plásticos industriales de alta resistencia de 50 litros cada uno.
- (01) Un bolso de lona con sus respectivos accesorios: tiras de driza y anillos de metal. Los detalles para la confección de este prototipo se encuentra en el Anexo G.
- (01) Una balanza romana de capacidad máxima 100 kg.
- (01) Un trozo de driza de alta resistencia, aproximadamente 3 m c/u. (para colgar la balanza romana).
- (04) Cuatro pares de guantes de cuero de seguridad industrial.
- (04) Cuatro lentes de seguridad industrial.
- (04) Cuatro a más filtros de protección respiratoria.

Antes se debe realizar el montaje de la balanza romana en un lugar estratégico (apoyo) con ayuda de la driza y demás, como se ha mencionado en cada medición de pesaje con el bolso de lona.

Primero, se pesa una determinada cantidad de caña de azúcar con ayuda del bolso de lona y accesorios. A esta cantidad de caña de azúcar se le denomina “muestra de caña de azúcar”.

Con el molino sin funcionar, se desacopla la conexión (tubería) que hay entre el molino y el pre-limpiador 1 para recoger el jugo de caña de azúcar en los baldes plásticos industriales de 50 litros cada uno. Después se inicia la molienda de la muestra de caña de azúcar y se recoge el jugo obtenido de la molienda de la muestra de caña de azúcar.

Posteriormente se traslada y acomoda los baldes industriales con el jugo recolectado, hacia la balanza mecánica de plataforma y se realiza el pesaje del jugo obtenido. Hay que tener presente que se debe restar el peso de los baldes, para obtener sólo el peso del jugo de caña de azúcar recolectado.

El porcentaje de extracción se calcula con la siguiente ecuación:

$$PE = \frac{\text{Peso del jugo de la muestra de caña de azúcar}}{\text{Peso de la muestra de caña de azúcar}} \times 100 \quad [\%]$$

Y con esta relación se obtiene indirectamente:

$m_{ca}$  : Masa de la caña de azúcar [kg]

ó

$m_{bgf}$  : Masa del bagazo fresco [kg]

### 3.2.6. Medición de la temperatura y composición de los gases en la base de la chimenea

Estas medidas son necesarias para cuantificar la cantidad de energía perdida con los gases de combustión que son evacuados a través de la chimenea. Los materiales y equipos que se necesitan para esta tarea son:

- (01) Un analizador de gases, que mida concentraciones básicas de CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO y NO.
- (01) Un taladro y brocas (2 brocas para concreto de 1/2" de diámetro).
- (01) Un carrete de extensión eléctrica de longitud necesaria para llegar al suministro de energía eléctrica, con adaptadores de enchufe plano-redondo y viceversa.
- (02) Dos pares de guantes de cuero de seguridad industrial.
- (02) Dos lentes de seguridad industrial.
- (02) Dos filtros de protección respiratoria.

Antes de encender la hornilla, para evitar accidentes, se procede a escoger un punto por donde se realizará la perforación de la pared de la base de la chimenea. Para ello se usa el carrete de extensión eléctrica (si es necesario) hasta llevar la alimentación de energía eléctrica cerca del punto de trabajo, se instala correctamente la broca para concreto en el taladro y se utiliza los equipos de seguridad industrial adecuados.

Después de realizar la perforación, se inserta la sonda del analizador de gases hasta que entre en contacto directo con los gases de combustión.

Cabe señalar que los datos obtenidos y guardados por el analizador de gases serán transferidos a la computadora por el software del analizador de gases.

Con este procedimiento se obtiene:

$T_{salida}$  : Temperatura de salida de los gases en la base de la chimenea [K]

Concentraciones de los siguientes componentes: CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO

### 3.2.7. Medición de la velocidad de los gases en la base de la chimenea

La velocidad de los gases es necesaria para calcular el flujo másico de los gases de combustión. Los materiales y equipos que se necesitan para esta tarea son:

- (01) Un analizador de gases, que mida concentraciones básicas de CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO y NO.
- (01) Un taladro y brocas (2 brocas para concreto de 1/2" de diámetro).
- (01) Un carrete de extensión eléctrica de longitud necesaria para llegar al suministro de energía eléctrica, con adaptadores de enchufe plano-redondo y viceversa.

- (02) Dos pares de guantes de cuero de seguridad industrial.
- (02) Dos lentes de seguridad industrial.
- (02) Dos filtros de protección respiratoria.

Antes de encender la hornilla, para evitar accidentes, se procede a escoger un punto en donde se realizará la perforación de la pared de la base de la chimenea. Se recomienda escoger un área que pueda ser medida con facilidad, en este caso, el área de la melotera. Se usa el carrete de extensión eléctrica (si es necesario) hasta llevar la alimentación de energía eléctrica cerca del punto de trabajo, se instala correctamente la broca para concreto en el taladro y se utiliza los equipos de seguridad industrial adecuados.

Después de realizar la perforación, se inserta el tubo Pitot del analizador de gases hasta que entre en contacto directo con los gases de combustión.

Cabe señalar, que los datos obtenidos y guardados por el analizador gases serán transferidos a la computadora por el software del analizador de gases (ver Anexo B).

Con este procedimiento se obtiene:

$V_{salida}$  : Velocidad de salida de los gases en la base de la chimenea [m/s]

### 3.2.8. Medición de la temperatura del jugo en las pailas y en el ducto de gases

La temperatura del jugo en las pailas es necesaria para el cálculo de la energía aprovechada en el proceso.

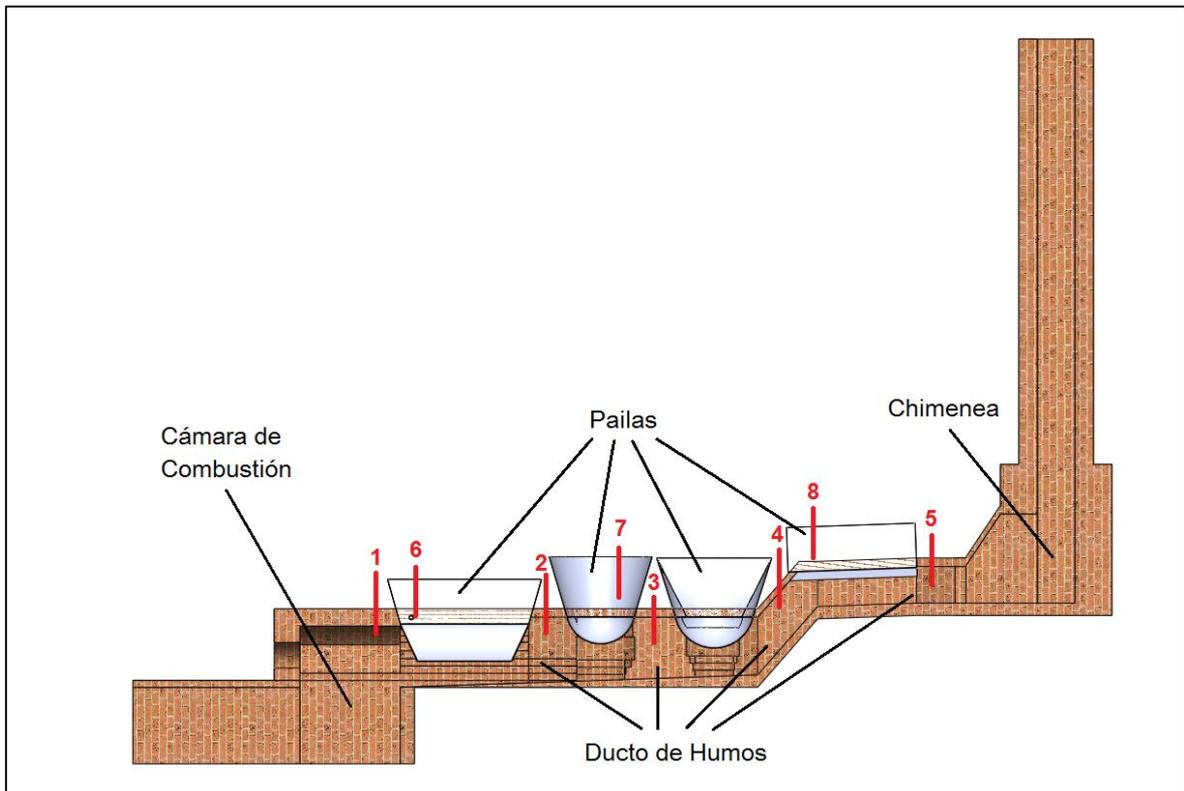
En la figura 3.16 se muestra el esquema de instalación de los sensores de temperatura utilizados para nuestro caso de estudio del presente proyecto, nombrándolos para un mejor control e identificación.

Los sensores de temperatura son instalados correctamente en cada paila y se toma datos instantáneos de todas las pailas, que son almacenados en el PLC. Cada una de las temperaturas medidas se describen a continuación en la tabla 3.10.

Un punto importante es medir la temperatura a la cual se realiza la clarificación, evaporación, punteo y salida de cachaza. Es por ello que se debe de tomar en cuenta los tiempos en que ocurren cada uno de estos eventos. Este procedimiento se debe repetir cada vez que se realice el trasbase de jugos o mieles, para después calcular la media de las temperaturas.

Con este procedimiento se obtiene:

$T_i$  : Temperaturas de distintas zonas de la hornilla panelera [K]



**Figura 3.16 - Esquema de instalación de los sensores de temperatura en la hornilla panelera.**  
Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 3.10 - Descripción de las temperaturas indicadas en el esquema de la figura 16.**

<b>Nombre</b>	<b>Descripción</b>	<b>Sensor utilizado</b>
<b>1</b>	Temperatura en la entrada del ducto de gases	Termocupla tipo R
<b>2</b>	Temperatura antes de la paila punteadora semiesférica.	Termocupla tipo R
<b>3</b>	Temperatura después de la paila punteadora semiesférica.	Termocupla tipo R
<b>4</b>	Temperatura antes de la paila clarificadora aleteada.	Termocupla tipo K
<b>5</b>	Temperatura en la salida del ducto de gases.	Termocupla tipo K
<b>6</b>	Temperatura en la paila evaporadora semicilíndrica	RTD Pt100
<b>7</b>	Temperatura en la paila punteadora semiesférica.	RTD Pt100
<b>8</b>	Temperatura en la paila clarificadora aleteada.	RTD Pt100

Fuente: Elaboración propia.

### 3.2.9. Medición de grados Brix de los jugos

El pH y los grados Brix son necesarios para determinar la calidad de la panela. Los materiales y equipos que se necesitan para esta tarea son:

- (01) Un refractómetro de laboratorio simple (ver figura 3.11) o uno digital, con un rango de operación de 0 a 50 °Bx. Con sus accesorios de limpieza como: algodón, agua destilada y un pequeño depósito o jeringa para coger algunas gotas de muestra de jugo de caña de azúcar.

Para medir los grados Brix en un refractómetro simple, se toma algunas gotas de jugo de caña, se colocan en el prisma del refractómetro y se observa la cantidad de grados Brix. Es recomendable un refractómetro digital ya que las medidas son más precisas que el refractómetro convencional y la diferencia de grados Brix entre el prelimpiador, la paila de almacenamiento y clarificación son muy bajas, incluso llegando a diferencias de 0.5 grados Brix.

Hay que evitar usar las mediciones de grados Brix para el cálculo de indicadores, así por ejemplo en el caso que se use para el cálculo del peso del jugo de caña se pueden presentar errores hasta de una tonelada.

Con este procedimiento se obtiene:

$$\begin{aligned} \text{°}B_{jcl} &: \text{Grados Brix del jugo de caña clarificado [°Bx]} \\ \text{°}B_{panela} &: \text{Grados Brix de la panela granulada [°Bx]} \end{aligned}$$

### 3.2.10. Medición de las condiciones ambientales

Las condiciones ambientales son necesarias para estimar la energía perdida en los gases de combustión evacuados a través de la chimenea. Con ellas se determina el agua presente en el aire y la temperatura real de ebullición del agua. Los materiales y equipos que se necesitan para esta tarea son:

- (01) Un higrómetro con sensor de temperatura. (ver figura 3.13).
- (01) Un barómetro o altímetro.

Con el higrómetro Eurotron modelo Mini T+RH se puede obtener la humedad relativa del ambiente y, con su sensor adicional de temperatura, la temperatura ambiental. Estas mediciones deben de realizarse en los exteriores del módulo panelero porque en su interior las condiciones de temperatura y humedad son mayores por las continuas evaporaciones. Además, el objetivo es analizar las pérdidas con respecto al medio ambiente.

Con un barómetro se obtiene la presión atmosférica. En el caso de no contar con un barómetro, se hace uso de un altímetro y con este dato (metros sobre el nivel del mar) dirigirse a las tablas que se encuentran en la referencia bibliográfica [3]; y estimar una presión a dicha altura.

Todas estas mediciones se deben realizar a lo largo del proceso de obtención de la panela (ya sea día, tarde, noche o madrugada) y con éstas calcular una media representativa.

Con este procedimiento se obtiene directamente:

$T_0$  : Temperatura ambiente [K]

$p_0$  : Presión atmosférica [kPa]

$\phi_a$  : Humedad relativa del ambiente [%]

### 3.2.11. Pesaje del bagacillo

El bagacillo es un residuo obtenido en los prelimpiadores y antes del proceso de clarificación. Esta medición se necesita para obtener la cantidad de jugo limpio. Los materiales y equipos que se necesitan para esta tarea son:

- (01) Una balanza mecánica de plataforma.
- (01) Un tacho o balde plástico industrial.

Se debe recolectar todo el bagacillo que se ha eliminado del proceso en un tacho o balde plástico industrial. No es necesario conservarlo, sino saber cuántos kilogramos se han retirado del proceso; en algunas plantas paneleras se usa como abono, alimento para animales o simplemente se desecha.

Posteriormente se traslada y acomoda el tacho o balde industrial con el bagacillo recolectado, hasta la balanza mecánica de plataforma y se realiza el pesaje correspondiente. Hay que tener presente que se debe restar el peso del tacho o balde, para obtener sólo el peso del bagacillo recogido.

Con este procedimiento se obtiene directamente:

$m_{bagacillo}$  : Masa del bagacillo obtenido en el proceso [kg]

### 3.2.12. Pesaje de la cachaza

La cachaza es una capa superficial que se forma en la paila clarificadora debido a los agentes floculantes que se adicionan en dicha paila y que permiten extraer este subproducto por medios físicos. Esta medición se necesita para obtener el peso del jugo clarificado (sin bagacillo y sin cachaza). Los materiales y equipos que se necesitan para esta tarea son:

- (01) Una balanza mecánica de plataforma.
- (01) Un tacho o balde plástico industrial.

La cachaza formada se retira de la paila clarificadora y se almacena en un tacho o balde plástico industrial. Luego se traslada hasta la balanza mecánica de plataforma y se realiza el pesaje. Cabe recordar que se debe restar el peso del tacho o balde, para obtener el peso sólo de la cachaza recogida.

Tener en cuenta que no es necesario conservar la cachaza recolectada; lo importante es anotar cuántos kilogramos se han retirado del proceso. En algunos casos se usa como alimento para animales, abono o simplemente se desecha.

Con este procedimiento se obtiene directamente:

$m_{cch}$  : Masa de la cachaza obtenida en el proceso [kg]

### 3.2.13. Pesaje de la panela granulada

Esta medición resulta importante, ya que influye directamente en la determinación de los indicadores del proceso de la planta de panela granulada. Para esta tarea se necesita:

- (01) Una balanza mecánica de plataforma.

Una vez envasada la panela granulada, se pesa en la balanza mecánica de plataforma, tal como se muestra en la figura 3.17. Es necesario contabilizar también el peso del confitillo (producto que no llegó al punto de obtención de la panela granulada).



**Figura 3.17 - Pesaje de la panela granulada.**

Fuente: Elaboración propia, tomada en el módulo panelero Cruz Misionera, Jililí – Ayabaca.

Y con este pesaje se obtiene directamente:

$m_{panela}$  : Masa de la panela obtenida del proceso [kg]

En el caso que se obtenga confitillo, este subproducto se agrega a la masa de la panela granulada para fines del cálculo de la obtención de indicadores, ya que dicho subproducto no depende del funcionamiento de la hornilla panelera, sino de la experiencia y habilidad del operario y del proceso.



## Capítulo 4

### **Caso estudio: Análisis termodinámico y determinación de indicadores energéticos y de producción en la hornilla panelera de Cruz Misionera – Hualambi – Jililí – Ayabaca.**

En base a la metodología descrita en el capítulo 2, se ha utilizado el software de modelación matemática MATLAB R2014a<sup>12</sup> para implementar un programa de cálculo<sup>13</sup> que permitirá obtener las magnitudes relacionadas al análisis termodinámico, además de los indicadores energéticos y de producción de la hornilla panelera.

Cabe resaltar que la metodología propuesta es independiente del módulo panelero a evaluar. Por lo tanto, la metodología puede aplicarse a cualquier hornilla panelera en operación, siempre y cuando se cuenten con los datos requeridos y se realicen las mediciones correspondientes.

El desarrollo de la presente tesis se enmarca en el Proyecto N°136-PNICP-PIAP-2015 “*Optimización energética del proceso de elaboración de azúcar orgánica mediante la Implementación de un intercambiador de calor tipo Pirotubular*”. Por ello, el caso de estudio seleccionado es la hornilla panelera de Cruz Misionera ubicada en Hualambi, Jililí – Ayabaca; y en noviembre del 2015 se ha realizado un viaje de campo para el desarrollo de las pruebas experimentales y mediciones necesarias para nuestro análisis.

#### **4.1. Estructura del programa de cálculo**

El programa de cálculo ha sido estructurado en tres etapas: pre-proceso, proceso y post-proceso, con la finalidad de permitir una mejor gestión de los datos, eficiencia y flexibilidad durante el proceso de cálculo, así como también una adecuada visualización gráfica de los resultados.

En la figura 4.1 se muestra un diagrama de flujo básico de la estructura del programa, cuyo código desarrollado se encuentra en el Anexo H.

---

<sup>12</sup> Herramienta de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado con un lenguaje de programación propio (Lenguaje M). Entre sus prestaciones básicas se tiene: la manipulación de matrices, la visualización gráfica de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario (GUI) y la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos de hardware.

<sup>13</sup> Para desarrollar la arquitectura del programa de cálculo se ha utilizado la referencia [22].

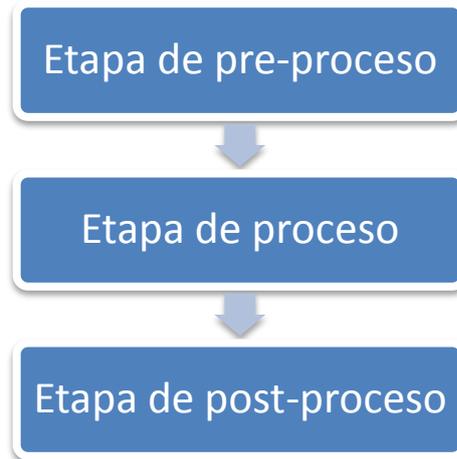


Figura 4.1 - Diagrama de flujo básico de la estructura del programa de cálculo.  
Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.1. Etapa de pre-proceso

Esta parte inicial del programa de cálculo permite introducir los datos necesarios para desarrollar correctamente el análisis termodinámico.

A continuación, en la tabla 4.1 se muestran las magnitudes y unidades solicitadas por el programa.

Tabla 4.1 - Magnitudes solicitadas por el programa con sus respectivas unidades.

Símbolo	Magnitud	Unidades
$\tilde{x}_{CO_2,bs}$	Fracción molar de CO <sub>2</sub> en base seca	$\frac{\text{kmol CO}_2 \text{ en base seca}}{\text{kmol gases combustión bs}}$
$\tilde{x}_{CO,bs}$	Fracción molar de CO en base seca	$\frac{\text{kmol CO en base seca}}{\text{kmol gases combustión bs}}$
$\tilde{x}_{O_2,bs}$	Fracción molar de O <sub>2</sub> en base seca	$\frac{\text{kmol O}_2 \text{ en base seca}}{\text{kmol gases combustión bs}}$
$\tilde{x}_{N_2,bs}$	Fracción molar de N <sub>2</sub> en base seca	$\frac{\text{kmol N}_2 \text{ en base seca}}{\text{kmol gases combustión bs}}$
$\phi_{aire}$	Humedad relativa de aire	%
Altitud	Altitud del módulo panelero	m.s.n.m
$T_0$	Temperatura ambiente	°C
$T_{ducto,entrada}$	Temperatura de los gases en la entrada del ducto de humos	°C
$T_{ducto,salida}$	Temperatura de los gases en la salida del ducto de humos	°C
$\dot{m}_g$	Flujo másico de gases de combustión	$\frac{\text{kg gases combustión}}{\text{h}}$
$k$	Número de pailas (o tramos del ducto de humos)	Adimensional
$\dot{Q}_{aprovechable,k}$	Potencia térmica aprovechable por la paila k-ésima	$\frac{\text{MJ}}{\text{h}}$

$\dot{m}_{bgh,consumido}$	Flujo másico de bagazo húmedo consumido	$\frac{\text{kg bagazo húmedo}}{\text{h}}$
$\omega_{bgh,consumido}$	Humedad del bagazo consumido en base húmeda	$\frac{\text{kg H}_2\text{O bagazo húmedo}}{\text{kg bagazo húmedo}}$

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.2. Etapa de proceso

Consiste en la ejecución de una secuencia de instrucciones (un conjunto de operaciones y cálculos) para transformar los datos de entrada en resultados. Lleva a cabo la resolución de un sistema de ecuaciones lineales para obtener las magnitudes más importantes del análisis termodinámico y los indicadores energéticos y de producción del módulo panelero.

En la figura 4.2 se muestra el diagrama de flujo de la estructura del programa de cálculo que se implementará en el software MATLAB R2014a que permitirá la determinación de los indicadores energéticos y de producción.

La simulación numérica inicia con el ingreso de los valores experimentales, numéricos y/o teóricos de las variables. A continuación se determinan las variables restantes en los balances de masa, energía, entropía y exergía en la cámara de combustión y en el ducto de humos. Después de esto, se calculan los indicadores energéticos y de producción. Finalmente, se muestran en pantalla los resultados del análisis termodinámico y los indicadores del módulo panelero.

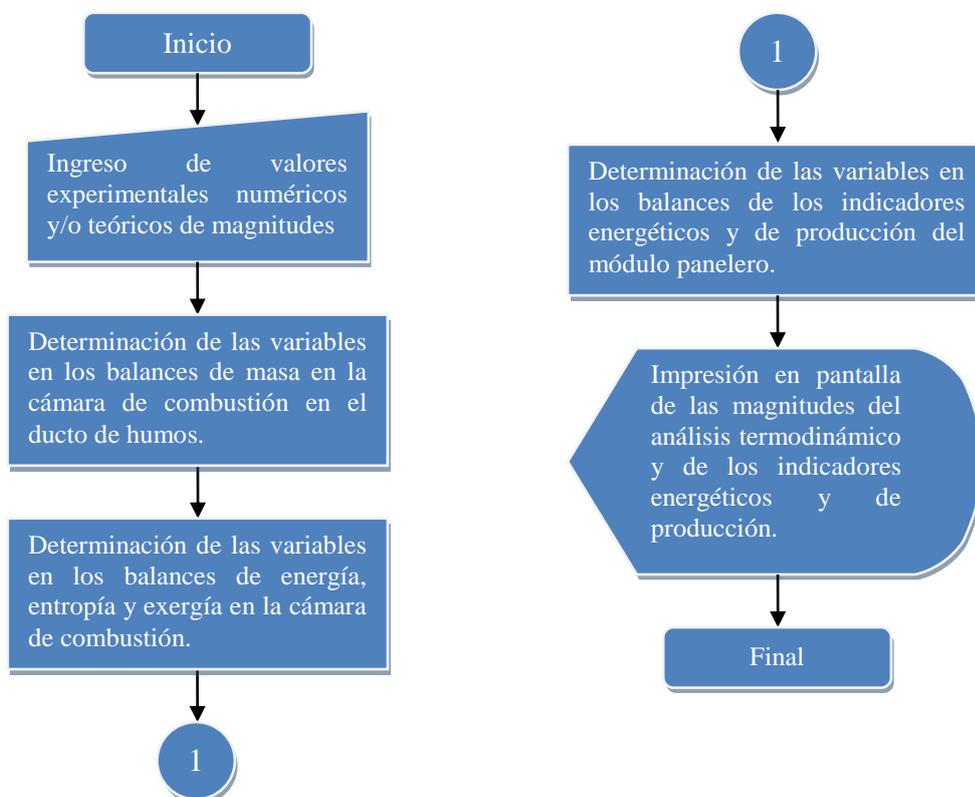


Figura 4.2 - Diagrama de flujo de la estructura del programa de cálculo en MATLAB.

Fuente: Elaboración propia.

### 4.1.3. Etapa de post-proceso

En esta etapa se muestran los resultados del análisis termodinámico y los valores de los indicadores energéticos y de producción que permite evaluar el desempeño de la hornilla panelera.

