



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN Y TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

MAESTRIA EN ENERGÍAS RENOVABLES III PROMOCIÓN

TESIS DE GRADO MAESTRÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES

TEMA:

“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO ENERGÉTICO Y MEJORA EN EL RENDIMIENTO DE UN BIOCALEFÓN DE APLICACIÓN MÚLTIPLE POR COMBUSTIÓN DE BIOMASA SECA”

**Autores:** Ing. Luis S. Chiliquina C,  
Ing. Mario P. Jiménez L.

**Director:** Ing. José Guasumba C, Msc.

**Oponente:** Ing. Luis Carrión, Msc.

Sangolquí, Abril 2015



# CONTENIDO

2

- JUSTIFICACIÓN
- OBJETIVOS
- FUNDAMENTO TEÓRICO
- CARACTERÍSTICAS BIOCALEFÓN
- DESARROLLO EXPERIMENTAL
- RESULTADOS OBTENIDOS Y ANÁLISIS
- CONCLUSIONES
- RECOMENDACIONES



# JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

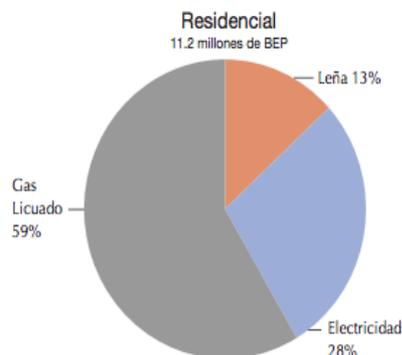
3

El desarrollo de la investigación permitirá mejorar los procesos de obtención de ACS y secado de granos empleando leña de eucalipto y pino.

En el Ecuador actualmente se utiliza calefones que funcionan con GLP, para obtener agua caliente sanitaria.

El consumo de leña a nivel residencial corresponde al 13% y es utilizada para la cocción de alimentos en el sector rural.

Con el equipo experimental puesto a punto y con los resultados obtenidos en esta investigación se dispondrá de unidad didáctica para el laboratorio de Energías Renovables y será soporte para iniciar nuevas investigaciones.



# OBJETIVOS

4

Analizar el estado del arte sobre los sistemas energéticos desarrollados para la obtención de agua caliente sanitaria y secado, mediante procesos de combustión directa de biomasa seca

Analizar el rendimiento energético del sistema de combustión de biomasa, variando el contenido de humedad de la leña de pino y eucalipto y medir las emisiones de CO.

## GENERAL

**Optimizar y mejorar la eficiencia del proceso térmico en los biocalefones con calentamiento indirecto de aire de proceso, mediante el estudio y aprovechamiento óptimo de las características energéticas de la biomasa seca de eucalipto y pino.**

Realizar el levantamiento técnico y funcional del biocalefón donado por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, a la comuna de Ozogoché Alto.

Proporcionar un biocalefón optimizado experimental multiuso para calentamiento de agua de uso sanitario y secador de productos agrícolas, para que sea usado en el desarrollo de futuras investigaciones .





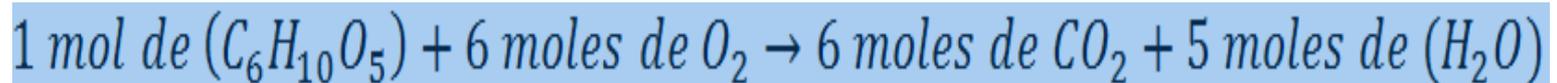
# FUNDAMENTO TEÓRICO

6

## REACCIÓN QUÍMICA FUNDAMENTAL DE LA COMBUSTIÓN DE MADERA

El método más primitivo de aprovechamiento de la energía contenida en la biomasa vegetal es su combustión directa. La combustión es una reacción de oxidación en la que interviene el oxígeno como agente oxidante

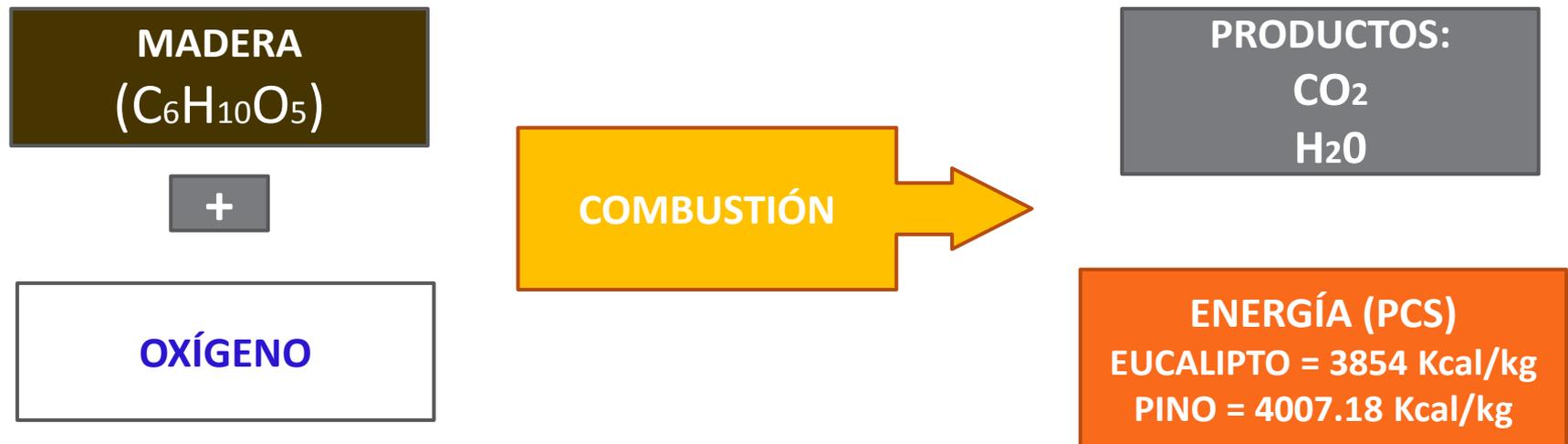
La madera en su mayor parte es celulosa. La combustión de madera sería por tanto combustión de celulosa y la reacción molecular de la misma -estequiométricamente ajustada- podría llamarse **“Reacción química fundamental de la combustión de madera”**:



# FUNDAMENTO TEÓRICO

7

## DESCOMPOSICIÓN TÉRMICA DE LA MADERA.



# FUNDAMENTO TEÓRICO

8

## PODER CALORÍFICO SUPERIOR E INFERIOR

El poder calorífico es la cantidad de energía por unidad de masa que un combustible desprende al quemarse, normalmente se expresa en Kcal/Kg. EL PCS se calcula con buena aproximación por Dulong.

$$P.C.S = \frac{8100 \%C + 34000 \left( \%H - \frac{\%O}{8} \right) + 2500 \%S}{100} \left[ \frac{Kcal}{Kg} \right]$$