A continuación, en la tabla 4.2 se muestran las magnitudes y unidades que el programa calculará y mostrará al usuario.

**Tabla 4.2 - Magnitudes mostradas por el programa con sus respectivas unidades.**

<b>Símbolo</b>	<b>Magnitud</b>	<b>Unidades</b>
$\tilde{x}_{CO_2,bh}$	Fracción molar de CO <sub>2</sub> en base húmeda	$\frac{\text{kmol CO}_2 \text{ gases combustión}}{\text{kmol gases combustión}}$
$\tilde{x}_{CO,bh}$	Fracción molar de CO en base húmeda	$\frac{\text{kmol CO gases combustión}}{\text{kmol gases combustión}}$
$\tilde{x}_{O_2,bh}$	Fracción molar de O <sub>2</sub> en base húmeda	$\frac{\text{kmol O}_2 \text{ gases combustión}}{\text{kmol gases combustión}}$
$\tilde{x}_{N_2,bh}$	Fracción molar de N <sub>2</sub> en base húmeda	$\frac{\text{kmol N}_2 \text{ gases combustión}}{\text{kmol gases combustión}}$
$\tilde{x}_{H_2O,bh}$	Fracción molar de H <sub>2</sub> O en base húmeda	$\frac{\text{kmol H}_2\text{O gases combustión}}{\text{kmol gases combustión}}$
$\dot{Q}_{\text{suministrada}}$	Potencia térmica suministrada por la combustión del bagazo	$\frac{\text{MJ}}{\text{h}}$
$\dot{Q}_{\text{aprovechable}}$	Potencia térmica aprovechada por las pailas	$\frac{\text{MJ}}{\text{h}}$
$\dot{Q}_{\text{disponible}}$	Potencia térmica disponible en los gases de combustión	$\frac{\text{MJ}}{\text{h}}$
$\dot{Q}_{pc}$	Potencia térmica perdida por combustión incompleta	$\frac{\text{MJ}}{\text{h}}$
$\dot{Q}_{ch}$	Potencia térmica perdida por los gases de combustión en la chimenea	$\frac{\text{MJ}}{\text{h}}$
$\dot{Q}_{pp}$	Potencia térmica perdida a través de las paredes	$\frac{\text{MJ}}{\text{h}}$
$\eta_{\text{combustión}}$	Eficiencia de combustión	%
$\eta_{\text{transferencia}}$	Eficiencia de transferencia de calor	%
$\eta_{\text{térmica}}$	Eficiencia térmica de la hornilla panelera	%
$\dot{S}_{\text{gen,CC}}$	Tasa de entropía generada en la cámara de combustión	$\frac{\text{MJ}}{\text{h} \cdot \text{K}}$
$\dot{S}_{\text{gen,DH}}$	Tasa de entropía generada en el ducto de humos	$\frac{\text{MJ}}{\text{h} \cdot \text{K}}$
$\dot{S}_{\text{gen}}$	Tasa de entropía generada en la hornilla panelera	$\frac{\text{MJ}}{\text{h} \cdot \text{K}}$
$\dot{X}_{\text{destruida,CC}}$	Tasa de exergía destruida en la cámara de combustión	$\frac{\text{MJ}}{\text{h}}$

$\dot{X}_{\text{destruida,DH}}$	Tasa de exergía destruida en el ducto de humos	$\frac{\text{MJ}}{\text{h}}$
$\dot{X}_{\text{destruida}}$	Tasa de exergía destruida en la hornilla panelera	$\frac{\text{MJ}}{\text{h}}$

Fuente: Elaboración propia.

## 4.2. Simulación del caso de estudio

Lo ideal sería que todos los datos requeridos sean obtenidos experimentalmente a través de las mediciones realizadas en el viaje de campo.

En este caso, solo se obtuvo una parte de los datos de forma experimental. Por ello, para poder aplicar este procedimiento, se ha debido recurrir a datos numérico-computacionales y teóricos, generados en el marco del mismo Proyecto N°136-PNICP-PIAP-2015.

En la tabla 4.3 se observan los valores de cada magnitud que han sido ingresados al programa.

Tabla 4.3 - Valores ingresados al programa para realizar el análisis termodinámico.

Magnitud	Valores y unidades	Observación
Fracción molar de CO <sub>2</sub> en base seca	0.06913 $\frac{\text{kmol CO}_2 \text{ en base seca}}{\text{kmol gases combustión bs}}$	Dato experimental
Fracción molar de CO en base seca	0.05164 $\frac{\text{kmol CO en base seca}}{\text{kmol gases combustión bs}}$	Dato experimental
Fracción molar de O <sub>2</sub> en base seca	0.10359 $\frac{\text{kmol O}_2 \text{ en base seca}}{\text{kmol gases combustión bs}}$	Dato experimental
Fracción molar de N <sub>2</sub> en base seca	0.77563 $\frac{\text{kmol N}_2 \text{ en base seca}}{\text{kmol gases combustión bs}}$	Dato experimental
Humedad relativa de aire	60 %	Dato experimental
Altitud del módulo panelero	1440 m.s.n.m	Dato experimental
Temperatura ambiente	25 °C	Dato experimental
Temperatura de los gases en la entrada del ducto de humos	847 °C	Dato experimental
Temperatura de los gases en la salida del ducto de humos	447 °C	Dato experimental
Flujo másico de gases de combustión	1262.2 $\frac{\text{kg gases combustión}}{\text{h}}$	Dato experimental
Número de pailas (o tramos del ducto de humos)	4	Dato experimental
Potencia térmica aprovechable por la paila 1	158.57 $\frac{\text{MJ}}{\text{h}}$	Dato numérico
Potencia térmica aprovechable por la paila 2	50.4 $\frac{\text{MJ}}{\text{h}}$	Dato numérico
Potencia térmica aprovechable por la paila 3	36.9 $\frac{\text{MJ}}{\text{h}}$	Dato numérico

Potencia térmica aprovechable por la paila 4	161.87 $\frac{\text{MJ}}{\text{h}}$	Dato numérico
Flujo másico de bagazo húmedo consumido	149.71 $\frac{\text{kg bagazo húmedo}}{\text{h}}$	Dato experimental
Humedad del bagazo consumido en base húmeda	30 $\frac{\text{kg H}_2\text{O bagazo húmedo}}{\text{kg bagazo húmedo}}$	Dato experimental

Fuente: Elaboración propia.

Durante el desarrollo del programa se ha realizado un análisis gravimétrico del bagazo seco a fin de poder trabajar adecuadamente en el balance de entropía (ver Anexo I). Del mismo modo, se han tenido en cuenta las siguientes consideraciones:

- El tiempo de disminución de la cantidad de bagazo hasta anularse durante la concentración de las mieles igual a 10 minutos por punteo.
- El tiempo durante la extracción de las mieles de la hornilla y la transferencia del jugo de una paila a otra igual a 10 minutos por punteo.
- Es importante recordar que el analizador de gases mide las fracciones molares de los gases de combustión en base seca.
- Para el balance de entropía, el aire y el bagazo húmedo consumido entran por separado.
- La tasa neta de entropía por calor disipado en la pared de la cámara de combustión se tendrá en cuenta de manera conjunta con la tasa neta de entropía por calor disipado en la pared del ducto de humos dada la complejidad de separar las pérdidas de calor por la pared de la cámara de combustión de las pérdidas en las paredes del ducto de humos.
- El volumen de control incluye a las paredes del ducto de humos y de la cámara de combustión y los fondos de las pailas. De esta manera, la entropía generada por la tasa de transferencia de calor a través de las paredes y las pailas se genera dentro del volumen de control. En el caso de las paredes, exige conocer la tasa de calor disipado por las paredes del ducto de humos y de la cámara de combustión (determinado en el balance de energía) y la temperatura de la superficie será la del ambiente o contorno (25 °C). En el caso de las pailas, se toma la potencia térmica entregada a cada paila y la temperatura de la superficie será la de ebullición del jugo en las pailas.

En la tabla 4.4 se observan los valores de cada magnitud luego de haber procesado los datos que han sido ingresados al programa.

**Tabla 4.4 - Valores mostrados por el programa luego de realizar el análisis termodinámico.**

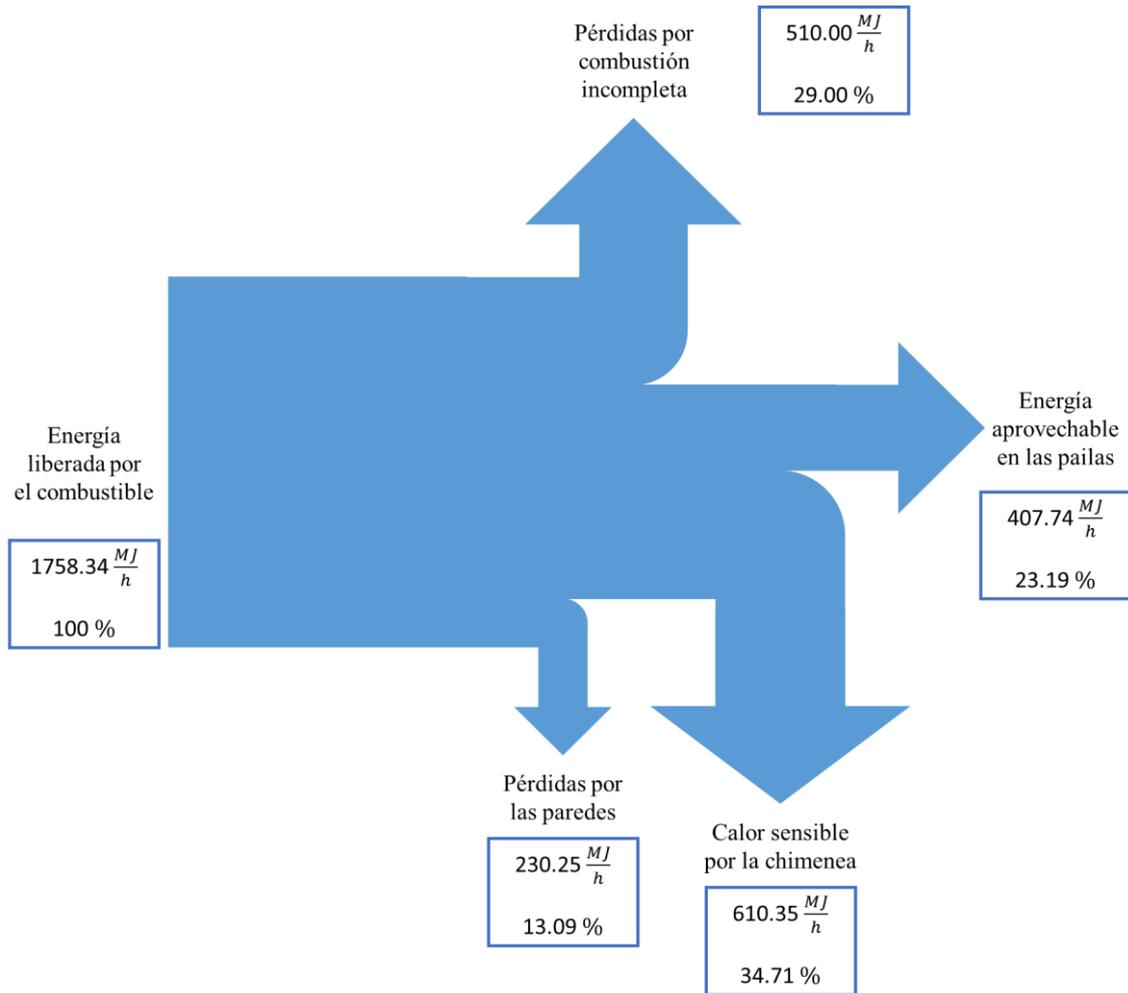
<b>Magnitud</b>	<b>Valores y unidades</b>
Fracción molar de CO <sub>2</sub> en base húmeda	0.05780 $\frac{\text{kmol CO}_2 \text{ gases combustión}}{\text{kmol gases combustión}}$
Fracción molar de CO en base húmeda	0.04318 $\frac{\text{kmol CO gases combustión}}{\text{kmol gases combustión}}$

Fracción molar de O <sub>2</sub> en base húmeda	0.08661	$\frac{\text{kmol O}_2 \text{ gases combustión}}{\text{kmol gases combustión}}$
Fracción molar de N <sub>2</sub> en base húmeda	0.64850	$\frac{\text{kmol N}_2 \text{ gases combustión}}{\text{kmol gases combustión}}$
Fracción molar de H <sub>2</sub> O en base húmeda	0.16392	$\frac{\text{kmol H}_2\text{O gases combustión}}{\text{kmol gases combustión}}$
Potencia térmica suministrada por la combustión del bagazo	1758.34	$\frac{\text{MJ}}{\text{h}}$
Potencia térmica aprovechada por las pailas	407.74	$\frac{\text{MJ}}{\text{h}}$
Potencia térmica disponible en los gases de combustión	1248.35	$\frac{\text{MJ}}{\text{h}}$
Potencia térmica perdida por combustión incompleta	510.00	$\frac{\text{MJ}}{\text{h}}$
Potencia térmica perdida por los gases de combustión en la chimenea	610.35	$\frac{\text{MJ}}{\text{h}}$
Potencia térmica perdida a través de las paredes	230.25	$\frac{\text{MJ}}{\text{h}}$
Eficiencia de combustión	71.00	%
Eficiencia de transferencia de calor	32.66	%
Eficiencia térmica de la hornilla panelera	23.19	%
Tasa de entropía generada en la cámara de combustión	2.214	$\frac{\text{MJ}}{\text{h} \cdot \text{K}}$
Tasa de entropía generada en el ducto de humos	1.177	$\frac{\text{MJ}}{\text{h} \cdot \text{K}}$
Tasa de entropía generada en la hornilla panelera	3.390	$\frac{\text{MJ}}{\text{h} \cdot \text{K}}$
Tasa de exergía destruida en la cámara de combustión	659.68	$\frac{\text{MJ}}{\text{h}}$
Tasa de exergía destruida en el ducto de humos	350.61	$\frac{\text{MJ}}{\text{h}}$
Tasa de exergía destruida en la hornilla panelera	1010.29	$\frac{\text{MJ}}{\text{h}}$

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4.3 se muestra el diagrama de Sankey<sup>14</sup> o de flujos de energía de la hornilla panelera para el caso de estudio.

<sup>14</sup> El diagrama de Sankey es un tipo de diagrama de flujo en el que la anchura de las flechas es proporcional a la cantidad de energía o potencia térmica. Muestra el balance de energía de forma gráfica y se utiliza para poner un énfasis visual en las transferencias importantes o flujos dentro de un sistema.



**Figura 4.3 - Diagrama de Sankey o de flujos de energía de la hornilla panelera para el caso de estudio.**

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 4.3 se puede observar que sólo el 23.19% de la potencia térmica suministrada por la combustión del bagazo se aprovecha; el resto de la potencia se pierde por combustión incompleta, pérdidas de calor por la chimenea y las paredes. De las tres pérdidas de potencia térmica, la más significativa es la pérdida de energía sensible de los gases de combustión por la chimenea.

## Conclusiones

- La metodología propuesta es independiente del módulo panelero a evaluar. Por lo tanto, el procedimiento puede aplicarse a cualquier hornilla panelera en operación, siempre y cuando se cuenten con los datos requeridos y se realicen las mediciones correspondientes. De esta forma, la presente metodología ha permitido evaluar el estado actual de la hornilla panelera de Cruz Misionera ubicada en Hualambi, Jililí – Ayabaca, y determinar los indicadores energéticos y de producción del mismo módulo.
- El procesamiento de datos para realizar el análisis termodinámico propuesto es susceptible de mejora con la implementación de todos los instrumentos adecuados que, una vez conectados al programa, permitiría calcular en tiempo real todos los resultados e indicadores del análisis termodinámico.
- El programa de cálculo presenta una gran flexibilidad para determinar los resultados del análisis termodinámico y los indicadores energéticos de cualquier módulo panelero en operación, ya que el programa consiente modificar el número de pailas y/o tramos del ducto de humos.
- Debido a la estructura modular del programa de cálculo se puede realizar un análisis paramétrico variando un dato de entrada (manteniendo constante las demás variables) para apreciar su influencia en los indicadores de salida. Del mismo modo, se podría modificar uno de los submodelos al interno del programa con la finalidad de mejorar la precisión de los resultados.
- En el estudio del balance de entropía en el ducto de humos se recomienda definir la superficie de control en la parte externa de los muros de ladrillo que conforman el ducto de humos. En este sentido, la tasa de generación de entropía debido a la potencia térmica perdida a través de las paredes se imputa al sistema y se considera a la temperatura ambiente como la temperatura a la cual ocurre esta transferencia de calor. De este modo, resulta comprensible apuntar a disminuir esta entropía (reducir las irreversibilidades) cuando se busque optimizar el proceso térmico del sistema.



## Referencias bibliográficas

- [1] Arian Control & Instrumentation (s/f). Recuperado el 18 de setiembre 2015, de <http://www.arian.cl/espanol/support>.
- [2] AutomationDirect Incorporated (2013) *Click PLC Hardware User Manual* (4ª ed.). Estados Unidos.
- [3] Cengel, Y.A. & Boles, M.A. (2009) *Termodinámica* (6ª ed.). México D.F.: McGraw-Hill/Interamericana Editores.
- [4] Eurotron Instruments SpA. (2003) *Instruction Manual MM850371 for GreenLine 8000 portable flue gas analyzer* (6ª ed.). USA.
- [5] Fuzhou Link Optical Instrument Co., Ltd., (s/f). Recuperado el 18 de setiembre 2015, de <http://www.refractometer.com.cn/en/ShowProduct.asp?Aid=46&Bid=47&Cid=50&Id=75>
- [6] García, H.R., Albarracín, L.C., Toscano, A., Santana, N.J., & Insuasty, O. (2007) *Guía tecnológica para el manejo integral del sistema productivo de caña panelera*. Bogotá, DC: Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, y Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (CORPOICA).
- [7] González, K.L. (2010) *Determinación de pérdidas energéticas y sus puntos críticos, en hornillas paneleras Ward-CIMPA en la Hoya del río Suárez*. Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniera Química. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia.
- [8] Gordillo, G., & García, H.R. (1992) *Manual para el diseño y operación de hornillas paneleras*. Convenio de investigación y divulgación para el mejoramiento de la industria panelera. CIMPA.
- [9] Hugot, E. (1986) *Handbook of Cane Sugar Engineering* (3ª ed.). Nueva York: Elsevier Science Publishers.
- [10] Lior, N. (1986) Measurement of small temperature and pressure differences. En Elsevier Science Publishers B.V. (Eds.), *Desalination* (pp. 19-60) The Netherlands: Elsevier Science Publishers B.V.

- [11] Marcelo, M.D., La Madrid, R., & Santamaría, H.R. (2013) Evaluación mediante indicadores productivos y energéticos de tres módulos de producción de panela granulada. Eleventh LACCEI: Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology (LACCEI 2013) “Innovation in Engineering, Technology and Education for Competitiveness and Prosperity”. Cancun, Mexico.
- [12] Mendieta O. A., Escalante H. (2013) Análisis experimental de la evaporación del jugo de caña de azúcar en película sobre una placa plana. *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 14(2), 113-127.
- [13] Montoya, C.F., & Giraldo, P.A. (2009) *Propuesta de diseño de planta de procesamiento de caña para la elaboración de panela*. Trabajo dirigido de grado para obtener el título de Ingeniero Mecánico. Universidad Nacional de Colombia. Medellín.
- [14] Paz, D., & Cárdenas, G.J. (2005) Evaluación exergética de propuestas de disminución de consumo de vapor en usinas azucareras. *Revista Industrial y Agrícola de Tucumán*, 82 (Tomo 1-2), 1-10.
- [15] PR Electronics (s/f) *5909 Loop Link USB Communications Interface*. Estados Unidos.
- [16] Saavedra, R., Marcelo, M.D., Mendoza, E.M., Delgado, L.O. (2015) *Anexo 1.1.4: Implementación en un programa de cálculo de la metodología para el diseño y dimensionamiento de secadores solares para cacao*. Informe del hito 2 del Proyecto Investigación Aplicada “Desarrollo, mejoramiento y difusión de tecnología para el proceso de fermentación, secado solar y conservación del germoplasma del cacao, en Piura y Jaén - Cajamarca y difusión en otras regiones o cadenas productivas”. Universidad de Piura, Piura.
- [17] Saavedra, R. (2015) *Equilibrio químico*. Material didáctico interno elaborado para el curso de Termodinámica 2. Universidad de Piura, Piura.
- [18] Saavedra, R. (2015) *Reacciones químicas*. Material didáctico interno elaborado para el curso de Termodinámica 2. Universidad de Piura, Piura.
- [19] Santamaría, H.R. (2012) *Evaluación mediante indicadores productivos y energéticos de tres módulos de producción de panela granulada*. Tesis para optar el Título de Ingeniero Mecánico-Eléctrico. Universidad de Piura, Piura.
- [20] Soler, J.P., & Gómez, F.H. (2004) *Determinación de los parámetros de diseño y operación de cámaras de combustión tipo Ward-CIMPA y Plana-CIMPA en hornillas paneleras*. Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Químico. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia.

- [21] Stull, D.R., & Prophet, H. (1971) JANAF Thermochemical Tables (2<sup>a</sup> ed.). National Standard Reference Data System & National Bureau of Standards. Washington, DC: EE.UU. Government Printing Office.
- [22] The MathWorks, Inc. (2016) MathWorks Documentation. Estados Unidos. Recuperado de <http://www.mathworks.com/help/index.html>.
- [23] Velásquez, H.I., Chejne F., & Agudelo, A.F. (2004) *Diagnóstico energético de los procesos productivos de la panela en Colombia*. Revista Facultad Nacional de Agronomía, Medellín, vol. 57, núm 2, Universidad Nacional de Colombia.
- [24] Wark, K., & Richards, D.E. (2001) *Termodinámica* (6<sup>a</sup> ed.). Madrid: McGraw-Hill/Interamericana de España.



## Anexo A

### Evaluación y diagnóstico del analizador de gases

Para evaluar la operatividad del analizador de gases, primero se procede a realizar los siguientes pasos para lograr encender el equipo correctamente.

- ✓ Conectar la alimentación del MCU.
- ✓ Conectar todas las sondas.
- ✓ Encender el RCU: presionar **SETUP + ON/OFF** e ingresar la clave **0011**.
- ✓ Encender el MCU y esperar el tiempo de inicio de operación.
- ✓ Ingresar a **HELP/ SENSOR DIAGNOSIS** para leer los parámetros actuales de los sensores y de las baterías del MCU y RCU.

#### Baterías del MCU y RCU

Con un voltímetro, se procede a tomar lectura de las tensiones de las baterías del MCU y del RCU. También se debe medir la tensión del proceso de carga de la batería del MCU. En la Tabla A.1 se muestran los valores óptimos de funcionamiento y las recomendaciones para su mantenimiento.

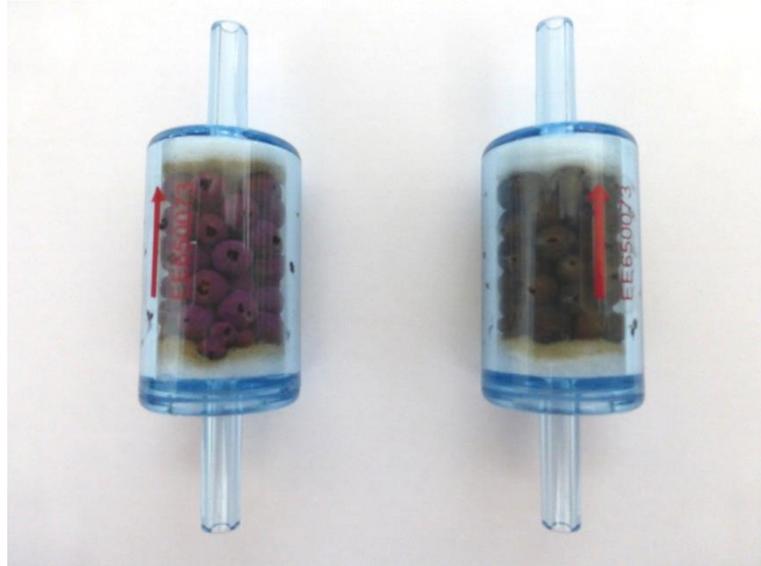
**Tabla A.1 - Valores óptimos de las baterías del MCU y RCU.**

Parte del equipo	Descripción	Variable medida	Valores óptimos	Recomendación de cambio
MCU	Batería de moto	Tensión de la batería	12 V (7.5 A.h)	Cada 2 ó 3 años, dependiendo del proceso de carga.
MCU	Batería de moto	Tensión del proceso de carga (flotación)	13.5 – 13.8 V	
RCU.	4 baterías de 1.3 V	Tensión de la batería	5 – 5.2 V (1800 mA.h, en Ni-metal o Ni-Cd)	Cada 3 ó 4 años.

Fuente: Elaboración propia.

#### Filtros del analizador de gases

La evaluación del estado actual de los filtros se realiza visualmente. En las Figura A.1 y Figura A.2 se muestran los estados óptimos de los 2 tipos de filtros que son utilizados por el analizador, comparándolos en la misma imagen con el mismo tipo de filtro ya utilizado y listo para ser reemplazado. Es importante notar que los filtros no se vencen mientras no se utilicen.



**Figura A.1 – Filtros de CO. A la izquierda, el filtro nuevo.**

Fuente: Elaboración propia, tomada en el Laboratorio de Energía de la Universidad de Piura.



**Figura A.2 – Filtros de aire. A la derecha, el filtro nuevo.**

Fuente: Elaboración propia, tomada en el Laboratorio de Energía de la Universidad de Piura.

### Sensores del analizador de gases

Los sensores se revisan tomando en cuenta la lectura mostrada por el analizador de gases (**HELP/ SENSOR DIAGNOSIS**) y comparando con los valores típicos mostrados en la Tabla A.2.

**Tabla A.2 - Valores típicos de los sensores.**

<b>SENSOR</b>	<b>Valor típico</b>
O <sub>2</sub>	360 $\mu$ A – 460 $\mu$ A
CO	5 $\mu$ A – 15 $\mu$ A
NO	2 $\mu$ A – 10 $\mu$ A
SO <sub>2</sub>	0.0 mV
H <sub>2</sub> S	2 $\mu$ A – 10 $\mu$ A
C <sub>x</sub> H <sub>y</sub>	0.0 $\mu$ A

Fuente: Elaboración propia.

Se recomienda calibrar los sensores cada 6 meses:

- ✓ El sensor de O<sub>2</sub> se calibra con el medio ambiente, teniendo en cuenta que está presente en el aire en un 21% aprox. en volumen.
- ✓ El sensor de C<sub>x</sub>H<sub>y</sub> no se calibra en Perú, su calibración es de fábrica.
- ✓ Para recalibrar los demás sensores se necesita de unos tanques con gases patrones que pueden ser adquiridos del mismo fabricante de los sensores. Estos tanques patrones presentan una determinada composición y presión de los gases para efectuar la calibración.

Cabe resalta que los sensores sí se vencen, pues son de tipo electroquímico.

Para la calibración de cualquier sensor se debe encender el equipo presionando **MENU** + **ON/OFF** e ingresando la clave **1100**. Luego se presiona F1 hasta encontrar la opción **LOAD MCU CAL.**, se ingresa a **GAS CALIBRATION** y se efectúa la calibración con 2 valores: **ZERO** (se realiza a ambiente) y **SPAN** (con gas patrón, excepto el O<sub>2</sub>).

En el caso de que se substituya un sensor, se debe ingresar a **GAS SUBSTITUTION** e ingresar los valores de fábrica de pre calibración del sensor.

Por último, se selecciona la opción **SAVE MCU CAL.** para grabar los datos y efectuar las respectivas mediciones.



## Anexo B

### Intercambio de datos entre el analizador GreenLine 8000 y una PC

Después de realizada la toma de datos, se debe descargarlos en la PC siguiendo los siguientes pasos:

- ✓ Apagar la RCU.
- ✓ Conectar la RCU al puerto USB. (el puerto en donde se debe conectar es el que está ubicado en la parte inferior del RCU).
- ✓ Encender la RCU presionado al mismo tiempo las teclas ON/OFF y MCU. (si se desea, primero presionar la tecla MCU y luego la tecla ON/OFF).
- ✓ Para trabajar con el DBGas se debe asegurar de utilizar el puerto y la velocidad de transferencia de datos correctos.
- ✓ En la pantalla de la RCU aparecerá un parámetro llamado Baut Rate que indica la velocidad de transferencia de datos, esta debe coincidir con la del programa, la cual se puede ver y modificar en el menú **Settings/ Serial**.
- ✓ Para verificar el puerto COM usado al conectar la RCU se hace click derecho en el ícono de MI PC o EQUIPO y se selecciona **Propiedades/ Hardware/ Administrador de dispositivos/** y se extiende la opción **Puertos (COM & LPT)**, tal y como se muestra en la Figura B.1.
- ✓ Se verifica la dirección COM asignada al USB Serial Port que es el dispositivo de conexión de la RCU. Éste debe coincidir con el COM seleccionado en el DBGas, el cual se verifica en la ficha **Setting/ Serial**.

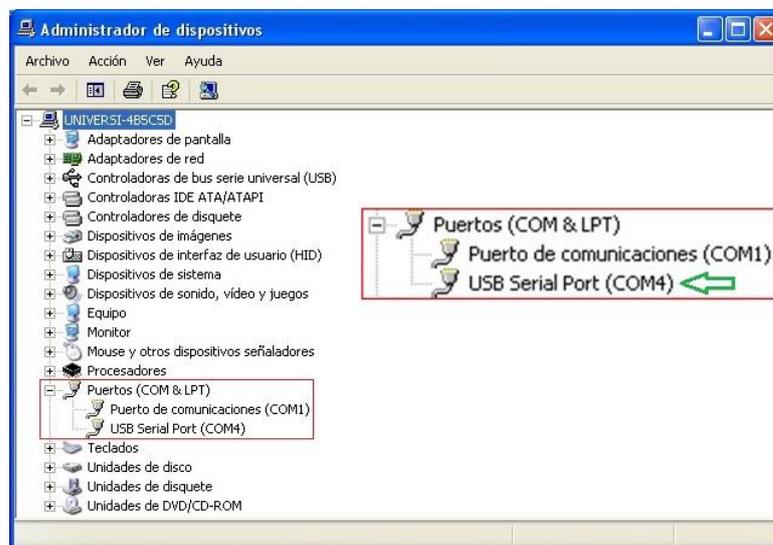


Figura B.1 - Ventana Administrador de dispositivos.

Fuente: Elaboración propia.

- ✓ En el programa DBGas, seleccionar el menú **Download** para descargar información de la RCU.
- ✓ Esperar a que cargue los datos de la RCU.
- ✓ En la parte derecha de la pantalla aparecerán cargados todos los TAG (ver Figura B.2).
- ✓ Seleccione el TAG que desea visualizar y aparecerá una ventana con los datos medidos (ver Figura B.3).

The screenshot shows the DBGas 2004 software interface. The window title is "DBGas2004 - [Analysis]". The interface is divided into three main sections: Clients, Boilers, and Analysis.

**Clients**

Client ID	Name	Address	City	Telephone	Fax	Short Name	Short City	Note	PI
Client 1	John Brown	Park Avenue 14	New York	3855223	3852797	John Brown	New York		
Client 2	Frank Smith	Abbey Road 17	London	1567432	1567434	Frank Smith	London		
Client 3	Energia	Ramon Rajada 131	Paris	384350		UUEP	Paris		

**Boilers**

Boiler ID	Description	Fuel	Select for download	CS2 In use	K Factor	Notes
Boiler 1	Energia	Phuebas en labor	<input type="radio"/> No <input checked="" type="radio"/> Yes	Input		
Boiler 2	Sac	Methane suche	<input type="radio"/> No <input checked="" type="radio"/> Yes	Input		

**Analysis**

Operator	Note
Sharing cable Operador	
24/02/2009 16:05:00	
19/05/2009 9:31:00	

The bottom of the window shows a taskbar with several icons and a system tray with a clock showing 24/02/2009 16:05:00.

**Figura B.2 - Ventana del programa DBGas 2004 – Análisis.**  
Fuente: Elaboración propia.

DBGas2004 - [Measures] | Tools Settings Window ?

Print Show graph Make average Show columns Self/Reset Export measures Back

Client: UDEP Boiler ID: Sac Fuel: Methane sucked

Leak Test A P1	Leak Test A P2	Leak Test A P3 [hPa]	Leak Test A P4 [hPa]	Leak Test B P1 [hPa]	Leak Test B P2 [hPa]	Leak Test B P3 [hPa]	Leak Test B P4 [hPa]
7052	95.52	51.52	No measure				

State Combustione	Regolazione Controllo	Ventilazione Locale	Portata Combustibile	Potenza Termica [kw]
Not checkable	Not checkable	Not checkable	-1.#QNAN	-1.#QNAN

Progressive	Sampling date	O2 [%]	CO [%vol]	NO [%vol]	SO2 [ppm]	COHy [%]	H2S [ppm]	Pellet Temperature	Aux 1 - No Gas -	Aux 2 - O2 -	Th	Bwe [%]	CO2 [%]	Exa 2 [%]	Eff. net [%]	NOx [ppm]
1	18/05/2009 9:31:02	21,06	0	0	0	0,00	0	4,8	No measure	No measure	No measure	No measure	-0,1	.....	.....	0
2	18/05/2009 9:31:07	21,06	0	0	0	0,00	0	4,3	No measure	No measure	No measure	No measure	-0,1	.....	.....	0
3	18/05/2009 9:31:12	21,06	0	0	0	0,00	0	4,3	No measure	No measure	No measure	No measure	-0,1	.....	.....	0
4	18/05/2009 9:31:17	21,06	0	0	0	0,00	0	4,3	No measure	No measure	No measure	No measure	-0,1	.....	.....	0
5	18/05/2009 9:31:22	21,06	0	0	0	0,00	0	4,3	No measure	No measure	No measure	No measure	-0,1	.....	.....	0
6	18/05/2009 9:31:27	21,06	0	0	0	0,00	0	4,4	No measure	No measure	No measure	No measure	-0,1	.....	.....	0
7	18/05/2009 9:31:32	21,06	0	0	0	0,00	0	4,5	No measure	No measure	No measure	No measure	-0,1	.....	.....	0
8	18/05/2009 9:31:37	21,06	0	0	0	0,00	0	4,5	No measure	No measure	No measure	No measure	-0,1	.....	.....	0
9	18/05/2009 9:31:42	21,06	0	0	0	0,00	0	4,4	No measure	No measure	No measure	No measure	-0,1	.....	.....	0
10	18/05/2009 9:31:47	21,06	0	0	0	0,00	0	4,4	No measure	No measure	No measure	No measure	-0,1	.....	.....	0
11	18/05/2009 9:31:52	21,06	0	0	0	0,00	0	4,4	No measure	No measure	No measure	No measure	-0,1	.....	.....	0
12	18/05/2009 9:31:57	21,06	0	0	0	0,00	0	4,4	No measure	No measure	No measure	No measure	-0,1	.....	.....	0
13	18/05/2009 9:32:02	21,06	2	0	0	0,00	0	4,3	No measure	No measure	No measure	No measure	-0,1	.....	.....	0
14	18/05/2009 9:32:07	21,06	2	0	0	0,00	1	4,3	No measure	No measure	No measure	No measure	-0,1	.....	.....	0
15	18/05/2009 9:32:12	21,06	2	0	0	0,00	0	4,4	No measure	No measure	No measure	No measure	-0,1	.....	.....	0
16	18/05/2009 9:32:17	21,06	2	0	0	0,00	0	4,4	No measure	No measure	No measure	No measure	-0,1	.....	.....	0
17	18/05/2009 9:32:22	21,06	0	0	0	0,00	0	4,5	No measure	No measure	No measure	No measure	-0,1	.....	.....	0
18	18/05/2009 9:32:27	21,06	0	0	0	0,00	0	4,4	No measure	No measure	No measure	No measure	-0,1	.....	.....	0
19	18/05/2009 9:32:32	21,06	0	0	0	0,00	0	4,4	No measure	No measure	No measure	No measure	-0,1	.....	.....	0
20	18/05/2009 9:32:37	21,06	0	0	0	0,00	0	4,3	No measure	No measure	No measure	No measure	-0,1	.....	.....	0
21	18/05/2009 9:32:42	21,06	0	0	0	0,00	0	4,3	No measure	No measure	No measure	No measure	-0,1	.....	.....	0
22	18/05/2009 9:32:47	21,06	0	0	0	0,00	0	4,4	No measure	No measure	No measure	No measure	-0,1	.....	.....	0
23	18/05/2009 9:32:52	21,06	0	0	0	0,00	0	4,3	No measure	No measure	No measure	No measure	-0,1	.....	.....	0
24	18/05/2009 9:32:57	21,06	0	0	0	0,00	0	4,3	No measure	No measure	No measure	No measure	-0,1	.....	.....	0

Figura B.3 - Ventana del programa DBGas 2004 - Mediciones.  
Fuente: Elaboración propia.

- ✓ Con el botón de comando **Make average** se puede calcular el promedio de las medidas proporcionando los valores en una fila adicional al final de las medidas.
- ✓ El botón de comando **Show columns** permite agregar parámetros que se desea mostrar.
- ✓ Con el botón de comando **Export Measure** se puede exportar la data en formato \*.cvs el cual puede ser reconocido por MS Excel.

### Creación de etiquetas

La creación de nuevas etiquetas permite la identificación de clientes atendidos así como los diferentes puntos de análisis de un mismo cliente, en este punto se describe la creación de nuevos clientes y dentro de la carpeta de cada uno de estos, diferentes puntos de medición.

- ✓ Para crear la plantilla de un nuevo cliente debe ir al menú **New Client** y completar todos los campos que aparecen en una ventana emergente, como se muestra en la Figura B.4.

En sección Boiler, se completa con los datos para identificar un punto de medición específico del cliente. Se pueden ingresar múltiples puntos con el botón Add.

**Figura B.4 - Ventana emergente New Client.**

Fuente: Elaboración propia.

- ✓ Para agregar nuevos puntos de medición en la carpeta de un cliente ya generado, se da clic en el menú **New Boiler**.
- ✓ Para descargar las etiquetas de los clientes creados a la RCU debe ubicarse sobre cada cliente y en la parte derecha de la pantalla, en la sección Boilers, seleccionar Yes en los puntos de medición (ver Figura B.5).
- ✓ Seleccionados los puntos de medición y de los clientes que se desea, ir al menú **Show selected**, ingresar el operador y descargar con el botón **Send**.

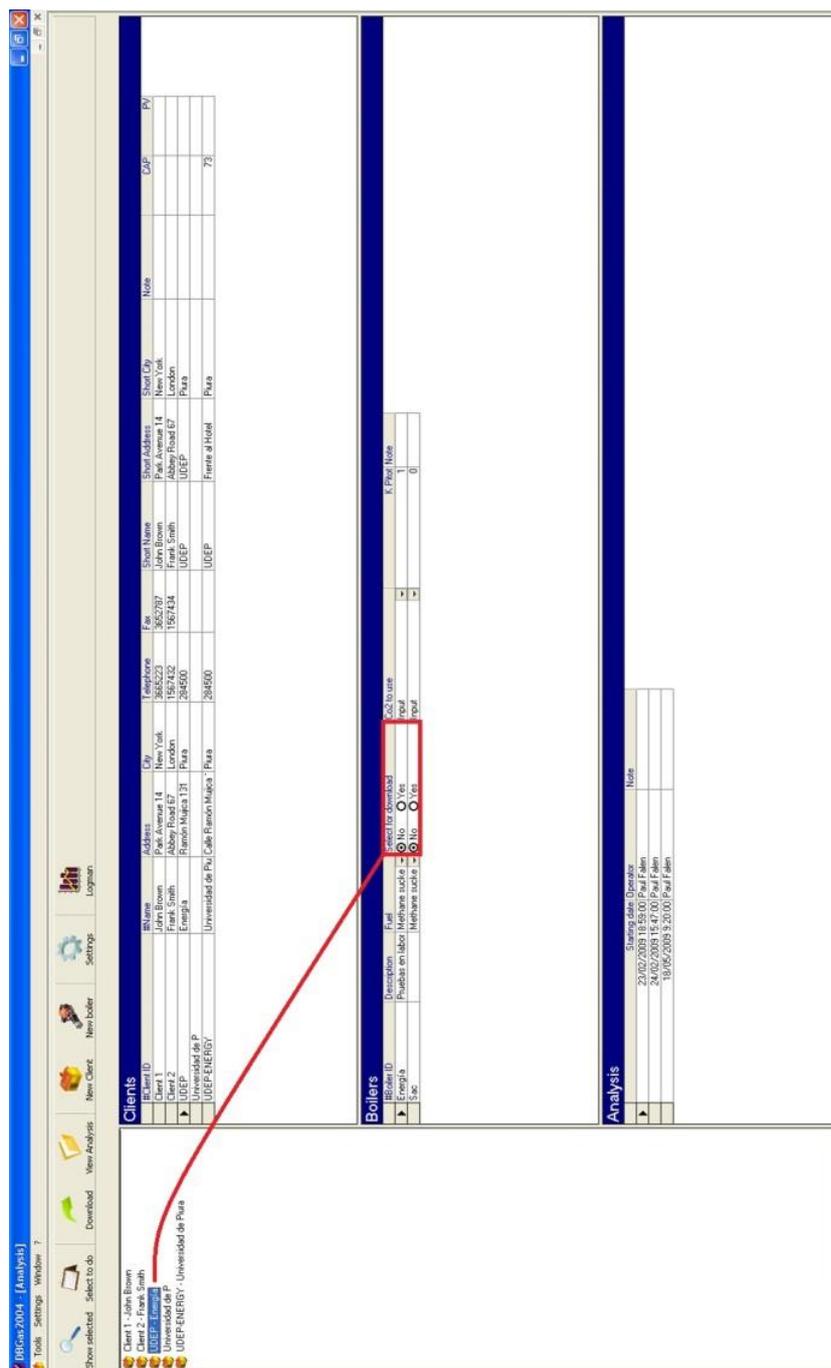


Figura B.5 - Ventana del programa DBGas 2004 – Análisis - Boilers.  
Fuente: Elaboración propia.

## Configuración de la RCU y MCU en GasConfig

En el menú de análisis de la RCU aparecen unos parámetros medidos que pueden ser reconfigurados, quitando unos y agregando otros. Para ello, la herramienta-software GasConfig ha sido diseñada. Para iniciar la configuración se deben seguir los siguientes pasos:

- ✓ Conectar el puerto serial de la RCU a la PC, encender la RCU presionando ON/OFF y MCU.

- ✓ Abrir GasConfig y verificar en el menú **Setting /Serial** la velocidad de transferencia de datos y el puerto usado.
- ✓ En el GasConfig se pueden observar los menús mostrados en la Figura B.6. Aquí, es donde podrá realizar su nueva configuración.

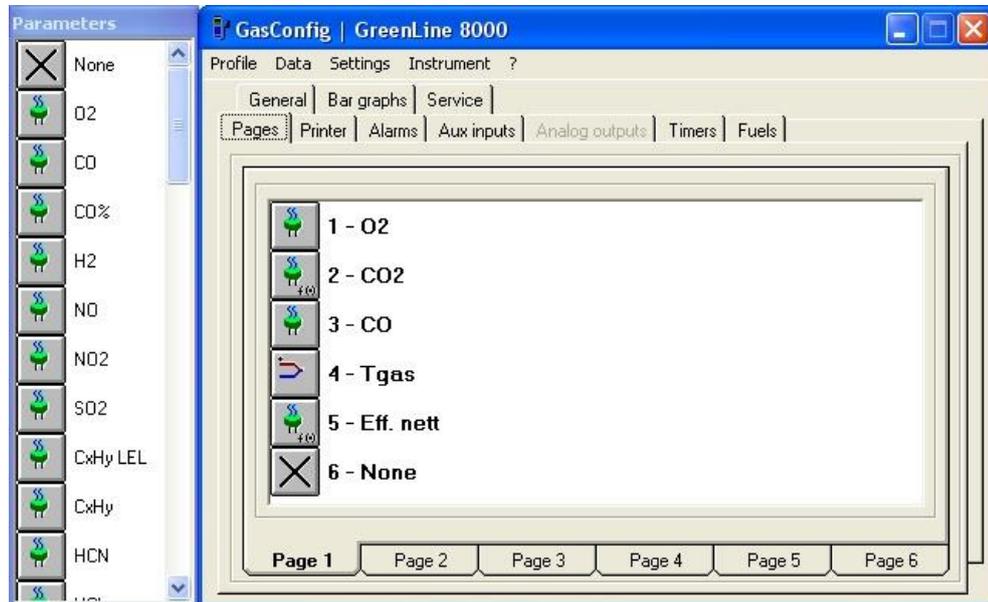


Figura B.6 - Ventana del programa GasConfig.  
Fuente: Elaboración propia.

- ✓ Para cargar la configuración al analizador, ir al menú **Profile/ Send**.
- ✓ Para visualizar la configuración actual, ir al menú **Profile/ Receive**.

### Problemas comunes en el intercambio de datos

Cuando se descarga una configuración desde la PC a la RCU o manualmente se altera la presente en la RCU pueden producirse problemas en la comunicación. A continuación, se presenta los problemas más comunes y sus respectivas soluciones:

- Perder la comunicación entre la MCU y la RCU. Lo más probable es que se haya hecho algún cambio en la RCU con la MCU apagada (cambio de fecha, velocidad de transferencia de datos, o dirección) para estos casos la comunicación vía puerto serial es necesaria y se debe ir al **SETUP/ SAVE MCU CFG**. Luego apagar la RCU, desconectar el cable RS 232 y encender. Al hacer esto la configuración de la MCU se cargará en la MCU sincronizando todos los parámetros, lo cual permitirá de nuevo la comunicación.
- Pérdida de comunicación con la PC. Algunas veces al manipular manualmente la configuración de la RCU se puede variar la velocidad de transferencia de datos o la dirección. Estos dos parámetros han de ser verificados, así como el puerto COM de conexión.

## **Anexo C**

### **Tablas de termocuplas J, K, T, R, S, B y RTD Pt100<sup>15</sup>**

#### **¿Cómo medir una temperatura con una termocupla y un voltímetro?**

1. Medir con el voltímetro la tensión que entrega la termocupla ( $V_T$ ).
2. Medir la temperatura del contacto de las puntas del voltímetro con los cables de la termocupla, que es igual a la temperatura ambiente ( $T_a$ ). Luego, en la tabla de la termocupla correspondiente, encontrar el valor de tensión que le corresponde a esa temperatura  $T_a$  ( $V_{Ta}$ ).
3. Sumar los dos valores de tensión obtenidos ( $V = V_T + V_{Ta}$ ) y encontrar la temperatura que corresponde a esta tensión  $V$ . Dicha temperatura será a la que está sometida la termocupla.

Por ejemplo:

Se mide en una termocupla J una tensión de 10.84 mV. Si la temperatura de ambiente en los contactos es 25 °C, entonces en la tabla esto corresponde a 1.277 mV.

Luego:  $V = 10.84 + 1.277 = 12.117$  mV. Según la tabla de la termocupla tipo J, esta tensión corresponde a 224 °C.

#### **¿Cómo medir una temperatura con un RTD y un ohmímetro?**

1. Medir con el ohmímetro la resistencia del RTD Pt100.
2. Si se conoce la resistencia de los cables, restársela a lo medido y con este valor buscar la temperatura en la tabla.

Por ejemplo:

Se tiene un RTD Pt100 que mide 137.5 ohm en los terminales.

Se sabe que cada cable tiene 1.5 ohms. (el par tiene 3 ohms), entonces la resistencia de la Pt100 sin la de los cables es 134.5 ohms. En la tabla se encuentra que esta resistencia corresponde a un poco más de 89 °C.

---

<sup>15</sup> El presente anexo ha sido elaborado utilizando la referencia bibliográfica [1].

TERMOCUPLA		J									
milivolts											
°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
-210	-8.096										
-200	-7.890	-7.912	-7.934	-7.955	-7.976	-7.996	-8.017	-8.037	-8.057	-8.076	
-190	-7.659	-7.683	-7.707	-7.731	-7.755	-7.778	-7.801	-7.824	-7.846	-7.868	
-180	-7.402	-7.429	-7.455	-7.482	-7.508	-7.533	-7.559	-7.584	-7.609	-7.634	
-170	-7.122	-7.151	-7.180	-7.209	-7.237	-7.265	-7.293	-7.321	-7.348	-7.375	
-160	-6.821	-6.852	-6.883	-6.914	-6.944	-6.974	-7.004	-7.034	-7.064	-7.093	
-150	-6.499	-6.532	-6.565	-6.598	-6.630	-6.663	-6.695	-6.727	-6.758	-6.790	
-140	-6.159	-6.194	-6.228	-6.263	-6.297	-6.331	-6.365	-6.399	-6.433	-6.466	
-130	-5.801	-5.837	-5.874	-5.910	-5.946	-5.982	-6.018	-6.053	-6.089	-6.124	
-120	-5.426	-5.464	-5.502	-5.540	-5.578	-5.615	-5.653	-5.690	-5.727	-5.764	
-110	-5.036	-5.076	-5.115	-5.155	-5.194	-5.233	-5.272	-5.311	-5.349	-5.388	
-100	-4.632	-4.673	-4.714	-4.755	-4.795	-4.836	-4.876	-4.916	-4.956	-4.996	
-90	-4.215	-4.257	-4.299	-4.341	-4.383	-4.425	-4.467	-4.508	-4.550	-4.591	
-80	-3.785	-3.829	-3.872	-3.915	-3.958	-4.001	-4.044	-4.087	-4.130	-4.172	
-70	-3.344	-3.389	-3.433	-3.478	-3.522	-3.566	-3.610	-3.654	-3.698	-3.742	
-60	-2.892	-2.938	-2.984	-3.029	-3.074	-3.120	-3.165	-3.210	-3.255	-3.299	
-50	-2.431	-2.478	-2.524	-2.570	-2.617	-2.663	-2.709	-2.755	-2.801	-2.847	
-40	-1.960	-2.008	-2.055	-2.102	-2.150	-2.197	-2.244	-2.291	-2.338	-2.384	
-30	-1.481	-1.530	-1.578	-1.626	-1.674	-1.722	-1.770	-1.818	-1.865	-1.913	
-20	-0.995	-1.044	-1.093	-1.141	-1.190	-1.239	-1.288	-1.336	-1.385	-1.433	
-10	-0.501	-0.550	-0.600	-0.650	-0.699	-0.748	-0.798	-0.847	-0.896	-0.945	
0	0.000	-0.050	-0.101	-0.151	-0.201	-0.251	-0.301	-0.351	-0.401	-0.451	
0	0.000	0.050	0.101	0.151	0.202	0.253	0.303	0.354	0.405	0.456	
10	0.507	0.558	0.609	0.660	0.711	0.762	0.813	0.865	0.916	0.967	
20	1.019	1.070	1.122	1.174	1.225	1.277	1.329	1.381	1.432	1.484	
30	1.536	1.588	1.640	1.693	1.745	1.797	1.849	1.901	1.954	2.006	
40	2.058	2.111	2.163	2.216	2.268	2.321	2.374	2.426	2.479	2.532	
50	2.585	2.638	2.691	2.743	2.796	2.849	2.902	2.956	3.009	3.062	
60	3.115	3.168	3.221	3.275	3.328	3.381	3.435	3.488	3.542	3.595	
70	3.649	3.702	3.756	3.809	3.863	3.917	3.971	4.024	4.078	4.132	
80	4.186	4.239	4.293	4.347	4.401	4.455	4.509	4.563	4.617	4.671	
90	4.725	4.780	4.834	4.888	4.942	4.996	5.050	5.105	5.159	5.213	
100	5.268	5.322	5.376	5.431	5.485	5.540	5.594	5.649	5.703	5.758	
110	5.812	5.867	5.921	5.976	6.031	6.085	6.140	6.195	6.249	6.304	
120	6.359	6.414	6.468	6.523	6.578	6.633	6.688	6.742	6.797	6.852	
130	6.907	6.962	7.017	7.072	7.127	7.182	7.237	7.292	7.347	7.402	
140	7.457	7.512	7.567	7.622	7.677	7.732	7.787	7.843	7.898	7.953	
150	8.008	8.063	8.118	8.174	8.229	8.284	8.339	8.394	8.450	8.505	
160	8.560	8.616	8.671	8.726	8.781	8.837	8.892	8.947	9.003	9.058	
170	9.113	9.169	9.224	9.279	9.335	9.390	9.446	9.501	9.556	9.612	
180	9.667	9.723	9.778	9.834	9.889	9.944	10.000	10.055	10.111	10.166	
190	10.222	10.277	10.333	10.388	10.444	10.499	10.555	10.610	10.666	10.721	
200	10.777	10.832	10.888	10.943	10.999	11.054	11.110	11.165	11.221	11.276	
210	11.332	11.387	11.443	11.498	11.554	11.609	11.665	11.720	11.776	11.831	
220	11.887	11.943	11.998	12.054	12.109	12.165	12.220	12.276	12.331	12.387	
230	12.442	12.498	12.553	12.609	12.664	12.720	12.776	12.831	12.887	12.942	
240	12.998	13.053	13.109	13.164	13.220	13.275	13.331	13.386	13.442	13.497	
250	13.553	13.608	13.664	13.719	13.775	13.830	13.886	13.941	13.997	14.052	
260	14.108	14.163	14.219	14.274	14.330	14.385	14.441	14.496	14.552	14.607	
270	14.663	14.718	14.774	14.829	14.885	14.940	14.995	15.051	15.106	15.162	
280	15.217	15.273	15.328	15.383	15.439	15.494	15.550	15.605	15.661	15.716	
290	15.771	15.827	15.882	15.938	15.993	16.048	16.104	16.159	16.214	16.270	
300	16.325	16.380	16.436	16.491	16.547	16.602	16.657	16.713	16.768	16.823	
310	16.879	16.934	16.989	17.044	17.100	17.155	17.210	17.266	17.321	17.376	
320	17.432	17.487	17.542	17.597	17.653	17.708	17.763	17.818	17.874	17.929	
330	17.984	18.039	18.095	18.150	18.205	18.260	18.316	18.371	18.426	18.481	
340	18.537	18.592	18.647	18.702	18.757	18.813	18.868	18.923	18.978	19.033	
350	19.089	19.144	19.199	19.254	19.309	19.364	19.420	19.475	19.530	19.585	
360	19.640	19.695	19.751	19.806	19.861	19.916	19.971	20.026	20.081	20.137	
370	20.192	20.247	20.302	20.357	20.412	20.467	20.523	20.578	20.633	20.688	
380	20.743	20.798	20.853	20.909	20.964	21.019	21.074	21.129	21.184	21.239	
390	21.295	21.350	21.405	21.460	21.515	21.570	21.625	21.680	21.736	21.791	
400	21.846	21.901	21.956	22.011	22.066	22.122	22.177	22.232	22.287	22.342	
°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	

Figura C.1 - Extracto de la tabla de la termocupla tipo J.

Fuente: Referencia bibliográfica [1].

PT 100											
ohms	°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-190		22.78	22.35	21.93	21.50	21.08	20.66	20.23	19.81	19.38	18.96
-180		27.01	26.59	26.17	25.74	25.32	24.90	24.47	24.05	23.63	23.20
-170		31.24	30.81	30.39	29.97	29.55	29.13	28.70	28.28	27.86	27.44
-160		35.45	35.03	34.61	34.19	33.77	33.34	32.92	32.50	32.08	31.66
-150		39.65	39.23	38.81	38.39	37.97	37.55	37.13	36.71	36.29	35.87
-140		43.78	43.37	42.96	42.54	42.13	41.72	41.30	40.89	40.48	40.06
-130		47.90	47.49	47.08	46.67	46.26	45.85	45.43	45.02	44.61	44.20
-120		52.01	51.60	51.19	50.78	50.37	49.96	49.55	49.14	48.73	48.32
-110		56.11	55.70	55.29	54.88	54.48	54.07	53.66	53.25	52.84	52.43
-100		60.20	59.79	59.38	58.98	58.57	58.16	57.75	57.34	56.93	56.52
-90		64.23	63.83	63.43	63.02	62.62	62.22	61.81	61.41	61.01	60.60
-80		68.25	67.85	67.45	67.05	66.65	66.25	65.84	65.44	65.04	64.64
-70		72.26	71.86	71.46	71.06	70.66	70.26	69.86	69.46	69.06	68.66
-60		76.26	75.86	75.46	75.06	74.67	74.27	73.87	73.47	73.07	72.67
-50		80.25	79.85	79.45	79.06	78.66	78.26	77.86	77.46	77.06	76.66
-40		84.22	83.83	83.43	83.03	82.64	82.24	81.84	81.44	81.05	80.65
-30		88.18	87.79	87.39	87.00	86.60	86.21	85.81	85.41	85.02	84.62
-20		92.13	91.74	91.35	90.95	90.56	90.16	89.77	89.37	88.98	88.58
-10		96.07	95.68	95.29	94.89	94.50	94.11	93.71	93.32	92.92	92.53
0		100.00	99.61	99.22	98.82	98.43	98.04	97.65	97.25	96.86	96.47
0		100.00	100.39	100.78	101.17	101.56	101.95	102.34	102.73	103.12	103.51
10		103.90	104.29	104.68	105.07	105.46	105.85	106.24	106.63	107.02	107.41
20		107.79	108.18	108.57	108.96	109.35	109.74	110.12	110.51	110.90	111.29
30		111.67	112.06	112.45	112.84	113.22	113.61	114.00	114.38	114.77	115.16
40		115.54	115.93	116.32	116.70	117.09	117.47	117.86	118.24	118.63	119.01
50		119.40	119.78	120.17	120.55	120.94	121.32	121.71	122.09	122.48	122.86
60		123.24	123.63	124.01	124.39	124.78	125.16	125.54	125.93	126.31	126.69
70		127.07	127.46	127.84	128.22	128.60	128.99	129.37	129.75	130.13	130.51
80		130.89	131.28	131.66	132.04	132.42	132.80	133.18	133.56	133.94	134.32
90		134.70	135.08	135.46	135.84	136.22	136.60	136.98	137.36	137.74	138.12
100		138.50	138.88	139.26	139.64	140.02	140.40	140.77	141.15	141.53	141.91
110		142.29	142.67	143.04	143.42	143.80	144.18	144.55	144.93	145.31	145.69
120		146.06	146.44	146.82	147.19	147.57	147.95	148.32	148.70	149.07	149.45
130		149.83	150.20	150.58	150.95	151.33	151.70	152.08	152.45	152.83	153.20
140		153.58	153.95	154.33	154.70	155.08	155.45	155.83	156.20	156.57	156.95
150		157.32	157.69	158.07	158.44	158.81	159.19	159.56	159.93	160.30	160.68
160		161.05	161.42	161.79	162.16	162.53	162.91	163.28	163.65	164.02	164.39
170		164.76	165.13	165.50	165.88	166.25	166.62	166.99	167.36	167.73	168.10
180		168.47	168.84	169.21	169.58	169.95	170.31	170.68	171.05	171.42	171.79
190		172.16	172.53	172.90	173.26	173.63	174.00	174.37	174.74	175.10	175.47
200		175.84	176.21	176.58	176.94	177.31	177.68	178.04	178.41	178.78	179.14
210		179.51	179.88	180.24	180.61	180.98	181.34	181.71	182.07	182.44	182.81
220		183.17	183.54	183.90	184.27	184.63	185.00	185.36	185.73	186.09	186.45
230		186.82	187.18	187.55	187.91	188.27	188.64	189.00	189.37	189.73	190.09
240		190.46	190.82	191.18	191.54	191.91	192.27	192.63	192.99	193.36	193.72
250		194.08	194.44	194.80	195.17	195.53	195.89	196.25	196.61	196.97	197.33
260		197.69	198.05	198.41	198.77	199.14	199.50	199.86	200.22	200.58	200.94
270		201.29	201.65	202.01	202.37	202.73	203.09	203.45	203.81	204.17	204.53
280		204.88	205.24	205.60	205.96	206.32	206.68	207.03	207.39	207.75	208.11
290		208.46	208.82	209.18	209.53	209.89	210.25	210.60	210.96	211.32	211.67
300		212.03	212.39	212.74	213.10	213.45	213.81	214.16	214.52	214.88	215.23
310		215.59	215.94	216.29	216.65	217.00	217.36	217.71	218.07	218.42	218.77
320		219.13	219.48	219.84	220.19	220.54	220.90	221.25	221.60	221.96	222.31
330		222.66	223.01	223.37	223.72	224.07	224.42	224.77	225.13	225.48	225.83
340		226.18	226.53	226.88	227.24	227.59	227.94	228.29	228.64	228.99	229.34
350		229.69	230.04	230.39	230.74	231.09	231.44	231.79	232.14	232.49	232.84
360		233.19	233.54	233.89	234.23	234.58	234.93	235.28	235.63	235.98	236.32
370		236.67	237.02	237.37	237.72	238.06	238.41	238.76	239.11	239.45	239.80
380		240.15	240.49	240.84	241.19	241.53	241.88	242.23	242.57	242.92	243.26
390		243.61	243.95	244.30	244.65	244.99	245.34	245.68	246.03	246.37	246.72
400		247.06	247.40	247.75	248.09	248.44	248.78	249.12	249.47	249.81	250.16
410		250.50	250.84	251.19	251.53	251.87	252.21	252.56	252.90	253.24	253.58
420		253.93	254.27	254.61	254.95	255.29	255.64	255.98	256.32	256.66	257.00
°C		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Figura C.2 - Extracto de la tabla del RTD Pt100.

Fuente: Referencia bibliográfica [1].



## **Anexo D**

### **Precauciones y consideraciones al usar termocuplas**

La mayor parte de los problemas de medición y errores con los termopares se deben a la falta de conocimientos del funcionamiento de los mismos. A continuación, un breve listado de los problemas más comunes que deben tenerse en cuenta.

#### **Problemas de conexión**

La mayoría de los errores de medición son causados por uniones no intencionales de la termopar. Se debe tener en cuenta que cualquier contacto entre dos metales distintos creará una unión. Si lo que se desea es aumentar la longitud de las guías, se debe usar el tipo correcto del cable de extensión. Así por ejemplo, el tipo K corresponde al termopar K. Al usar otro tipo se introducirá una unión termopar. Cualquiera que sea el conector empleado debe estar hecho del material termopar correcto y su polaridad debe ser la adecuada. Lo más correcto es emplear conectores comerciales del mismo tipo que el termopar para evitar problemas.

#### **Resistencia de la guía**

Para minimizar la desviación térmica y mejorar los tiempos de respuesta, los termopares están integrados con delgados cables. Esto puede causar que los termopares tengan una alta resistencia, la cual puede hacer que sea sensible al ruido y también puede causar errores debidos a la resistencia del instrumento de medición. Una unión termopar típica expuesta con 0,25 mm tendrá una resistencia de cerca de 15 ohmios por metro. Si se necesitan termopares con delgadas guías o largos cables, conviene mantener las guías cortas y entonces usar el cable de extensión, el cual es más grueso (lo que significa una menor resistencia), ubicado entre el termopar y el instrumento de medición. Se recomienda medir la resistencia del termopar antes de utilizarlo.

#### **Descalibración**

La descalibración es el proceso de alterar accidentalmente la conformación del cable del termopar. La causa más común es la difusión de partículas atmosféricas en el metal a los extremos de la temperatura de operación. Otras causas son las impurezas y los químicos del aislante difundiendo en el cable del termopar. Si se opera a elevadas temperaturas, se deben revisar las especificaciones del aislante de la sonda. Tenga en cuenta que uno de los criterios para calibrar un instrumento de medición, es que el patrón debe ser por lo menos 10 veces más preciso que el instrumento a calibrar.

**Ruido**

La salida de un termopar es una pequeña señal, así que es susceptible de error por ruido eléctrico. La mayoría de los instrumentos de medición rechazan cualquier modo de ruido (señales que están en el mismo cable o en ambos) así que el ruido puede ser minimizado al retorcer los cables para asegurarse que ambos recogen la misma señal de ruido. Si se opera en un ambiente extremadamente ruidoso, (Ej.: cerca de un gran motor), es necesario considerar usar un cable de extensión protegido. Si se sospecha de la recepción de ruido, primero se deben apagar todos los equipos sospechosos y comprobar si las lecturas cambian. Sin embargo, la solución más lógica es diseñar un filtro pasa bajo (resistencia y condensador en serie) ya que es probable que la frecuencia del ruido (por ejemplo: de un motor) sea mucho mayor a la frecuencia con que oscila la temperatura. O ponerle un repetidor después del termopar para que la señal en el cable sea mayor y que el equipo receptor esté compensado para poder acoplar ese repetidor.

**Voltaje en modo común**

Aunque las señales del termopar son muy pequeñas, a la salida del instrumento de medición pueden aparecer voltajes mayores. Estos voltajes pueden ser causados tanto por una recepción inductiva (un problema cuando se mide la temperatura de partes del motor y transformadores) o por las uniones a conexiones terrestres. Un ejemplo típico de uniones a tierra sería la medición de un tubo de agua caliente con un termopar sin aislamiento. Si existe alguna conexión terrestre pueden existir algunos voltios entre el tubo y la tierra del instrumento de medición. Estas señales están una vez más en el modo común (las mismas en ambos cables del termopar) así que no causarán ningún problema con la mayoría de los instrumentos, siempre y cuando no sean demasiado grandes. Los voltajes del modo común pueden ser minimizados al usar las mismas precauciones del cableado establecido para el ruido, y también al usar termopares aislados.

**Ruido en modo serie**

Si el sensor está expuesto a cables de alta tensión se puede presentar un voltaje que aparece en solo una de las líneas de este. Este ruido se puede disminuir transmitiendo la señal en corriente.

**Desviación térmica**

Al calentar la masa de los termopares se extrae energía que afectará a la temperatura que se trata de determinar. Considérese, por ejemplo, medir la temperatura de un líquido en un tubo de ensayo: existen dos problemas potenciales. El primero es que la energía del calor viajará hasta el cable del termopar y se disipará hacia la atmósfera reduciendo así la temperatura del líquido alrededor de los cables. Un problema similar puede ocurrir si un termopar no está suficientemente inmerso en el líquido, debido a un ambiente de temperatura de aire más frío en los cables, la conducción térmica puede causar que la unión del termopar esté a una temperatura diferente del líquido mismo. En este ejemplo, un termopar con cables más delgados puede ser útil, ya que causará un gradiente de temperatura más pronunciado a lo largo del cable del termopar en la unión entre el líquido y el aire del ambiente. Si se emplean termopares con cables delgados, se debe prestar atención a la resistencia de la guía. El uso de un termopar con cables delgados conectados a un termopar de extensión mucho más gruesa a menudo ofrece el mejor resultado.

## Anexo E

### Configuración de los transmisores 4-20mA

La configuración del transmisor se realiza utilizando el equipo Loop Link 5909 que permite la comunicación entre la PC y los transmisores digitales, utilizando un puerto USB. El software PReset sirve para configurar el transmisor digital de temperatura, probar la operatividad del mismo, detectar errores en el sensor y monitorear el comportamiento del sensor durante la configuración.

Teniendo especial cuidado en el color de las pinzas y los terminales a conectar, se sigue el esquema mostrado en la Figura E.1. Como se observa, las pinzas de color rojo y negro se conectan al terminal positivo y negativo del transmisor, respectivamente. La alimentación se toma de una fuente de 24 Vcc y se conecta a través de la pinza amarilla a su terminal positivo y de la verde al terminal negativo (GND). Luego, el equipo Loop Link 5909 se conecta a la PC a través de un puerto USB.

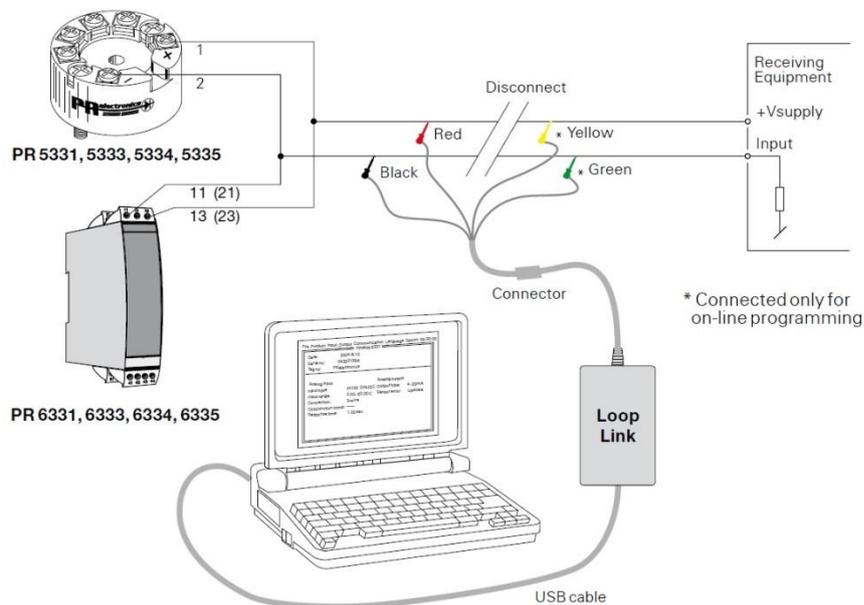
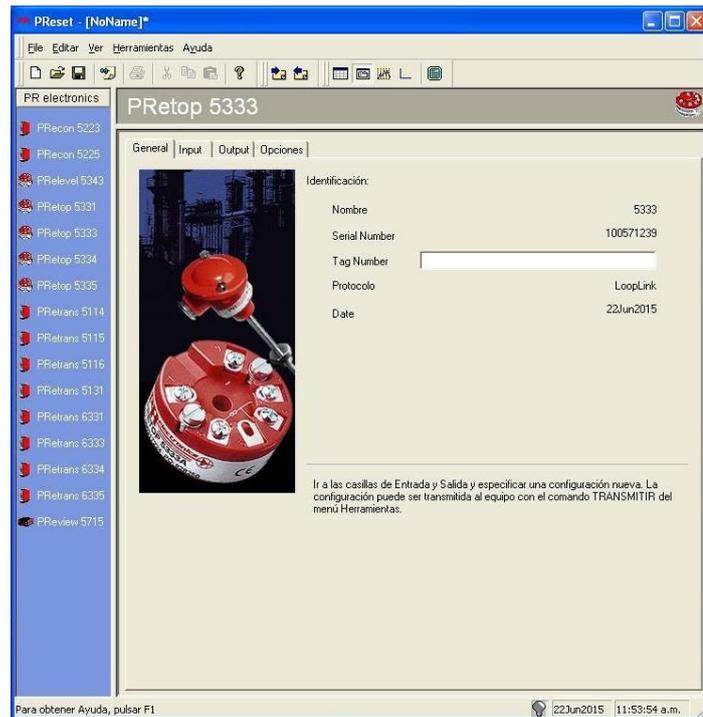


Figura E.1 - Esquema de conexión de un transmisor para su configuración.

Fuente: Referencia bibliográfica [15].

Para poder configurar el transmisor se siguen los siguientes pasos:

- ✓ Ejecutar el programa PReset y seleccionar el tipo de transmisor a configurar, tal y como se muestra en la Figura E.2.



**Figura E.2 - Pantalla principal del Software PReset.**

Fuente: Elaboración propia.

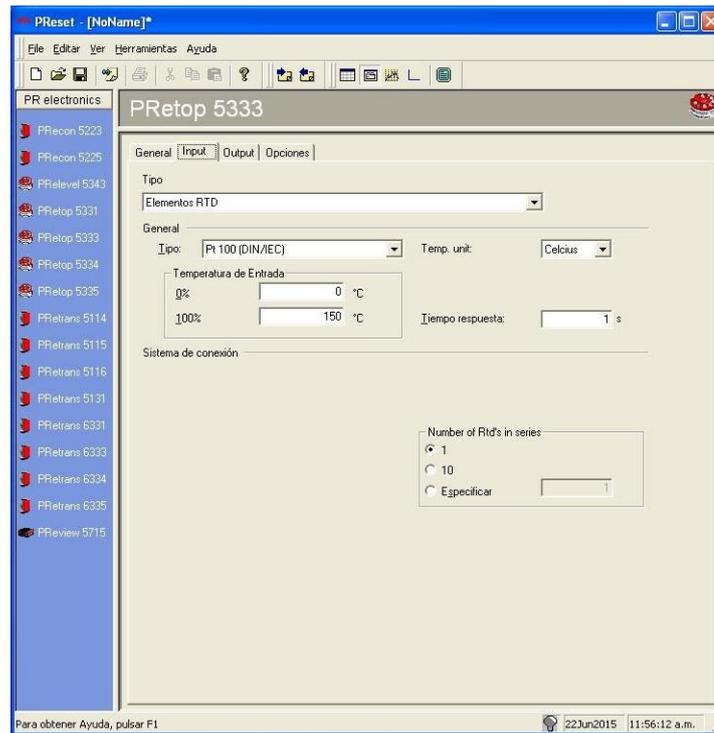
- ✓ Para poder leer la configuración grabada en el transmisor, en la barra de acceso rápido se selecciona el ícono Recibir (ver Figura E.3)



**Figura E.3 - Ícono para leer la información pregrabada en el transmisor.**

Fuente: Elaboración propia.

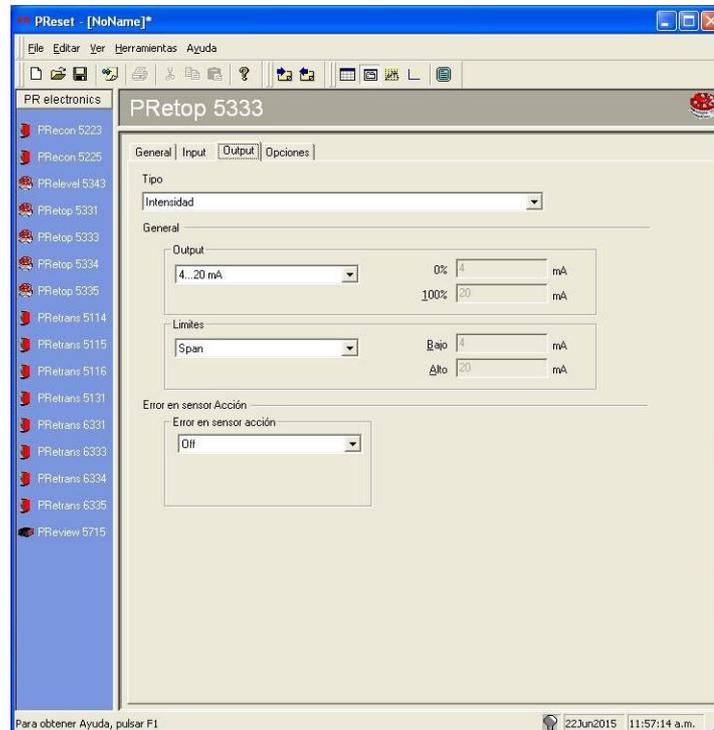
- ✓ En la pestaña Input ingresar el rango físico del sensor a conectar (ver Figura E.4). Estos valores indican las temperaturas mínima y máxima de entrada que el transmisor medirá y transmitirá.



**Figura E.4 - Pestaña Input del programa PReset.**

Fuente: Elaboración propia.

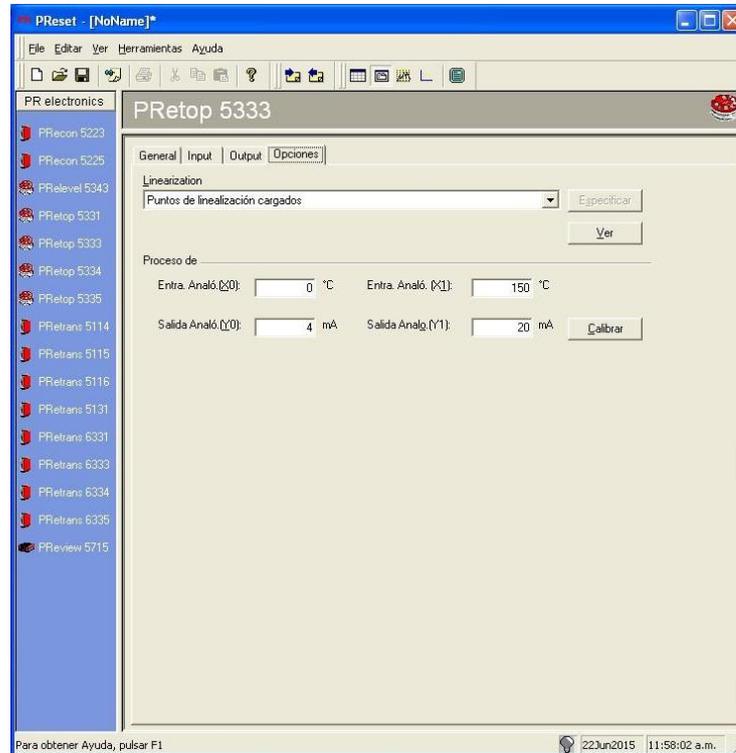
- ✓ En la pestaña Output especificar que la señal de salida del transmisor será 4-20mA, como se observa en la Figura E.5.



**Figura E.5 - Pestaña Output del programa PReset.**

Fuente: Elaboración propia.

- ✓ En la pestaña Opciones se define la sensibilidad del sensor, correlacionando linealmente los valores antes ingresados en las pestañas Input y Output (ver Figura E.6). En el supuesto caso en el que el transmisor reciba una señal de temperatura fuera del rango especificado en la pestaña Opciones, se satura en el extremo del rango.



**Figura E.6 - Pestaña Opciones del programa PReset.**

Fuente: Elaboración propia.

- ✓ Para grabar la configuración deseada en el transmisor, se selecciona el ícono Transmitir (ver Figura E.7).



**Figura E.7 - Ícono para grabar la información en el transmisor.**

Fuente: Elaboración propia.

## Anexo F

### Módulo de adquisición de datos

El Laboratorio de Energía de la Universidad de Piura cuenta con un tablero de adquisición de datos que consta de 3 partes, tal y como se muestra en la Figura F.1.

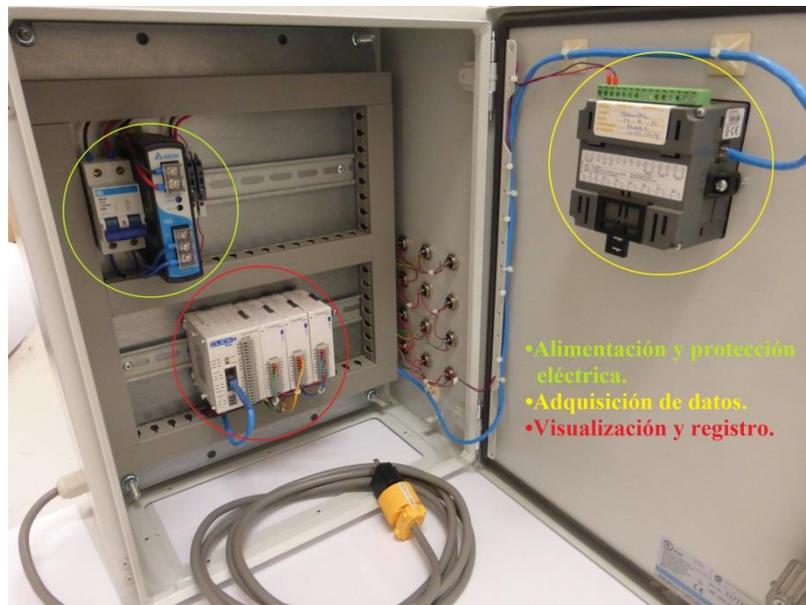


Figura F.1 - Módulo de adquisición de datos.

Fuente: Elaboración propia, tomada en el Laboratorio de Energía de la Universidad de Piura.

#### 1. Sistema de alimentación y protección eléctrica

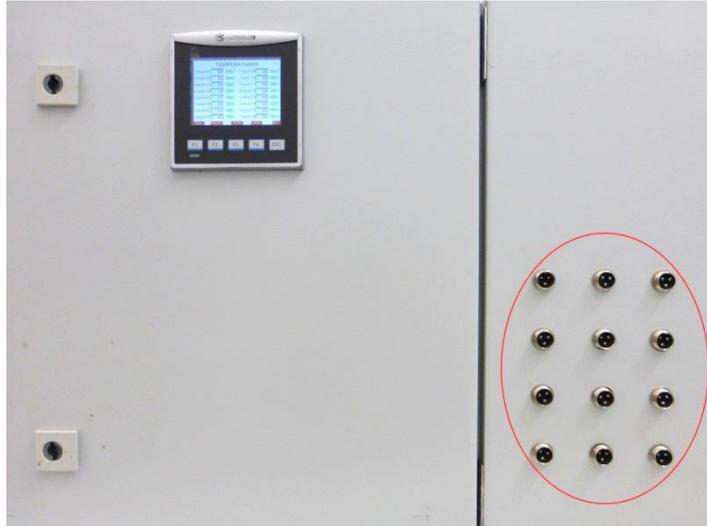
Consta de una fuente de alimentación AC/DC con sus respectivas protecciones contra sobre corriente en lado AC y DC, respectivamente. Al poner en marcha el sistema, verificar que el interruptor termomagnético esté en la posición de cerrado.

#### 2. Sistema de adquisición de datos

Se debe verificar que los sensores de temperatura estén conectados en sus respectivas posiciones<sup>16</sup> en la parte lateral del tablero (ver Figura F.2).

---

<sup>16</sup> Dependerá del tipo de sensor y de cómo han sido configurados los respectivos módulos del PLC.



**Figura F.2 - Conectores del módulo PLC para los diferentes sensores a utilizar.**  
Fuente: Elaboración propia, tomada en el Laboratorio de Energía de la Universidad de Piura.

Para un correcto funcionamiento, los LED “PWR” (Alimentación) y “RUN” deben estar encendidos de forma permanente (ver Figura F.3). Si sólo el LED “PWR” está encendido se debe verificar que el switch en la parte frontal del PLC este en posición RUN.

Si el LED “ERR” esta encendido significa que hay un error al iniciar el PLC y se debe resetear el PLC (desconectar y volver a conectar la alimentación).



**Figura F.3 - PLC para adquisición de datos.**  
Fuente: Referencia bibliográfica [2].

Los LED TX2 y RX2 correspondientes al puerto 2 deben estar parpadeando siempre, lo cual significa que la comunicación con el módulo de visualización (HMI) es correcta.

Para configurar cada uno de los módulos del PLC, primero se debe conectar según el esquema de la Figura F.4 o de la Figura F.5, dependiendo del hardware con el que se cuente.

Si no se cuenta con el hardware descrito anteriormente, se puede realizar una conexión a través del puerto USB del computador a un cable con terminales USB y serial macho, luego conectarlo con otro cable con terminales DB9 (hembra) y RJ11, y por último

conectar el RJ11 al PLC. Cabe recordar que en la conexión RJ11 a DB9 se cruzan los conductores Rx y Tx y el GND se mantiene (el pin-out se puede buscar y encontrar en Google).

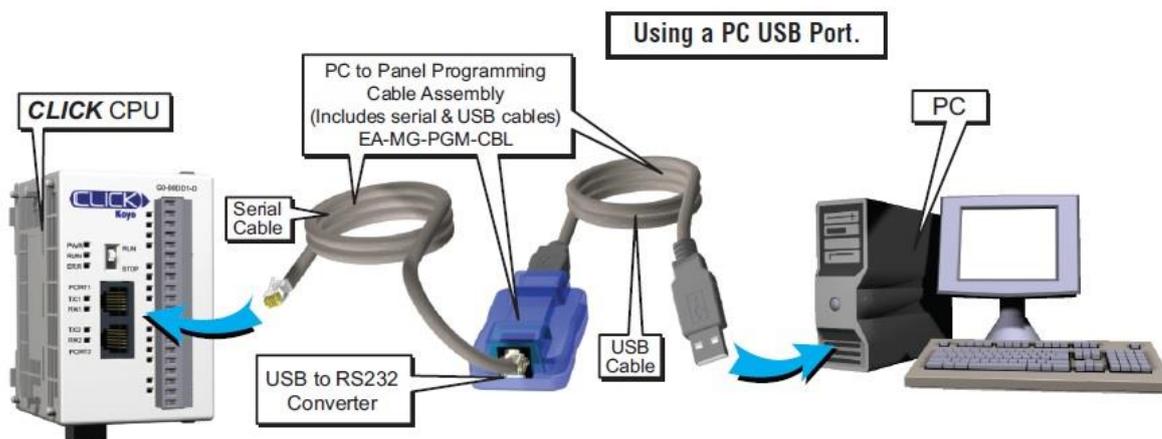


Figura F.4 - Esquema de conexión 1 para la configuración del PLC.  
Fuente: Referencia bibliográfica [2].

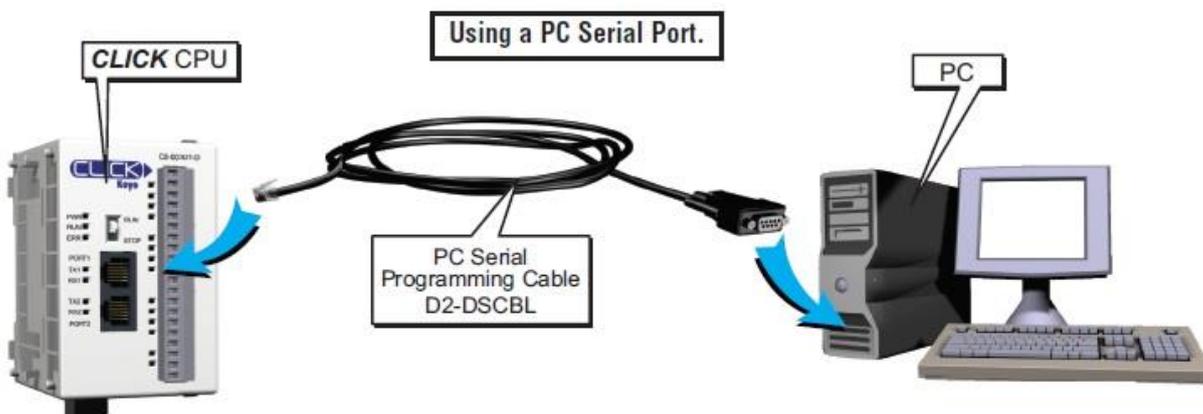


Figura F.5 - Esquema de conexión 2 para la configuración del PLC.  
Fuente: Referencia bibliográfica [2].

Una vez conectado, ejecutar el programa CLICK Programming Software. Luego, dar clic en **PLC / Connect**, verificar el Puerto COM y clic en el botón OK.

Para comenzar a configurar cada módulo, ir al menú **Setup / System Configuration**. Luego dar clic en el botón Config... de cada módulo para abrir su respectiva ventana de configuración (ver Figura F.6).

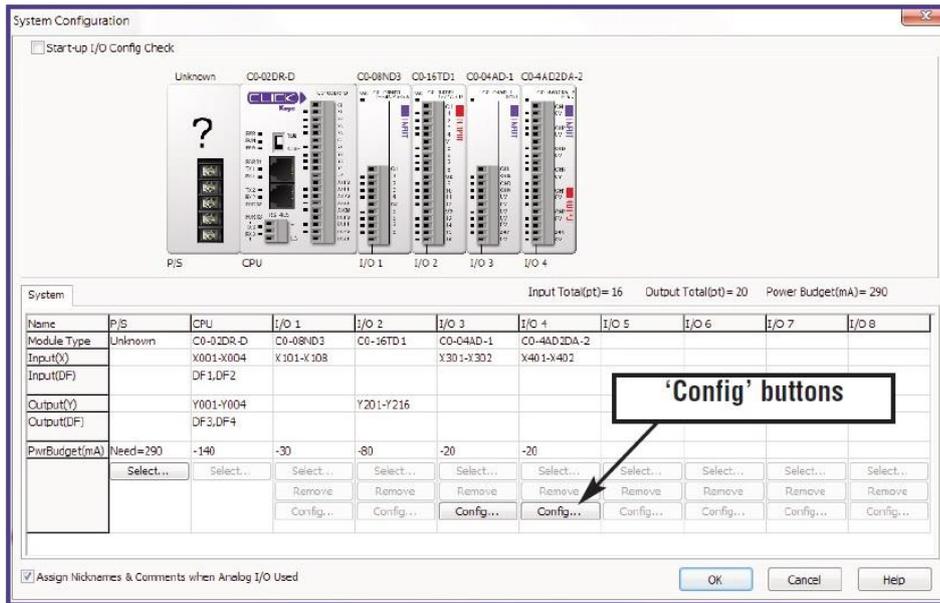


Figura F.6 - Ventana System Configuration del programa CLICK.

Fuente: Referencia bibliográfica [2].

La Figura F.7 muestra la configuración de cada canal para el módulo analógico 1. De manera similar, se realiza la configuración para los otros 2 módulos.

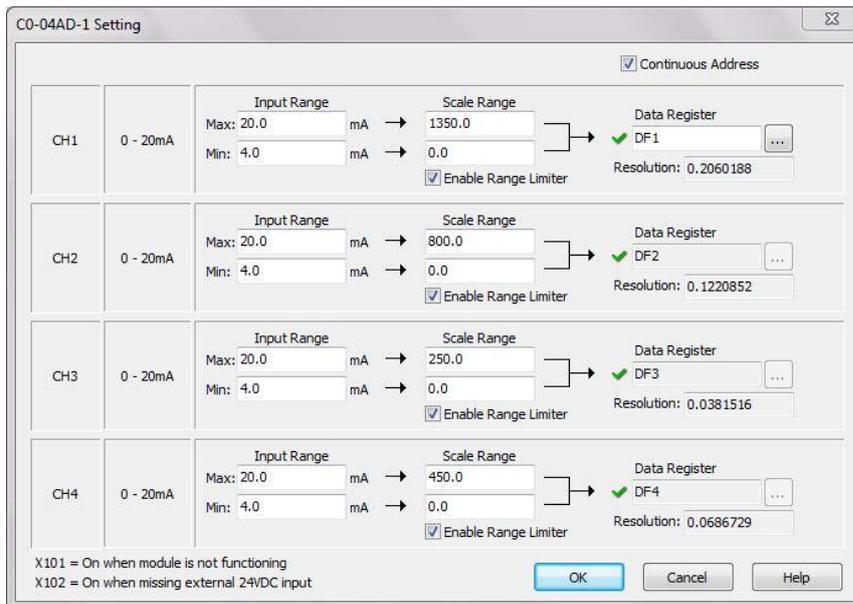


Figura F.7 - Configuración de los 4 canales, módulo analógico 1 del PLC.

Fuente: Referencia bibliográfica [2].

Por último, luego de haber configurado todos los módulos, ir al menú **PLC / Write Project into PLC** (o presionar Shift + F9) para grabar la configuración que se ha realizado anteriormente.

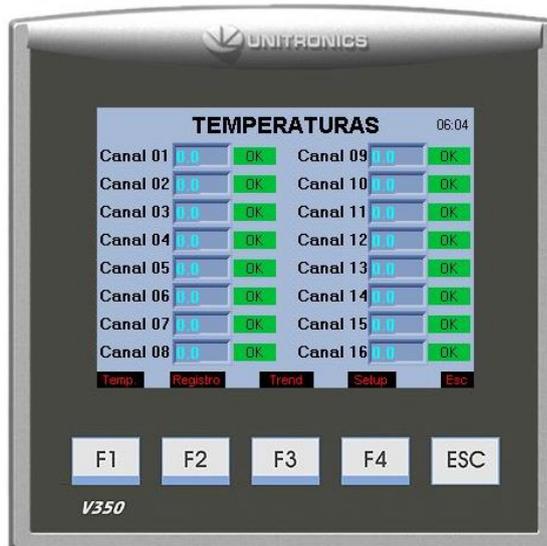
### 3. Sistema de visualización y registro de datos

Consta de un HMI (Human-Machine Interface) con el cual se podrá visualizar los datos y configurar el almacenamiento de los mismos.

El HMI con el que cuenta nuestro módulo de adquisición de datos, presenta 4 pantallas diferentes: Temp, Registro, Trend y Setup. Dichas pantallas pueden ser seleccionadas con los botones F1, F2, F3 y F4 respectivamente, o de manera táctil en la denominación de cada pantalla respectiva en la parte inferior del HMI.

### 3.1. Pantalla Temp.

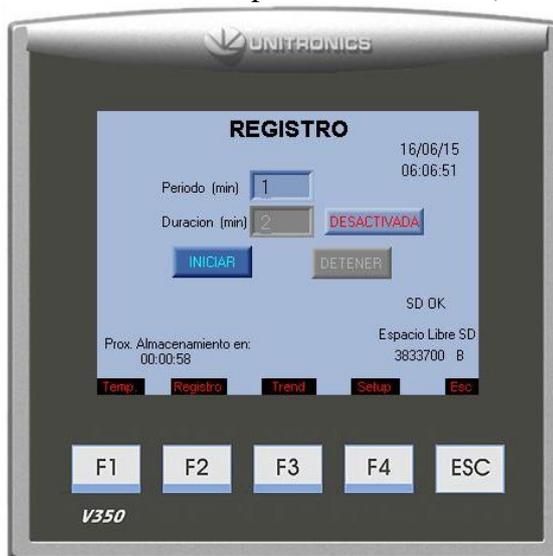
En esta pantalla se visualizará los valores de temperatura de cada sensor (actualmente muestra cuatro cifras y un decimal). Asimismo, se mostrará un mensaje de “Falla” en cada sensor debido a una incorrecta instalación, de ser el caso (ver Figura F.8).



**Figura F.8 - Pantalla Temp. del HMI.**  
Fuente: Elaboración propia.

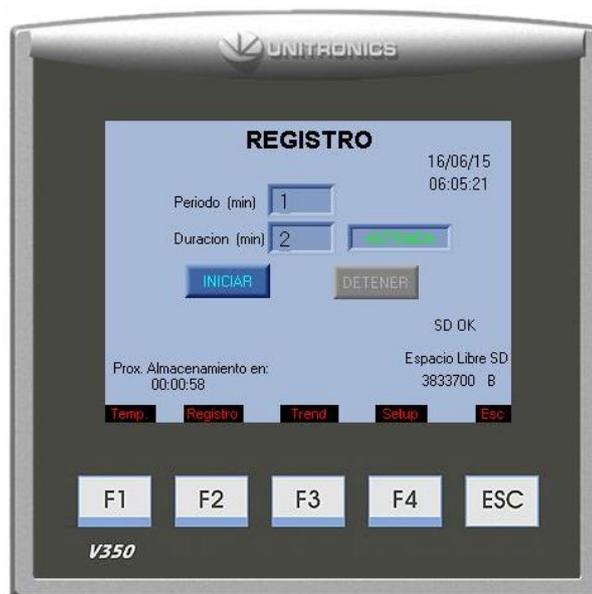
### 3.2. Pantalla Registro

En esta pantalla se configura la manera como se almacenarán los datos en la tarjeta SD del HMI. Asimismo, informa el estado de capacidad de la SD. (ver Figura F.9).



**Figura F.9 - Pantalla Registro del HMI – Periodo.**  
Fuente: Elaboración propia.

Con el presente módulo, existen 2 maneras de configurar el almacenamiento en memoria de los valores de temperatura censados: la primera consta de configurar sólo el periodo de grabación, para esto se debe deshabilitar la duración del registro (ver Figura F.9); mientras que la segunda forma consta de configurar el periodo y la duración del registro (ver Figura F.10).



**Figura F.10 - Pantalla Registro del HMI – Periodo y duración.**  
Fuente: Elaboración propia.

Para ingresar los valores tanto de periodo y duración se debe hacer clic sobre valores de ellos, respectivamente. Se mostrará una pantalla donde se ingresa el valor utilizando el teclado en pantalla (ver Figura F.11). Las unidades de periodo y duración son minutos. El valor máximo para periodo es 60 minutos y para la duración 1440 minutos (24 horas).



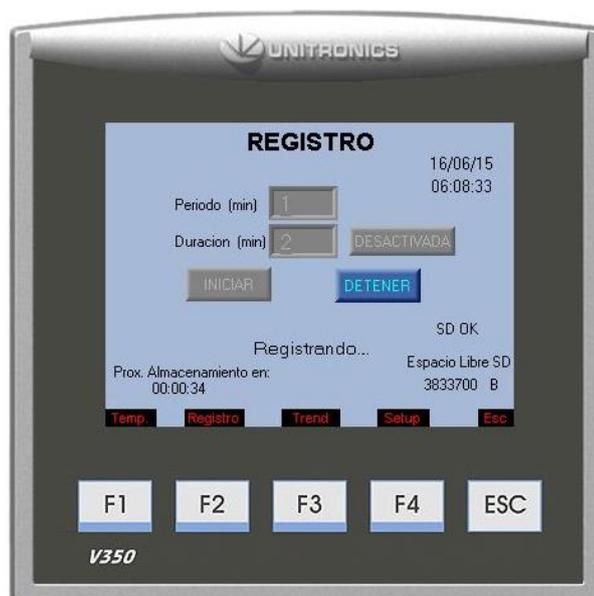
**Figura F.11 - Pantalla Registro del HMI - Ingreso de valores: periodo y duración.**  
Fuente: Elaboración propia.

Una vez configurado el periodo y duración (opcional) se debe hacer clic en el botón iniciar para comenzar el almacenamiento en memoria SD. Si se ha escogido periodo y duración, la pantalla registro mostrará, una vez presionado el botón **INICIAR**, una barra con el porcentaje de la duración realizado y la etiqueta “Registrando...” (ver Figura F.12).



**Figura F.12 - Pantalla Registro del HMI - Registrando con periodo y duración.**  
Fuente: Elaboración propia.

Si sólo se ha configurado el periodo, la pantalla únicamente mostrará la etiqueta “Registrando...” (ver Figura F.13) una vez presionado el botón **INICIAR**. Para ambos casos, la pantalla mostrará el tiempo restante para grabación en memoria, esto es útil para evitar extraer la memoria SD cerca al momento de grabación.<sup>17</sup>



**Figura F.13 - Pantalla Registro del HMI - Registrando con periodo.**  
Fuente: Elaboración propia.

<sup>17</sup> Esto es útil cuando se desea verificar los valores grabados en memoria SD antes de terminar el registro.

### 3.3. Pantalla Trend

En esta pantalla se visualiza de forma gráfica los valores de temperatura mostrados en la pantalla “Temp”. Para cambiar la gráfica a otro sensor se debe tocar la pantalla. (ver Figura F.14).

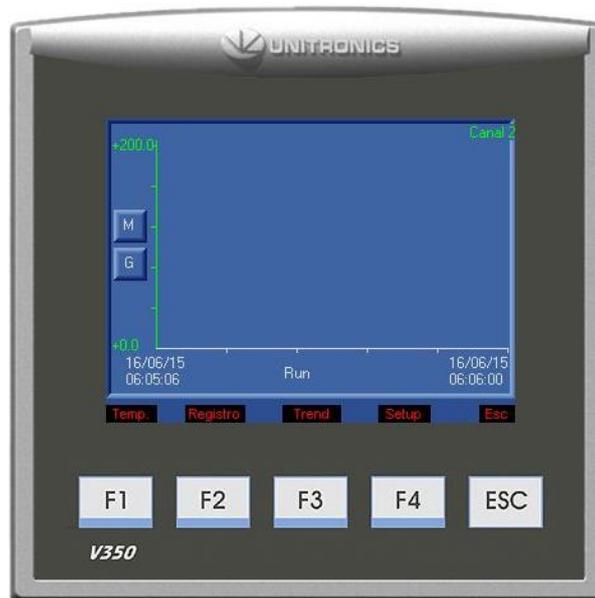


Figura F.14 - Pantalla Trend del HMI.

Fuente: Elaboración propia.

### 3.4. Pantalla Setup

En esta pantalla se configura las unidades de temperatura: grados Centígrados o Fahrenheit. Para cambiar de unidades tocar sobre las unidades actuales. Las unidades con que se ha configurado son con las que se grabarán en memoria. (ver Figura F.15).

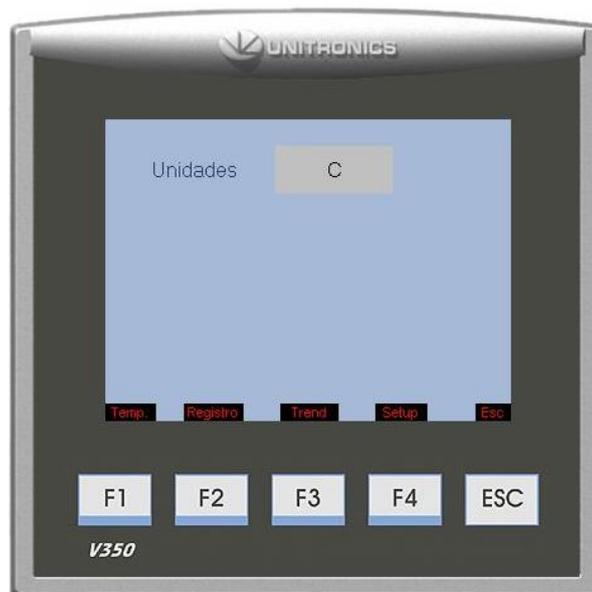


Figura F.15 - Pantalla Setup del HMI.

Fuente: Elaboración propia.

## Tarjeta SD

El HMI acepta tarjetas SD de hasta 8Gb. Para ello, primero se debe formatear la tarjeta con el formato tipo FAT y nombrar una etiqueta para la misma.

Una vez formateada la tarjeta SD, se ejecuta el programa Unitronics SD Card Suite. Se da clic en el menú **Tools / Ficha SD Format**, botón OK y genera los directorios por defecto.

Los datos registrados por el PLC serán almacenados en el archivo “Registro.csv” en la carpeta Excel/Excel1 de la tarjeta SD.

Mientras el PLC está registrando los datos, se puede retirar la SD para copiar los archivos y luego volver a conectarla en el módulo. La data siempre será anexada al mismo archivo.

Si se cambia de nombre al archivo “Registro.csv”, la SD crea un nuevo archivo llamado “Registro.csv” con los nuevos datos adquiridos del módulo.

## Resumen

Para poner en correcto funcionamiento el sistema de adquisición de datos deben seguirse los siguientes pasos:

- ✓ Verificar que todos los sensores estén conectados en sus respectivas posiciones (ver Sistema de adquisición de datos).
- ✓ Verificar que la alimentación del módulo sea correcta (ver Sistema de alimentación y protección eléctrica) y que no haya errores en el PLC de adquisición.  
Así mismo que los LED de comunicación estén parpadeando siempre (ver Sistema de adquisición de datos).
- ✓ Verificar que los valores mostrados en la pantalla “Temp” del HMI sean correctos (ver ).
- ✓ Verificar la configuración de unidades (ver Pantalla Setup).
- ✓ Verificar la configuración adecuada para la grabación en memoria SD (ver Pantalla Registro).



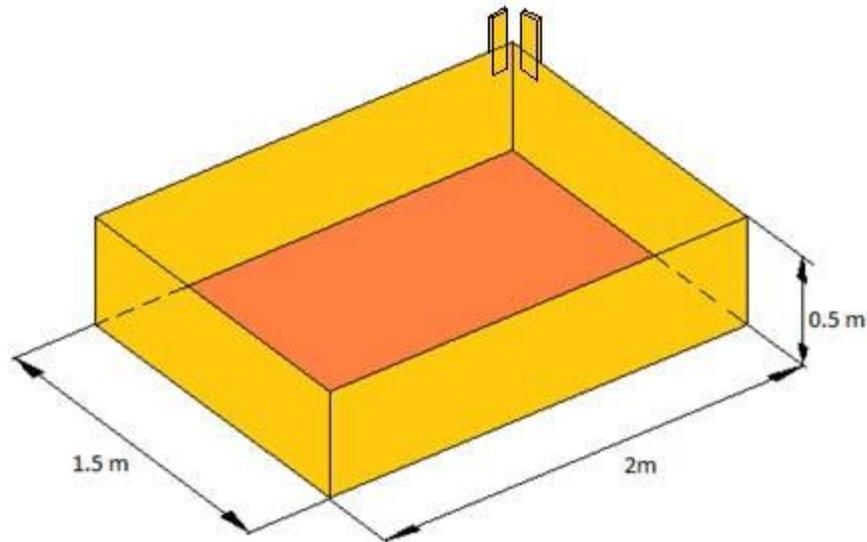
## Anexo G

### Confección de un bolso de lona

Materiales:

- 7 m<sup>2</sup> aproximadamente de lona (tela gruesa de alta resistencia).
- 12 metros aproximadamente de driza.
- 04 anillos de metal.
- Hilo y aguja de costura industrial.

El procedimiento a seguir en la construcción consiste en cortar la lona para darle la siguiente forma (ver Figura G.1) con costura resistente para prever desgarres.



**Figura G.1 - Esquema del prototipo del bolso de lona.**  
Fuente: Referencia bibliográfica [19].

En los cuatro extremos de la lona se cosen unas orejas del mismo material (lona), los cuales están adheridos de forma tal que se puede pasar la driza de nylon entre las orejas (dos por cada esquina) y así sirva como un bolsón (ver Figura G.2).



**Figura G.2 - Forma final después de la manufactura del prototipo del bolso de lona.**  
Fuente: Referencia bibliográfica [19].

Posteriormente se ata la driza al pasar por las orejas del bolso de lona y en el otro extremo de la driza de nylon se atan unos anillos de metal que facilitará el pesaje del bolso de lona con bagazo, tal como se muestra en la Figura G.3.



**Figura G.3 - Conexión de anillos de metal – driza – orejas del bolso de lona.**  
Fuente: Referencia bibliográfica [19].

## Anexo H

### Código en MATLAB

A continuación se presenta el código desarrollado para realizar el análisis termodinámico en la hornilla panelera del caso de estudio.

```
% P R E - P R O C E S O - I N G R E S O D E D A T O S
xmolar_CO2_bs = input('Fracción molar de CO2 en base seca (kmol CO2 base
seca/kmol gases combustión): '); %[kmol CO2 base seca/kmol gases
combustión]
xmolar_CO_bs = input('Fracción molar de CO en base seca (kmol CO base
seca/kmol gases combustión): '); %[kmol CO2 base seca/kmol gases
combustión]
xmolar_O2_bs = input('Fracción molar de O2 en base seca (kmol O2 base
seca/kmol gases combustión): '); %[kmol O2 base seca/kmol gases
combustión]
xmolar_N2_bs = input('Fracción molar de N2 en base seca (kmol N2 base
seca/kmol gases combustión): '); %[kmol N2 base seca/kmol gases
combustión]

phi_aire = input('Humedad relativa del aire (%): ');
%Humedad relativa del aire [%]
Altitud = input('Altitud del módulo panelero (m.s.n.m.): ');
%Altitud del trapiche [m.s.n.m.]

T_0_C = input('Temperatura ambiente (°C): ');
%Temperatura ambiente [°C]
T_0 = T_0_C + 273;
%Temperatura ambiente [K]
T_ducto_entrada_C = input('Temperatura a la entrada del ducto (°C): ');
%Temperatura entrada del ducto [°C]
T_ducto_entrada = T_ducto_entrada_C + 273;
%Temperatura entrada del ducto [K]
T_ducto_salida_C = input('Temperatura a la salida del ducto (°C): ');
%Temperatura salida del ducto [°C]
T_ducto_salida = T_ducto_salida_C + 273;
%Temperatura salida del ducto [K]

FlujoMasico_gases = input('Flujo másico de gases de combustión (kg gases
combustión/h): '); %[kg gases combustión/h]

k = input('Número de pailas (o tramos del ducto de humos): ');
%N° de pailas/tramos del DH
disp('Por favor, tomar en cuenta que se considera a la paila 1 como la
más cercana a la cámara de combustión.')
disp('La numeración de las pailas termina con la paila más cercana a la
chimenea.')
```

```

for i=1:1:k
    fprintf('Por favor, ingrese los datos de la paila %d.\n',i);
    Qpunto_aprovechable_paila(i) = input('Potencia térmica aprovechable
por la paila (MJ/h): '); %[MJ/h]
end

FlujoMasico_bgh_consumido = input('Flujo másico de bagazo húmedo
consumido (kg bagazo húmedo consumido/h): '); %[kg bagazo húmedo
consumido/h]
phi_bgh_bh = input('Humedad del bagazo consumido en base húmeda (%): ');
%[kg H2O bagazo húmedo/kg bagazo húmedo]

R_u = 8.31447;
%Constante universal de los gases [kJ/kmol.K]

%% B A L A N C E   D E   M A S A   (DUCTO DE HUMOS Y CÁMARA DE
COMBUSTIÓN)
%MASA MOLAR DE LOS ELEMENTOS
M_C = 12; M_H2 = 2; M_CO2 = 44; M_CO = 28; M_H2O = 18; M_O2 = 32; M_N2 =
28;    %Masa molar de cada compuesto [kg/kmol]

%Composición gravimétrica del bagazo seco (C + O2 + H2 + ceniza):
C = 47; O2 = 44; H2 = 6.5; ceniza = 2.5;
%Composición gravimétrica del bagazo seco [%]

FlujoMasico_bgs_consumido = FlujoMasico_bgh_consumido.*(1 -
phi_bgh_bh/100);    %[kg bagazo seco consumido/h]
FlujoMasico_H2O_bgh = FlujoMasico_bgh_consumido -
FlujoMasico_bgs_consumido;    %[kg H2O bagazo húmedo consumido/h]

npunto_H2O_bgh = FlujoMasico_H2O_bgh./M_H2O;
%[kmol H2O bagazo húmedo consumido/h]

npunto_C_bgs = FlujoMasico_bgs_consumido.*(C/100)./M_C;
%[kmol C bagazo seco consumido/h]
npunto_O2_bgs = FlujoMasico_bgs_consumido.*(O2/100)./M_O2;
%[kmol O2 bagazo seco consumido/h]
npunto_H2_bgs = FlujoMasico_bgs_consumido.*(H2/100)./M_H2;
%[kmol H2 bagazo seco consumido/h]

npunto_bgs_bs = npunto_C_bgs + npunto_O2_bgs + npunto_H2_bgs;
%[kmol bagazo seco consumido/h]

%Combustión INCOMPLETA con exceso de aire húmedo y bagazo húmedo
m = npunto_C_bgs./npunto_bgs_bs;
%[kmol C bagazo seco consumido/kmol bagazo seco consumido]
r = npunto_O2_bgs./npunto_bgs_bs;
%[kmol O2 bagazo seco consumido/kmol bagazo seco consumido]
n = npunto_H2_bgs./npunto_bgs_bs;
%[kmol H2 bagazo seco consumido/kmol bagazo seco consumido]

nmolar_H2O_bgh_bs = npunto_H2O_bgh./npunto_bgs_bs;
%[kmol H2O bagazo húmedo consumido/kmol bagazo seco consumido]

Tabla_A4_T_bs_ah (ver Anexo H.1)
P_atm_kPa = 101.29 - 0.011837*(Altitud) + 4.793*(10^(-
7))* (Altitud^2);    %Presión atmosférica [kPa]

```

```

P_atm = P_atm_kPa./101.325;
%Presión atmosférica [atm]
P_satT_bs_ah = interp1(T_bs_ah(:,1),T_bs_ah(:,2),T_0_C,'lineal');
%Presión de saturación a la temperatura del aire húmedo [kPa]
P_H2O_ah = (phi_aire./100).*P_satT_bs_ah;
%Presión parcial de vapor de agua en el aire húmedo [kPa]

nmolar_g_bs = m./(xmolar_CO2_bs + xmolar_CO_bs);
%[kmol gases combustión base seca/kmol bagazo seco consumido]

a_r = (nmolar_g_bs.*xmolar_N2_bs)./3.76;
%[kmol O2 aire húmedo/kmol bagazo seco consumido]

nmolar_as = 4.76*a_r;
%[kmol aire seco real/kmol bagazo seco consumido]

nmolar_H2O_ah = (P_H2O_ah.*nmolar_as)./(P_atm_kPa - P_H2O_ah);
%[kmol H2O aire húmedo/kmol bagazo seco consumido]

nmolar_H2O_g = n + nmolar_H2O_bgh_bs + nmolar_H2O_ah;
%[kmol H2O gases combustión/kmol bagazo seco consumido]

xmolar_CO2_bh = xmolar_CO2_bs./(1 + (nmolar_H2O_g./nmolar_g_bs));
%[kmol CO2 gases combustión/kmol gases combustión]
xmolar_CO_bh = xmolar_CO_bs./(1 + (nmolar_H2O_g./nmolar_g_bs));
%[kmol CO gases combustión/kmol gases combustión]
xmolar_O2_bh = xmolar_O2_bs./(1 + (nmolar_H2O_g./nmolar_g_bs));
%[kmol O2 gases combustión/kmol gases combustión]
xmolar_N2_bh = xmolar_N2_bs./(1 + (nmolar_H2O_g./nmolar_g_bs));
%[kmol N2 gases combustión/kmol gases combustión]
xmolar_H2O_bh = 1 - (xmolar_CO2_bh + xmolar_CO_bh + xmolar_O2_bh +
xmolar_N2_bh); % [kmol H2O gases combustión/kmol gases combustión]

M_g = xmolar_CO2_bh.*M_CO2 + xmolar_CO_bh.*M_CO + xmolar_H2O_bh.*M_H2O...
+ xmolar_O2_bh.*M_O2 + xmolar_N2_bh.*M_N2;
%[kg gases combustión/kmol gases combustión]

npunto_g_bh = FlujoMasico_gases./M_g;
%[kmol gases combustión/h]

%FLUJO MOLAR DE LOS PRODUCTOS
npunto_CO2 = npunto_g_bh.*xmolar_CO2_bh;
%[kmol CO2 gases combustión/h]
npunto_CO = npunto_g_bh.*xmolar_CO_bh;
%[kmol CO gases combustión/h]
npunto_O2 = npunto_g_bh.*xmolar_O2_bh;
%[kmol O2 gases combustión/h]
npunto_N2 = npunto_g_bh.*xmolar_N2_bh;
%[kmol N2 gases combustión/h]
npunto_H2O_g = npunto_g_bh.*xmolar_H2O_bh;
%[kmol H2O gases combustión/h]

nmolar_CO2 = nmolar_g_bs.*xmolar_CO2_bs;
%[kmol CO2 gases combustión/kmol bagazo seco consumido]
nmolar_CO = nmolar_g_bs.*xmolar_CO_bs;
%[kmol CO gases combustión/kmol bagazo seco consumido]
nmolar_O2 = nmolar_g_bs.*xmolar_O2_bs;
%[kmol O2 gases combustión/kmol bagazo seco consumido]

```

```

nmolar_N2 = nmolar_g_bs.*xmolar_N2_bs;
%[kmol N2 gases combustión/kmol bagazo seco consumido]

%% B A L A N C E   D E   E N E R G Í A   (CÁMARA DE COMBUSTIÓN Y DUCTO DE
HUMOS)
Table_of_Coefficients_for_species_properties_JANAF (ver Anexo H.2)
Calculation_of_Enthalpy_and_Entropy_vF (ver Anexo H.3)

%POTENCIA TÉRMICA SUMINISTRADA POR LA COMBUSTIÓN DEL BAGAZO
PCI_bgh = 17850 - 203.5*(phi_bgh_bh);
%[kJ/kg de bagazo húmedo consumido]
Qpunto_suministrada = FlujoMasico_bgh_consumido.*PCI_bgh./1000;
%[MJ/h]

%POTENCIA TÉRMICA APROVECHADA POR LAS PAILAS
Qpunto_aprovechable = 0;
for i=1:1:k
    Qpunto_aprovechable = Qpunto_aprovechable +
Qpunto_aprovechable_paila(i);    %[MJ/h]
end

%POTENCIA TÉRMICA DISPONIBLE EN LOS GASES DE COMBUSTIÓN
Qpunto_disponible = (npunto_CO2.*Deltahmolar_CO2_e0...
    + npunto_CO.*Deltahmolar_CO_e0...
    + npunto_O2.*Deltahmolar_O2_e0...
    + npunto_N2.*Deltahmolar_N2_e0...
    + npunto_H2O_g.*Deltahmolar_H2O_e0)./1000;
%[MJ/h]

%POTENCIA TÉRMICA PERDIDA POR COMBUSTIÓN INCOMPLETA
Qpunto_pc = Qpunto_suministrada - Qpunto_disponible;
%[MJ/h]
Porcentaje_Qpunto_pc = (Qpunto_pc./Qpunto_suministrada).*100;
%[%]

%POTENCIA TÉRMICA PERDIDA POR LOS GASES DE COMBUSTIÓN EN LA CHIMENEA
Qpunto_ch = (npunto_CO2.*(Deltahmolar_CO2_s0) ...
    + npunto_CO.*(Deltahmolar_CO_s0) ...
    + npunto_O2.*(Deltahmolar_O2_s0) ...
    + npunto_N2.*(Deltahmolar_N2_s0) ...
    + npunto_H2O_g.*(Deltahmolar_H2O_s0))./1000;
%[MJ/h]
Porcentaje_Qpunto_ch = (Qpunto_ch./Qpunto_suministrada).*100;
%[%]

%POTENCIA TÉRMICA PERDIDA POR LAS PAREDES
Qpunto_pp = Qpunto_disponible - Qpunto_aprovechable - Qpunto_ch;
%[MJ/h]
Porcentaje_Qpunto_pp = (Qpunto_pp./Qpunto_suministrada).*100;
%[%]

%EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN
Eff_comb = (Qpunto_disponible./Qpunto_suministrada).*100;
%Eficiencia de combustión [%]

%EFICIENCIA DE TRANSFERENCIA DE CALOR
Eff_transferencia = (Qpunto_aprovechable./Qpunto_disponible).*100;
%Eficiencia de transferencia [%]

```

## %EFICIENCIA TÉRMICA DE LA HORNILLA PANELERA

```
Eff_termica = (Qpunto_aprovechable./Qpunto_suministrada).*100;
%Eficiencia térmica [%]
```

## %BALANCE DE ENTROPÍA (CÁMARA DE COMBUSTIÓN)

```
nmolar_bgh = m + r + n + nmolar_H2O_bgh_bs;
%[kmol bagazo húmedo consumido/kmol bagazo seco consumido]
nmolar_ah = a_r + 3.76.*a_r + nmolar_H2O_ah;
%[kmol aire húmedo/kmol bagazo seco consumido]
nmolar_g = nmolar_g_bs + nmolar_H2O_g;
%[kmol gases combustión/kmol bagazo seco consumido]
```

## %Entropías absolutas a 25°C y 1atm (Tabla A-26)

```
smolar_C = 5.74;           %[kJ/kmol*K]
smolar_O2 = 205.04;       %[kJ/kmol*K]
smolar_H2 = 130.68;       %[kJ/kmol*K]
smolar_H2O = 69.92;       %[kJ/kmol*K]
```

## %Entropía por unidad de mol de combustible de los REACTANTES [kJ/(kmol bagazo consumido)\*K]

```
smolar_reactantes = m.*(smolar_C - R_u.*log((m./nmolar_bgh).*P_atm))...
    + r.*(smolar_O2 - R_u.*log((r./nmolar_bgh).*P_atm))...
    + n.*(smolar_H2 - R_u.*log((n./nmolar_bgh).*P_atm))...
    + nmolar_H2O_bgh_bs.*(smolar_H2O -
R_u.*log((nmolar_H2O_bgh_bs./nmolar_bgh).*P_atm))...   %smolar_H2O_0
    + a_r.*(smolar_O2_0 -
R_u.*log((a_r./nmolar_ah).*P_atm))...
    + 3.76.*a_r.*(smolar_N2_0 -
R_u.*log((3.76.*a_r./nmolar_ah).*P_atm))...
    + nmolar_H2O_ah.*(smolar_H2O -
R_u.*log((nmolar_H2O_ah./nmolar_ah).*P_atm));           %smolar_H2O_0
```

## %Entropía por unidad de mol de combustible de los PRODUCTOS [kJ/(kmol bagazo consumido)\*K]

```
smolar_productos = nmolar_CO2.*(smolar_CO2_e -
R_u.*log((nmolar_CO2./nmolar_g).*P_atm))...
    + nmolar_CO.*(smolar_CO_e -
R_u.*log((nmolar_CO./nmolar_g).*P_atm))...
    + nmolar_O2.*(smolar_O2_e -
R_u.*log((nmolar_O2./nmolar_g).*P_atm))...
    + nmolar_N2.*(smolar_N2_e -
R_u.*log((nmolar_N2./nmolar_g).*P_atm))...
    + nmolar_H2O_g.*(smolar_H2O_e -
R_u.*log((nmolar_H2O_g./nmolar_g).*P_atm));
```

## %Tasa de entropía generada en CC por unidad de mol de combustible [kJ/(kmol bagazo consumido)\*K]

```
smolar_gen_CC = smolar_productos - smolar_reactantes;
%[kJ/(kmol bagazo consumido)*K]
%Tasa de entropía generada en CC [MJ/(h*K)]
Spunto_gen_CC = (npunto_bgs_bs.*smolar_gen_CC)./1000;
%[MJ/(h*K)]
```

## %BALANCE DE ENTROPÍA (DUCTO DE HUMOS)

```
Spunto_gen_gases = FlujoMasico_gases.*(xmolar_CO2_bh.*(Deltasmolar_CO2_s0
- Deltasmolar_CO2_e0))...
```

```

        + xmolar_CO_bh.*(Deltasmolar_CO_s0 -
Deltasmolar_CO_e0)...
        + xmolar_O2_bh.*(Deltasmolar_O2_s0 -
Deltasmolar_O2_e0)...
        + xmolar_N2_bh.*(Deltasmolar_N2_s0 -
Deltasmolar_N2_e0)...
        + xmolar_H2O_bh.*(Deltasmolar_H2O_s0 -
Deltasmolar_H2O_e0))./(M_g.*1000);    %Delta de entalpía en DH [MJ/(h.K)]

T_ebullicion_H2O = 2147./(10.76-log10(P_atm_kPa*1000))-273.15;
%Presión saturación o ebullición del agua [°C]
B_jcr = 16;
%Grados Brix del jugo crudo [°Bx]
T_ebullicion_jcr_C = T_ebullicion_H2O + (2*B_jcr)./(100-B_jcr);
%Temperatura de ebullición del jugo crudo [°C]
T_ebullicion_jcr = T_ebullicion_jcr_C + 273;
%Temperatura de ebullición del jugo clarificado [K]
Spunto_gen_Q = 0;
for i=1:1:k
    Spunto_gen_Q = Spunto_gen_Q +
(Qpunto_aprovechable_paila(i)./T_ebullicion_jcr); % [MJ/(h*K)]
end

Spunto_gen_pared = Qpunto_pp./T_0;
% [MJ/(h*K)]

%Tasa de entropía generada en DH [MJ/(h*K)]
Spunto_gen_DH = Spunto_gen_gases + Spunto_gen_Q + Spunto_gen_pared;
% [MJ/(h*K)]

Spunto_gen = Spunto_gen_CC + Spunto_gen_DH;
% [MJ/(h*K)]

%% E X E R G Í A   D E S T R U I D A
Xdestruida_CC = T_0.*Spunto_gen_CC;
% [MJ/h]

Xdestruida_DH = T_0.*Spunto_gen_DH;
% [MJ/h]

Xdestruida = Xdestruida_CC + Xdestruida_DH;
% [MJ/h]

%% P O S T - P R O C E S O   -   S A L I D A   D E   D A T O S
%Fracción molar de CO2 en base húmeda [kmol CO2 gases combustión/kmol
gases combustión]
fprintf('Fracción molar de CO2 en base húmeda [kmol CO2 gases
combustión/kmol gases combustión]: %d.\n',xmolar_CO2_bh)
%Fracción molar de CO en base húmeda [kmol CO gases combustión/kmol gases
combustión]
fprintf('Fracción molar de CO en base húmeda [kmol CO gases
combustión/kmol gases combustión]: %d.\n',xmolar_CO_bh)
%Fracción molar de O2 en base húmeda [kmol O2 gases combustión/kmol gases
combustión]
fprintf('Fracción molar de O2 en base húmeda [kmol O2 gases
combustión/kmol gases combustión]: %d.\n',xmolar_O2_bh)
%Fracción molar de N2 en base húmeda [kmol N2 gases combustión/kmol gases
combustión]

```

```

fprintf('Fracción molar de N2 en base húmeda [kmol N2 gases
combustión/kmol gases combustión]: %d.\n',xmolar_N2_bh)
%Fracción molar de H2O en base húmeda [kmol H2O gases combustión/kmol
gases combustión]
fprintf('Fracción molar de H2O en base húmeda [kmol H2O gases
combustión/kmol gases combustión]: %d.\n',xmolar_H2O_bh)

%Potencia térmica SUMINISTRADA por la combustión del bagazo [MJ/h]
fprintf('Potencia térmica SUMINISTRADA por la combustión del bagazo
[MJ/h]: %d.\n',Qpunto_suministrada)
%Potencia térmica APROVECHADA por las pailas [MJ/h]
fprintf('Potencia térmica APROVECHADA por las pailas [MJ/h]:
%d.\n',Qpunto_aprovechable)
%Potencia térmica DISPONIBLE por los gases de combustión [MJ/h]
fprintf('Potencia térmica DISPONIBLE por los gases de combustión [MJ/h]:
%d.\n',Qpunto_disponible)
%Potencia térmica PERDIDA por COMBUSTIÓN INCOMPLETA [MJ/h]
fprintf('Potencia térmica PERDIDA por COMBUSTIÓN INCOMPLETA [MJ/h]:
%d.\n',Qpunto_pc)
%Potencia térmica PERDIDA por los gases de combustión en la CHIMENEA
[MJ/h]
fprintf('Potencia térmica PERDIDA por los gases de combustión en la
CHIMENEA [MJ/h]: %d.\n',Qpunto_ch)
%Potencia térmica PERDIDA por las PAREDES [MJ/h]
fprintf('Potencia térmica PERDIDA por las PAREDES [MJ/h]]:
%d.\n',Qpunto_pp)
%Eficiencia de COMBUSTIÓN [%]
fprintf('Eficiencia de combustión: %d.\n',Eff_comb)
%Eficiencia de TRANSFERENCIA DE CALOR [%]
fprintf('Eficiencia de transferencia: %d.\n',Eff_transferencia)
%Eficiencia TÉRMICA de la hornilla panelera [%]
fprintf('Eficiencia térmica: %d.\n',Eff_termica)

%Tasa de entropía generada en la Cámara de Combustión [MJ/(h*K)]
fprintf('Tasa de entropía generada en la Cámara de Combustión [MJ/(h*K)]:
%d.\n',Spunto_gen_CC)
%Tasa de entropía generada en el Ducto de Humos [MJ/(h*K)]
fprintf('Tasa de entropía generada en el Ducto de Humos [MJ/(h*K)]:
%d.\n',Spunto_gen_DH)
%Tasa de entropía generada en la hornilla panelera [MJ/(h*K)]
fprintf('Tasa de entropía generada en la hornilla panelera [MJ/(h*K)]:
%d.\n',Spunto_gen)
%Tasa de exergía destruida en la Cámara de Combustión [MJ/h]
fprintf('Tasa de exergía destruida en la Cámara de Combustión [MJ/h]:
%d.\n',Xdestruida_CC)
%Tasa de exergía destruida en el Ducto de Humos [MJ/h]
fprintf('Tasa de exergía destruida en el Ducto de Humos [MJ/h]:
%d.\n',Xdestruida_DH)
%Tasa de exergía destruida en la hornilla panelera [MJ/h]
fprintf('Tasa de exergía destruida en la hornilla panelera [MJ/h]:
%d.\n',Xdestruida)

```

**Anexo H.1: Tabla\_A4\_T\_bs\_ah**

```

%%Agua saturada. Tabla de temperaturas
%      T      P_sat
%      [°C]   [kPa]
T_bs_ah=[0.01    0.6117;
         5      0.8725;
         10     1.2281;
         15     1.7057;
         20     2.3392;
         25     3.1698;
         30     4.2469;
         35     5.6291;
         40     7.3851;
         45     9.5953;
         50    12.352;
         55    15.763;
         60    19.947;
         65    25.043;
         70    31.202;
         75    38.597;
         80    47.416;
         85    57.868;
         90    70.183;
         95    84.609;
        100    101.42;
        105    120.90;
        110    143.38;
        115    169.18;
        120    198.67];

```

**Anexo H.2: Table\_of\_Coefficients\_for\_species\_properties\_JANAF**

```

%%COEFFICIENTS FOR SPECIES THERMODYNAMIC PROPERTIES
%NASA Equilibrium Code - JANAF Table thermodynamic data
%Burned: 1000-5000 K / Unburned: 300-1000 K
Species =
{'CO2_b'; 'CO2_u'; 'H2O_b'; 'H2O_u'; 'CO_b'; 'CO_u'; 'H2_b'; 'H2_u'; 'O2_b'; 'O2_u'
'; 'N2_b'; 'N2_u'; 'OH'; 'NO'; 'O'; 'H'};
a1 =
[0.44608*(10^1); 0.24008*(10^1); 0.27168*(10^1); 0.40701*(10^1); 0.29841*(10^
1); 0.37101*(10^1);
0.31002*(10^1); 0.30574*(10^1); 0.36220*(10^1); 0.36256*(10^1); 0.28963*(10^1
); 0.36748*(10^1);
0.29106*(10^1); 0.31890*(10^1); 0.25421*(10^1); 0.25*(10^1)];
a2 = [0.30982*(10^-2); 0.87351*(10^-2); 0.29451*(10^-2); -0.11084*(10^-
2); 0.14891*(10^-2);
-0.16191*(10^-2); 0.51119*(10^-3); 0.26765*(10^-2); 0.73618*(10^-3); -
0.18782*(10^-2);
0.15155*(10^-2); -0.12082*(10^-2); 0.95932*(10^-3); 0.13382*(10^-2); -
0.27551*(10^-4); 0.0];
a3 = [-0.12393*(10^-5); -0.66071*(10^-5); -0.80224*(10^-6); 0.41521*(10^-
5); -0.57900*(10^-6);
0.36924*(10^-5); 0.52644*(10^-7); -0.58099*(10^-5); -0.19652*(10^-
6); 0.70555*(10^-5);
-0.57235*(10^-6); 0.23240*(10^-5); -0.19442*(10^-6); -0.52899*(10^-6); -
0.31028*(10^-8); 0.0];
a4 = [0.22741*(10^-9); 0.20022*(10^-8); 0.10227*(10^-9); -0.29637*(10^-
8); 0.10365*(10^-9);

```

```

-0.20320*(10^-8);-0.34910*(10^-10);0.55210*(10^-8);0.36202*(10^-10);-
0.67635*(10^-8);
0.99807*(10^-10);-0.63218*(10^-9);0.13757*(10^-10);0.95919*(10^-
10);0.45511*(10^-11);0.0];
a5 = [-0.15526*(10^-13);0.63274*(10^-15);-0.48472*(10^-14);0.80702*(10^-
12);-0.69354*(10^-14);
0.23953*(10^-12);0.36945*(10^-14);-0.18123*(10^-11);-0.28946*(10^-
14);0.21556*(10^-11);
-0.65224*(10^-14);-0.22577*(10^-12);0.14225*(10^-15);-0.64848*(10^-
14);-0.43681*(10^-15);0.0];
a6 = [-0.48961*(10^5);-0.48378*(10^5);-0.29906*(10^5);-0.30280*(10^5);-
0.14245*(10^5);
-0.14356*(10^5);-0.87738*(10^3);-0.98890*(10^3);-0.12020*(10^4);-
0.10475*(10^4);-0.90586*(10^3);
-
0.10612*(10^4);0.39354*(10^4);0.98283*(10^4);0.29231*(10^5);0.25472*(10^5
)];
a7 = [-0.98636*(10^0);0.96951*(10^1);0.66306*(10^1);-
0.32270*(10^0);0.63479*(10^1);0.29555*(10^1);
-0.19629*(10^1);-
0.22997*(10^1);0.36151*(10^1);0.43053*(10^1);0.61615*(10^1);0.23580*(10^1
)];
0.54423*(10^1);0.67458*(10^1);0.49203*(10^1);-0.46012*(10^0)];
T = table(a1,a2,a3,a4,a5,a6,a7, 'RowNames',Species);

```

### Anexo H.3: Calculation\_of\_Enthalpy\_and\_Entropy\_vF

```

%%CALCULATION OF ENTHALPY AND ENTROPY
%En el AMBIENTE...
%Dióxido de Carbono (CO2)
hmolar_CO2_0 = (T.a1('CO2_u') + T.a2('CO2_u')/2.*T_0...
+ T.a3('CO2_u')/3.*(T_0.^2) + T.a4('CO2_u')/4.*(T_0.^3)...
+ T.a5('CO2_u')/5.*(T_0.^4) +
T.a6('CO2_u')./(T_0)).*(R_u.*T_0); %Entalpía molar de CO2 a T_0
[kJ/kmol]
smolar_CO2_0 = R_u.*(T.a1('CO2_u').*log(T_0) + T.a2('CO2_u').*T_0...
+ T.a3('CO2_u')/2.*(T_0.^2) + T.a4('CO2_u')/3.*(T_0.^3)...
+ T.a5('CO2_u')/4.*(T_0.^4) + T.a7('CO2_u'));
%Entropía molar de CO2 a T_0 [kJ/kmol.K]
%Monóxido de Carbono (CO)
hmolar_CO_0 = (T.a1('CO_u') + T.a2('CO_u')/2.*T_0...
+ T.a3('CO_u')/3.*(T_0.^2) + T.a4('CO_u')/4.*(T_0.^3)...
+ T.a5('CO_u')/5.*(T_0.^4) +
T.a6('CO_u')./(T_0)).*(R_u.*T_0); %Entalpía molar de CO a T_0
[kJ/kmol]
smolar_CO_0 = R_u.*(T.a1('CO_u').*log(T_0) + T.a2('CO_u').*T_0...
+ T.a3('CO_u')/2.*(T_0.^2) + T.a4('CO_u')/3.*(T_0.^3)...
+ T.a5('CO_u')/4.*(T_0.^4) + T.a7('CO_u'));
%Entropía molar de CO a T_0 [kJ/kmol.K]
%Oxígeno (O2)
hmolar_O2_0 = (T.a1('O2_u') + T.a2('O2_u')/2.*T_0...
+ T.a3('O2_u')/3.*(T_0.^2) + T.a4('O2_u')/4.*(T_0.^3)...
+ T.a5('O2_u')/5.*(T_0.^4) +
T.a6('O2_u')./(T_0)).*(R_u.*T_0); %Entalpía molar de O2 a T_0
[kJ/kmol]
smolar_O2_0 = R_u.*(T.a1('O2_u').*log(T_0) + T.a2('O2_u').*T_0...
+ T.a3('O2_u')/2.*(T_0.^2) + T.a4('O2_u')/3.*(T_0.^3)...
+ T.a5('O2_u')/4.*(T_0.^4) + T.a7('O2_u'));
%Entropía molar de O2 a T_0 [kJ/kmol.K]
%Nitrógeno (N2)
hmolar_N2_0 = (T.a1('N2_u') + T.a2('N2_u')/2.*T_0...

```

```

+ T.a3('N2_u')/3.*(T_0.^2) + T.a4('N2_u')/4.*(T_0.^3)...
+ T.a5('N2_u')/5.*(T_0.^4) +
T.a6('N2_u')./(T_0)).*(R_u.*T_0); %Entalpía molar de N2 a T_0
[kJ/kmol]
smolar_N2_0 = R_u.*(T.a1('N2_u').*log(T_0) + T.a2('N2_u').*T_0...
+ T.a3('N2_u')/2.*(T_0.^2) + T.a4('N2_u')/3.*(T_0.^3)...
+ T.a5('N2_u')/4.*(T_0.^4) + T.a7('N2_u'));
%Entropía molar de N2 a T_0 [kJ/kmol.K]
%Agua (H2O)
hmolar_H2O_0 = (T.a1('H2O_u') + T.a2('H2O_u')/2.*T_0...
+ T.a3('H2O_u')/3.*(T_0.^2) + T.a4('H2O_u')/4.*(T_0.^3)...
+ T.a5('H2O_u')/5.*(T_0.^4) +
T.a6('H2O_u')./(T_0)).*(R_u.*T_0); %Entalpía molar de H2O a T_0 [kJ/kmol]
smolar_H2O_0 = R_u.*(T.a1('H2O_u').*log(T_0) + T.a2('H2O_u').*T_0...
+ T.a3('H2O_u')/2.*(T_0.^2) + T.a4('H2O_u')/3.*(T_0.^3)...
+ T.a5('H2O_u')/4.*(T_0.^4) + T.a7('H2O_u'));
%Entropía molar de H2O a T_0 [kJ/kmol.K]

%En la ENTRADA del Ducto de Humos...
if T_ducto_entrada>1000
%Dióxido de Carbono (CO2)
hmolar_CO2_e = (T.a1('CO2_b') + T.a2('CO2_b')/2.*T_ducto_entrada...
+ T.a3('CO2_b')/3.*(T_ducto_entrada.^2) +
T.a4('CO2_b')/4.*(T_ducto_entrada.^3)...
+ T.a5('CO2_b')/5.*(T_ducto_entrada.^4) +
T.a6('CO2_b')./(T_ducto_entrada)).*(R_u.*T_ducto_entrada); %Entalpía
molar de CO2 burned [kJ/kmol]
smolar_CO2_e = R_u.*(T.a1('CO2_b').*log(T_ducto_entrada) +
T.a2('CO2_b').*T_ducto_entrada...
+ T.a3('CO2_b')/2.*(T_ducto_entrada.^2) +
T.a4('CO2_b')/3.*(T_ducto_entrada.^3)...
+ T.a5('CO2_b')/4.*(T_ducto_entrada.^4) +
T.a7('CO2_b')); %Entropía molar de CO2 burned [kJ/kmol.K]
%Monóxido de Carbono (CO)
hmolar_CO_e = (T.a1('CO_b') + T.a2('CO_b')/2.*T_ducto_entrada...
+ T.a3('CO_b')/3.*(T_ducto_entrada.^2) +
T.a4('CO_b')/4.*(T_ducto_entrada.^3)...
+ T.a5('CO_b')/5.*(T_ducto_entrada.^4) +
T.a6('CO_b')./(T_ducto_entrada)).*(R_u.*T_ducto_entrada); %Entalpía
molar de CO burned [kJ/kmol]
smolar_CO_e = R_u.*(T.a1('CO_b').*log(T_ducto_entrada) +
T.a2('CO_b').*T_ducto_entrada...
+ T.a3('CO_b')/2.*(T_ducto_entrada.^2) +
T.a4('CO_b')/3.*(T_ducto_entrada.^3)...
+ T.a5('CO_b')/4.*(T_ducto_entrada.^4) + T.a7('CO_b'));
%Entropía molar de CO burned [kJ/kmol.K]
%Oxígeno (O2)
hmolar_O2_e = (T.a1('O2_b') + T.a2('O2_b')/2.*T_ducto_entrada...
+ T.a3('O2_b')/3.*(T_ducto_entrada.^2) +
T.a4('O2_b')/4.*(T_ducto_entrada.^3)...
+ T.a5('O2_b')/5.*(T_ducto_entrada.^4) +
T.a6('O2_b')./(T_ducto_entrada)).*(R_u.*T_ducto_entrada); %Entalpía
molar de O2 burned [kJ/kmol]
smolar_O2_e = R_u.*(T.a1('O2_b').*log(T_ducto_entrada) +
T.a2('O2_b').*T_ducto_entrada...
+ T.a3('O2_b')/2.*(T_ducto_entrada.^2) +
T.a4('O2_b')/3.*(T_ducto_entrada.^3)...
+ T.a5('O2_b')/4.*(T_ducto_entrada.^4) + T.a7('O2_b'));
%Entropía molar de O2 burned [kJ/kmol.K]
%Nitrógeno (N2)

```

```

    hmolar_N2_e = (T.a1('N2_b') + T.a2('N2_b')/2.*T_ducto_entrada...
        + T.a3('N2_b')/3.*(T_ducto_entrada.^2) +
T.a4('N2_b')/4.*(T_ducto_entrada.^3)...
        + T.a5('N2_b')/5.*(T_ducto_entrada.^4) +
T.a6('N2_b')./(T_ducto_entrada)).*(R_u.*T_ducto_entrada);    %Entalpía
molar de N2 burned [kJ/kmol]
    smolar_N2_e = R_u.*(T.a1('N2_b').*log(T_ducto_entrada) +
T.a2('N2_b').*T_ducto_entrada...
        + T.a3('N2_b')/2.*(T_ducto_entrada.^2) +
T.a4('N2_b')/3.*(T_ducto_entrada.^3)...
        + T.a5('N2_b')/4.*(T_ducto_entrada.^4) + T.a7('N2_b'));
%Entropía molar de N2 burned [kJ/kmol.K]
    %Agua (H2O)
    hmolar_H2O_e = (T.a1('H2O_b') + T.a2('H2O_b')/2.*T_ducto_entrada...
        + T.a3('H2O_b')/3.*(T_ducto_entrada.^2) +
T.a4('H2O_b')/4.*(T_ducto_entrada.^3)...
        + T.a5('H2O_b')/5.*(T_ducto_entrada.^4) +
T.a6('H2O_b')./(T_ducto_entrada)).*(R_u.*T_ducto_entrada);    %Entalpía
molar de H2O burned [kJ/kmol]
    smolar_H2O_e = R_u.*(T.a1('H2O_b').*log(T_ducto_entrada) +
T.a2('H2O_b').*T_ducto_entrada...
        + T.a3('H2O_b')/2.*(T_ducto_entrada.^2) +
T.a4('H2O_b')/3.*(T_ducto_entrada.^3)...
        + T.a5('H2O_b')/4.*(T_ducto_entrada.^4) +
T.a7('H2O_b'));    %Entropía molar de H2O burned [kJ/kmol.K]
else
    %Dióxido de Carbono (CO2)
    hmolar_CO2_e = (T.a1('CO2_u') + T.a2('CO2_u')/2.*T_ducto_entrada...
        + T.a3('CO2_u')/3.*(T_ducto_entrada.^2) +
T.a4('CO2_u')/4.*(T_ducto_entrada.^3)...
        + T.a5('CO2_u')/5.*(T_ducto_entrada.^4) +
T.a6('CO2_u')./(T_ducto_entrada)).*(R_u.*T_ducto_entrada);    %Entalpía
molar de CO2 unburned [kJ/kmol]
    smolar_CO2_e = R_u.*(T.a1('CO2_u').*log(T_ducto_entrada) +
T.a2('CO2_u').*T_ducto_entrada...
        + T.a3('CO2_u')/2.*(T_ducto_entrada.^2) +
T.a4('CO2_u')/3.*(T_ducto_entrada.^3)...
        + T.a5('CO2_u')/4.*(T_ducto_entrada.^4) +
T.a7('CO2_u'));    %Entropía molar de CO2 unburned [kJ/kmol.K]
    %Monóxido de Carbono (CO)
    hmolar_CO_e = (T.a1('CO_u') + T.a2('CO_u')/2.*T_ducto_entrada...
        + T.a3('CO_u')/3.*(T_ducto_entrada.^2) +
T.a4('CO_u')/4.*(T_ducto_entrada.^3)...
        + T.a5('CO_u')/5.*(T_ducto_entrada.^4) +
T.a6('CO_u')./(T_ducto_entrada)).*(R_u.*T_ducto_entrada);    %Entalpía
molar de CO unburned [kJ/kmol]
    smolar_CO_e = R_u.*(T.a1('CO_u').*log(T_ducto_entrada) +
T.a2('CO_u').*T_ducto_entrada...
        + T.a3('CO_u')/2.*(T_ducto_entrada.^2) +
T.a4('CO_u')/3.*(T_ducto_entrada.^3)...
        + T.a5('CO_u')/4.*(T_ducto_entrada.^4) + T.a7('CO_u'));
%Entropía molar de CO unburned [kJ/kmol.K]
    %Oxígeno (O2)
    hmolar_O2_e = (T.a1('O2_u') + T.a2('O2_u')/2.*T_ducto_entrada...
        + T.a3('O2_u')/3.*(T_ducto_entrada.^2) +
T.a4('O2_u')/4.*(T_ducto_entrada.^3)...
        + T.a5('O2_u')/5.*(T_ducto_entrada.^4) +
T.a6('O2_u')./(T_ducto_entrada)).*(R_u.*T_ducto_entrada);    %Entalpía
molar de O2 unburned [kJ/kmol]
    smolar_O2_e = R_u.*(T.a1('O2_u').*log(T_ducto_entrada) +
T.a2('O2_u').*T_ducto_entrada...

```

```

        + T.a3('O2_u')/2.*(T_ducto_entrada.^2) +
T.a4('O2_u')/3.*(T_ducto_entrada.^3)...
        + T.a5('O2_u')/4.*(T_ducto_entrada.^4) + T.a7('O2_u'));
%Entropía molar de O2 unburned [kJ/kmol.K]
%Nitrógeno (N2)
hmolar_N2_e = (T.a1('N2_u') + T.a2('N2_u')/2.*T_ducto_entrada...
+ T.a3('N2_u')/3.*(T_ducto_entrada.^2) +
T.a4('N2_u')/4.*(T_ducto_entrada.^3)...
+ T.a5('N2_u')/5.*(T_ducto_entrada.^4) +
T.a6('N2_u')./(T_ducto_entrada)).*(R_u.*T_ducto_entrada); %Entalpía
molar de N2 unburned [kJ/kmol]
smolar_N2_e = R_u.*(T.a1('N2_u').*log(T_ducto_entrada) +
T.a2('N2_u').*T_ducto_entrada...
+ T.a3('N2_u')/2.*(T_ducto_entrada.^2) +
T.a4('N2_u')/3.*(T_ducto_entrada.^3)...
+ T.a5('N2_u')/4.*(T_ducto_entrada.^4) + T.a7('N2_u'));
%Entropía molar de N2 unburned [kJ/kmol.K]
%Agua (H2O)
hmolar_H2O_e = (T.a1('H2O_u') + T.a2('H2O_u')/2.*T_ducto_entrada...
+ T.a3('H2O_u')/3.*(T_ducto_entrada.^2) +
T.a4('H2O_u')/4.*(T_ducto_entrada.^3)...
+ T.a5('H2O_u')/5.*(T_ducto_entrada.^4) +
T.a6('H2O_u')./(T_ducto_entrada)).*(R_u.*T_ducto_entrada); %Entalpía
molar de H2O unburned [kJ/kmol]
smolar_H2O_e = R_u.*(T.a1('H2O_u').*log(T_ducto_entrada) +
T.a2('H2O_u').*T_ducto_entrada...
+ T.a3('H2O_u')/2.*(T_ducto_entrada.^2) +
T.a4('H2O_u')/3.*(T_ducto_entrada.^3)...
+ T.a5('H2O_u')/4.*(T_ducto_entrada.^4) +
T.a7('H2O_u')); %Entropía molar de H2O unburned [kJ/kmol.K]
end

%En la SALIDA del Ducto de Humos...
if T_ducto_salida>1000
%Dióxido de Carbono (CO2)
hmolar_CO2_s = (T.a1('CO2_b') + T.a2('CO2_b')/2.*T_ducto_salida...
+ T.a3('CO2_b')/3.*(T_ducto_salida.^2) +
T.a4('CO2_b')/4.*(T_ducto_salida.^3)...
+ T.a5('CO2_b')/5.*(T_ducto_salida.^4) +
T.a6('CO2_b')./(T_ducto_salida)).*(R_u.*T_ducto_salida); %Entalpía molar
de CO2 burned [kJ/kmol]
smolar_CO2_s = R_u.*(T.a1('CO2_b').*log(T_ducto_salida) +
T.a2('CO2_b').*T_ducto_salida...
+ T.a3('CO2_b')/2.*(T_ducto_salida.^2) +
T.a4('CO2_b')/3.*(T_ducto_salida.^3)...
+ T.a5('CO2_b')/4.*(T_ducto_salida.^4) + T.a7('CO2_b'));
%Entropía molar de CO2 burned [kJ/kmol.K]
%Monóxido de Carbono (CO)
hmolar_CO_s = (T.a1('CO_b') + T.a2('CO_b')/2.*T_ducto_salida...
+ T.a3('CO_b')/3.*(T_ducto_salida.^2) +
T.a4('CO_b')/4.*(T_ducto_salida.^3)...
+ T.a5('CO_b')/5.*(T_ducto_salida.^4) +
T.a6('CO_b')./(T_ducto_salida)).*(R_u.*T_ducto_salida); %Entalpía
molar de CO burned [kJ/kmol]
smolar_CO_s = R_u.*(T.a1('CO_b').*log(T_ducto_salida) +
T.a2('CO_b').*T_ducto_salida...
+ T.a3('CO_b')/2.*(T_ducto_salida.^2) +
T.a4('CO_b')/3.*(T_ducto_salida.^3)...
+ T.a5('CO_b')/4.*(T_ducto_salida.^4) + T.a7('CO_b'));
%Entropía molar de CO burned [kJ/kmol.K]
%Oxígeno (O2)

```

```

    hmolar_O2_s = (T.a1('O2_b') + T.a2('O2_b')/2.*T_ducto_salida...
        + T.a3('O2_b')/3.*(T_ducto_salida.^2) +
T.a4('O2_b')/4.*(T_ducto_salida.^3)...
        + T.a5('O2_b')/5.*(T_ducto_salida.^4) +
T.a6('O2_b')./(T_ducto_salida)).*(R_u.*T_ducto_salida);    %Entalpía
molar de O2 burned [kJ/kmol]
    smolar_O2_s = R_u.*(T.a1('O2_b').*log(T_ducto_salida) +
T.a2('O2_b').*T_ducto_salida...
        + T.a3('O2_b')/2.*(T_ducto_salida.^2) +
T.a4('O2_b')/3.*(T_ducto_salida.^3)...
        + T.a5('O2_b')/4.*(T_ducto_salida.^4) + T.a7('O2_b'));
%Entropía molar de O2 burned [kJ/kmol.K]
    %Nitrógeno (N2)
    hmolar_N2_s = (T.a1('N2_b') + T.a2('N2_b')/2.*T_ducto_salida...
        + T.a3('N2_b')/3.*(T_ducto_salida.^2) +
T.a4('N2_b')/4.*(T_ducto_salida.^3)...
        + T.a5('N2_b')/5.*(T_ducto_salida.^4) +
T.a6('N2_b')./(T_ducto_salida)).*(R_u.*T_ducto_salida);    %Entalpía
molar de N2 burned [kJ/kmol]
    smolar_N2_s = R_u.*(T.a1('N2_b').*log(T_ducto_salida) +
T.a2('N2_b').*T_ducto_salida...
        + T.a3('N2_b')/2.*(T_ducto_salida.^2) +
T.a4('N2_b')/3.*(T_ducto_salida.^3)...
        + T.a5('N2_b')/4.*(T_ducto_salida.^4) + T.a7('N2_b'));
%Entropía molar de N2 burned [kJ/kmol.K]
    %Agua (H2O)
    hmolar_H2O_s = (T.a1('H2O_b') + T.a2('H2O_b')/2.*T_ducto_salida...
        + T.a3('H2O_b')/3.*(T_ducto_salida.^2) +
T.a4('H2O_b')/4.*(T_ducto_salida.^3)...
        + T.a5('H2O_b')/5.*(T_ducto_salida.^4) +
T.a6('H2O_b')./(T_ducto_salida)).*(R_u.*T_ducto_salida);    %Entalpía molar
de H2O burned [kJ/kmol]
    smolar_H2O_s = R_u.*(T.a1('H2O_b').*log(T_ducto_salida) +
T.a2('H2O_b').*T_ducto_salida...
        + T.a3('H2O_b')/2.*(T_ducto_salida.^2) +
T.a4('H2O_b')/3.*(T_ducto_salida.^3)...
        + T.a5('H2O_b')/4.*(T_ducto_salida.^4) + T.a7('H2O_b'));
%Entropía molar de H2O burned [kJ/kmol.K]
else
    %Dióxido de Carbono (CO2)
    hmolar_CO2_s = (T.a1('CO2_u') + T.a2('CO2_u')/2.*T_ducto_salida...
        + T.a3('CO2_u')/3.*(T_ducto_salida.^2) +
T.a4('CO2_u')/4.*(T_ducto_salida.^3)...
        + T.a5('CO2_u')/5.*(T_ducto_salida.^4) +
T.a6('CO2_u')./(T_ducto_salida)).*(R_u.*T_ducto_salida);    %Entalpía molar
de CO2 unburned [kJ/kmol]
    smolar_CO2_s = R_u.*(T.a1('CO2_u').*log(T_ducto_salida) +
T.a2('CO2_u').*T_ducto_salida...
        + T.a3('CO2_u')/2.*(T_ducto_salida.^2) +
T.a4('CO2_u')/3.*(T_ducto_salida.^3)...
        + T.a5('CO2_u')/4.*(T_ducto_salida.^4) + T.a7('CO2_u'));
%Entropía molar de CO2 unburned [kJ/kmol.K]
    %Monóxido de Carbono (CO)
    hmolar_CO_s = (T.a1('CO_u') + T.a2('CO_u')/2.*T_ducto_salida...
        + T.a3('CO_u')/3.*(T_ducto_salida.^2) +
T.a4('CO_u')/4.*(T_ducto_salida.^3)...
        + T.a5('CO_u')/5.*(T_ducto_salida.^4) +
T.a6('CO_u')./(T_ducto_salida)).*(R_u.*T_ducto_salida);    %Entalpía
molar de CO unburned [kJ/kmol]
    smolar_CO_s = R_u.*(T.a1('CO_u').*log(T_ducto_salida) +
T.a2('CO_u').*T_ducto_salida...

```

```

        + T.a3('CO_u')/2.*(T_ducto_salida.^2) +
T.a4('CO_u')/3.*(T_ducto_salida.^3)...
        + T.a5('CO_u')/4.*(T_ducto_salida.^4) + T.a7('CO_u'));
%Entropía molar de CO unburned [kJ/kmol.K]
%Oxígeno (O2)
hmolar_O2_s = (T.a1('O2_u') + T.a2('O2_u')/2.*T_ducto_salida...
+ T.a3('O2_u')/3.*(T_ducto_salida.^2) +
T.a4('O2_u')/4.*(T_ducto_salida.^3)...
+ T.a5('O2_u')/5.*(T_ducto_salida.^4) +
T.a6('O2_u')./(T_ducto_salida)).*(R_u.*T_ducto_salida); %Entalpía
molar de O2 unburned [kJ/kmol]
smolar_O2_s = R_u.*(T.a1('O2_u').*log(T_ducto_salida) +
T.a2('O2_u').*T_ducto_salida...
+ T.a3('O2_u')/2.*(T_ducto_salida.^2) +
T.a4('O2_u')/3.*(T_ducto_salida.^3)...
+ T.a5('O2_u')/4.*(T_ducto_salida.^4) + T.a7('O2_u'));
%Entropía molar de O2 unburned [kJ/kmol.K]
%Nitrógeno (N2)
hmolar_N2_s = (T.a1('N2_u') + T.a2('N2_u')/2.*T_ducto_salida...
+ T.a3('N2_u')/3.*(T_ducto_salida.^2) +
T.a4('N2_u')/4.*(T_ducto_salida.^3)...
+ T.a5('N2_u')/5.*(T_ducto_salida.^4) +
T.a6('N2_u')./(T_ducto_salida)).*(R_u.*T_ducto_salida); %Entalpía
molar de N2 unburned [kJ/kmol]
smolar_N2_s = R_u.*(T.a1('N2_u').*log(T_ducto_salida) +
T.a2('N2_u').*T_ducto_salida...
+ T.a3('N2_u')/2.*(T_ducto_salida.^2) +
T.a4('N2_u')/3.*(T_ducto_salida.^3)...
+ T.a5('N2_u')/4.*(T_ducto_salida.^4) + T.a7('N2_u'));
%Entropía molar de N2 unburned [kJ/kmol.K]
%Agua (H2O)
hmolar_H2O_s = (T.a1('H2O_u') + T.a2('H2O_u')/2.*T_ducto_salida...
+ T.a3('H2O_u')/3.*(T_ducto_salida.^2) +
T.a4('H2O_u')/4.*(T_ducto_salida.^3)...
+ T.a5('H2O_u')/5.*(T_ducto_salida.^4) +
T.a6('H2O_u')./(T_ducto_salida)).*(R_u.*T_ducto_salida); %Entalpía molar
de H2O unburned [kJ/kmol]
smolar_H2O_s = R_u.*(T.a1('H2O_u').*log(T_ducto_salida) +
T.a2('H2O_u').*T_ducto_salida...
+ T.a3('H2O_u')/2.*(T_ducto_salida.^2) +
T.a4('H2O_u')/3.*(T_ducto_salida.^3)...
+ T.a5('H2O_u')/4.*(T_ducto_salida.^4) + T.a7('H2O_u'));
%Entropía molar de H2O unburned [kJ/kmol.K]
end

%Delta de ENTALPÍAS entre la entrada y el ambiente [kJ/kmol.K]
Deltahmolar_CO2_e0 = hmolar_CO2_e - hmolar_CO2_0;
Deltahmolar_CO_e0 = hmolar_CO_e - hmolar_CO_0;
Deltahmolar_O2_e0 = hmolar_O2_e - hmolar_O2_0;
Deltahmolar_N2_e0 = hmolar_N2_e - hmolar_N2_0;
Deltahmolar_H2O_e0 = hmolar_H2O_e - hmolar_H2O_0;
%Delta de ENTALPÍAS entre la salida y el ambiente [kJ/kmol.K]
Deltahmolar_CO2_s0 = hmolar_CO2_s - hmolar_CO2_0;
Deltahmolar_CO_s0 = hmolar_CO_s - hmolar_CO_0;
Deltahmolar_O2_s0 = hmolar_O2_s - hmolar_O2_0;
Deltahmolar_N2_s0 = hmolar_N2_s - hmolar_N2_0;
Deltahmolar_H2O_s0 = hmolar_H2O_s - hmolar_H2O_0;
%Delta de ENTALPÍAS entre la entrada y la salida [kJ/kmol.K]
Deltahmolar_CO2_es = hmolar_CO2_e - hmolar_CO2_s;
Deltahmolar_CO_es = hmolar_CO_e - hmolar_CO_s;
Deltahmolar_O2_es = hmolar_O2_e - hmolar_O2_s;

```

```
Deltahmolar_N2_es = hmolar_N2_e - hmolar_N2_s;  
Deltahmolar_H2O_es = hmolar_H2O_e - hmolar_H2O_s;  
  
%Delta de ENTROPIAS entre la entrada y el ambiente [kJ/kmol.K]  
Deltasmolar_CO2_e0 = smolar_CO2_e - smolar_CO2_0;  
Deltasmolar_CO_e0 = smolar_CO_e - smolar_CO_0;  
Deltasmolar_O2_e0 = smolar_O2_e - smolar_O2_0;  
Deltasmolar_N2_e0 = smolar_N2_e - smolar_N2_0;  
Deltasmolar_H2O_e0 = smolar_H2O_e - smolar_H2O_0;  
%Delta de ENTROPIAS entre la salida y el ambiente [kJ/kmol.K]  
Deltasmolar_CO2_s0 = smolar_CO2_s - smolar_CO2_0;  
Deltasmolar_CO_s0 = smolar_CO_s - smolar_CO_0;  
Deltasmolar_O2_s0 = smolar_O2_s - smolar_O2_0;  
Deltasmolar_N2_s0 = smolar_N2_s - smolar_N2_0;  
Deltasmolar_H2O_s0 = smolar_H2O_s - smolar_H2O_0;  
%Delta de ENTROPIAS entre la entrada y la salida [kJ/kmol.K]  
Deltasmolar_CO2_es = smolar_CO2_e - smolar_CO2_s;  
Deltasmolar_CO_es = smolar_CO_e - smolar_CO_s;  
Deltasmolar_O2_es = smolar_O2_e - smolar_O2_s;  
Deltasmolar_N2_es = smolar_N2_e - smolar_N2_s;  
Deltasmolar_H2O_es = smolar_H2O_e - smolar_H2O_s;
```



## Anexo I

### Análisis Gravimétrico del bagazo seco

La simulación del caso de estudio incorpora un análisis gravimétrico del bagazo seco con el objetivo de poder efectuar los cálculos requeridos en el balance de entropía.

A continuación, en la Tabla I.1 se muestran las magnitudes y unidades utilizadas en el referido análisis.

**Tabla I.1 - Magnitudes utilizadas en el análisis gravimétrico del bagazo seco.**

<b>Símbolo</b>	<b>Magnitud</b>	<b>Unidades</b>
$\dot{m}_{bgh}$	Flujo másico de bagazo húmedo consumido	$\frac{\text{kg bagazo húmedo consumido}}{\text{h}}$
$\omega_{bgh,bh}$	Humedad del bagazo húmedo consumido en base húmeda	$\frac{\text{kg H}_2\text{O bagazo húmedo consumido}}{\text{kg bagazo húmedo consumido}}$
$\dot{m}_{bgs}$	Flujo másico de bagazo seco consumido	$\frac{\text{kg bagazo seco consumido}}{\text{h}}$
$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O},bgh}$	Flujo másico de agua en el bagazo húmedo consumido	$\frac{\text{kg H}_2\text{O bagazo húmedo consumido}}{\text{h}}$
$M_i$	Masa molar del elemento o compuesto i-ésimo	$\frac{\text{kg elemento/compuesto i-ésimo}}{\text{kmol elemento/compuesto i-ésimo}}$
$\dot{n}_{\text{H}_2\text{O},bgh}$	Flujo molar de agua en el bagazo húmedo consumido	$\frac{\text{kmol H}_2\text{O bagazo húmedo consumido}}{\text{h}}$
$\dot{n}_{\text{C},bgs}$	Flujo molar de C en el bagazo seco consumido	$\frac{\text{kmol C bagazo seco consumido}}{\text{h}}$
$\dot{n}_{\text{O}_2,bgs}$	Flujo molar de O <sub>2</sub> en el bagazo seco consumido	$\frac{\text{kmol O}_2 \text{ bagazo seco consumido}}{\text{h}}$
$\dot{n}_{\text{H}_2,bgs}$	Flujo molar de H <sub>2</sub> en el bagazo seco consumido	$\frac{\text{kmol H}_2 \text{ bagazo seco consumido}}{\text{h}}$
$\dot{n}_{bgs,bs}$	Flujo molar de bagazo seco consumido en base seca	$\frac{\text{kmol bagazo seco consumido}}{\text{h}}$
$m$	Número de moles de C por mol de bagazo seco consumido	$\frac{\text{kmol C bagazo seco consumido}}{\text{kmol bagazo seco consumido}}$
$r$	Número de moles de O <sub>2</sub> por mol de bagazo seco consumido	$\frac{\text{kmol O}_2 \text{ bagazo seco consumido}}{\text{kmol bagazo seco consumido}}$

$n$	Número de moles de $H_2$ por mol de bagazo seco consumido	$\frac{\text{kmol } H_2 \text{ bagazo seco consumido}}{\text{kmol bagazo seco consumido}}$
$(\tilde{n}_{H_2O,bgh})_{bs}$	Número de moles de agua en el bagazo húmedo consumido por mol de bagazo seco consumido	$\frac{\text{kmol } H_2O \text{ bagazo húmedo consumido}}{\text{kmol bagazo seco consumido}}$
$a_r$	Número de moles de $O_2$ en el aire húmedo por mol de bagazo seco consumido	$\frac{\text{kmol } O_2 \text{ aire húmedo}}{\text{kmol bagazo seco consumido}}$
$\tilde{n}_{H_2O,ah}$	Número de moles de agua en el aire húmedo por mol de bagazo seco consumido	$\frac{\text{kmol } H_2O \text{ aire húmedo}}{\text{kmol bagazo seco consumido}}$
$\tilde{n}_{g,bs}$	Número de moles de gases de combustión en base seca por mol de bagazo seco consumido	$\frac{\text{kmol gases combustión base seca}}{\text{kmol bagazo seco consumido}}$
$\tilde{x}_{i,bs}$	Fracción molar del componente i-ésimo en base seca	$\frac{\text{kmol componente i-ésimo base seca}}{\text{kmol gases combustión}}$
$\tilde{n}_{H_2O,g}$	Número de moles de agua en gases de combustión por mol de bagazo seco consumido	$\frac{\text{kmol } H_2O \text{ gases combustión}}{\text{kmol bagazo seco consumido}}$
$\tilde{n}_{CO_2}$	Número de moles de $CO_2$ en los gases de combustión por mol de bagazo seco consumido	$\frac{\text{kmol } CO_2 \text{ gases combustión}}{\text{kmol bagazo seco consumido}}$
$\tilde{n}_{CO}$	Número de moles de $CO$ en los gases de combustión por mol de bagazo seco consumido	$\frac{\text{kmol } CO \text{ gases combustión}}{\text{kmol bagazo seco consumido}}$
$\tilde{n}_{O_2}$	Número de moles de $O_2$ en los gases de combustión por mol de bagazo seco consumido	$\frac{\text{kmol } O_2 \text{ gases combustión}}{\text{kmol bagazo seco consumido}}$
$\tilde{n}_{N_2}$	Número de moles de $N_2$ en los gases de combustión por mol de bagazo seco consumido	$\frac{\text{kmol } N_2 \text{ gases combustión}}{\text{kmol bagazo seco consumido}}$
$\dot{n}_{O_2,ah}$	Flujo molar de $O_2$ en el aire húmedo	$\frac{\text{kmol } O_2 \text{ aire húmedo}}{h}$
$\dot{n}_{N_2,ah}$	Flujo molar de $N_2$ en el aire húmedo	$\frac{\text{kmol } N_2 \text{ aire húmedo}}{h}$
$\dot{n}_{H_2O,ah}$	Flujo molar de $H_2O$ en el aire húmedo	$\frac{\text{kmol } H_2O \text{ aire húmedo}}{h}$
$\dot{n}_{CO_2}$	Flujo molar de $CO_2$ en los gases de combustión	$\frac{\text{kmol } CO_2 \text{ gases combustión}}{h}$
$\dot{n}_{CO}$	Flujo molar de $CO$ en los gases de combustión	$\frac{\text{kmol } CO \text{ gases combustión}}{h}$
$\dot{n}_{O_2}$	Flujo molar de $O_2$ en los gases de combustión	$\frac{\text{kmol } O_2 \text{ gases combustión}}{h}$
$\dot{n}_{N_2}$	Flujo molar de $N_2$ en los gases de combustión	$\frac{\text{kmol } N_2 \text{ gases combustión}}{h}$
$\dot{n}_{H_2O,g}$	Flujo molar de $H_2O$ en los gases de combustión	$\frac{\text{kmol } H_2O \text{ gases combustión}}{h}$

Fuente: Elaboración propia.

El bagazo seco, según literatura colombiana, tiene la siguiente composición promedio:

$$C = 47\%; \quad O_2 = 44\%; \quad H_2 = 6.5\%; \quad Ceniza = 2.5\% \quad (I.1)$$

Con el flujo másico de bagazo húmedo consumido ( $\dot{m}_{bgh}$ ) y la humedad del bagazo húmedo consumido en base húmeda ( $\omega_{bgh,bh}$ ) como datos obtenidos de las mediciones experimentales, se pueden calcular las siguientes magnitudes:

$$\dot{m}_{bgs} = \dot{m}_{bgh} \left( 1 - \frac{\omega_{bgh,bh}}{100} \right) \quad (I.2)$$

$$\dot{m}_{H_2O,bgh} = \dot{m}_{bgh} - \dot{m}_{bgs} \quad (I.3)$$

Donde ( $\dot{m}_{bgs}$ ) es el flujo másico de bagazo seco consumido y ( $\dot{m}_{H_2O,bgh}$ ) es el flujo másico de agua en el bagazo húmedo consumido. De este modo, se calcula el flujo molar de agua en el bagazo húmedo consumido con la siguiente expresión:

$$\dot{n}_{H_2O,bgh} = \frac{\dot{m}_{H_2O,bgh}}{M_{H_2O}} \quad (I.4)$$

Luego se hallan los flujos molares de C, O<sub>2</sub> y H<sub>2</sub> en el bagazo seco consumido con el fin de obtener el flujo molar de bagazo seco consumido en base seca.

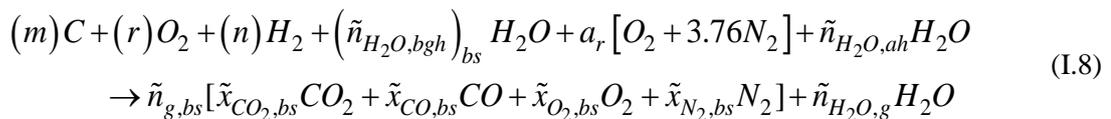
$$\dot{n}_{C,bgs} = \frac{\dot{m}_{bgs} \left( \frac{C}{100} \right)}{M_C}; \quad \dot{n}_{O_2,bgs} = \frac{\dot{m}_{bgs} \left( \frac{O_2}{100} \right)}{M_{O_2}}; \quad \dot{n}_{H_2,bgs} = \frac{\dot{m}_{bgs} \left( \frac{H_2}{100} \right)}{M_{H_2}} \quad (I.5)$$

$$\dot{n}_{bgs,bs} = \dot{n}_{C,bgs} + \dot{n}_{O_2,bgs} + \dot{n}_{H_2,bgs} \quad (I.6)$$

A continuación, se definen las siguientes magnitudes:

$$m = \frac{\dot{n}_{C,bgs}}{\dot{n}_{bgs,bs}} \quad r = \frac{\dot{n}_{O_2,bgs}}{\dot{n}_{bgs,bs}} \quad n = \frac{\dot{n}_{H_2,bgs}}{\dot{n}_{bgs,bs}} \quad \left( \tilde{n}_{H_2O,bgh} \right)_{bs} = \frac{\dot{n}_{H_2O,bgh}}{\dot{n}_{bgs,bs}} \quad (I.7)$$

La ecuación química para la combustión incompleta con exceso de aire húmedo y bagazo húmedo se expresa de la siguiente manera:



Se cuenta con cuatro relaciones lineales correspondientes a la conservación atómica de la reacción química:

- Balance de C:

$$m = \tilde{n}_{g,bs} (\tilde{x}_{CO_2,bs} + \tilde{x}_{CO,bs}) \quad (I.9)$$

- Balance de H:

$$2 \times n + 2 \left( \tilde{n}_{H_2O,bgh} \right)_{bs} + 2 \times \tilde{n}_{H_2O,ah} = 2 \times \tilde{n}_{H_2O,g} \quad (I.10)$$

- Balance de O:

$$2 \times r + \left( \tilde{n}_{H_2O,bgh} \right)_{bs} + 2 \times a_r + \tilde{n}_{H_2O,ah} = \tilde{n}_{g,bs} \left( 2 \times \tilde{x}_{CO_2,bs} + \tilde{x}_{CO,bs} + 2 \times \tilde{x}_{O_2,bs} \right) + \tilde{n}_{H_2O,g} \quad (I.11)$$

- Balance de N:

$$2 \times (3.76 \times a_r) = \tilde{n}_{g,bs} \left( 2 \times \tilde{x}_{N_2,bs} \right) \quad (I.12)$$

Como se observa, se cuenta con cuatro ecuaciones lineales para hallar las tres incógnitas que el problema plantea ( $a_r$ ,  $\tilde{n}_{g,bs}$  y  $\tilde{n}_{H_2O,g}$ ). En este sentido, la ecuación del *Balance de O* se puede utilizar para comprobar la solución.

Después de hallar las incógnitas de la ecuación química, se procede a calcular el número de moles de cada uno de los productos en los gases de combustión:

$$\tilde{n}_{CO_2} = \tilde{n}_{g,bs} \cdot \tilde{x}_{CO_2,bs} \quad (I.13)$$

$$\tilde{n}_{CO} = \tilde{n}_{g,bs} \cdot \tilde{x}_{CO,bs} \quad (I.14)$$

$$\tilde{n}_{O_2} = \tilde{n}_{g,bs} \cdot \tilde{x}_{O_2,bs} \quad (I.15)$$

$$\tilde{n}_{N_2} = \tilde{n}_{g,bs} \cdot \tilde{x}_{N_2,bs} \quad (I.16)$$

$$\tilde{n}_{H_2O,g} = n + \left( \tilde{n}_{H_2O,bgh} \right)_{bs} + \tilde{n}_{H_2O,ah} \quad (I.17)$$

Por último se calculan los flujos molares de todos los elementos y compuestos restantes en la reacción química pues se utilizarán en las posteriores operaciones del análisis termodinámico.

$$\begin{aligned} \dot{n}_{O_2,ah} &= \dot{n}_{bgs,bs} (a_r) & \dot{n}_{CO_2} &= \dot{n}_{bgs,bs} (\tilde{n}_{CO_2}) \\ \dot{n}_{N_2,ah} &= \dot{n}_{bgs,bs} (3.76 \times a_r) & \dot{n}_{CO} &= \dot{n}_{bgs,bs} (\tilde{n}_{CO}) \\ \dot{n}_{H_2O,ah} &= \dot{n}_{bgs,bs} (\tilde{n}_{H_2O,ah}) & \dot{n}_{O_2} &= \dot{n}_{bgs,bs} (\tilde{n}_{O_2}) \\ & & \dot{n}_{N_2} &= \dot{n}_{bgs,bs} (\tilde{n}_{N_2}) \\ & & \dot{n}_{H_2O,g} &= \dot{n}_{bgs,bs} (\tilde{n}_{H_2O,g}) \end{aligned} \quad (I.18)$$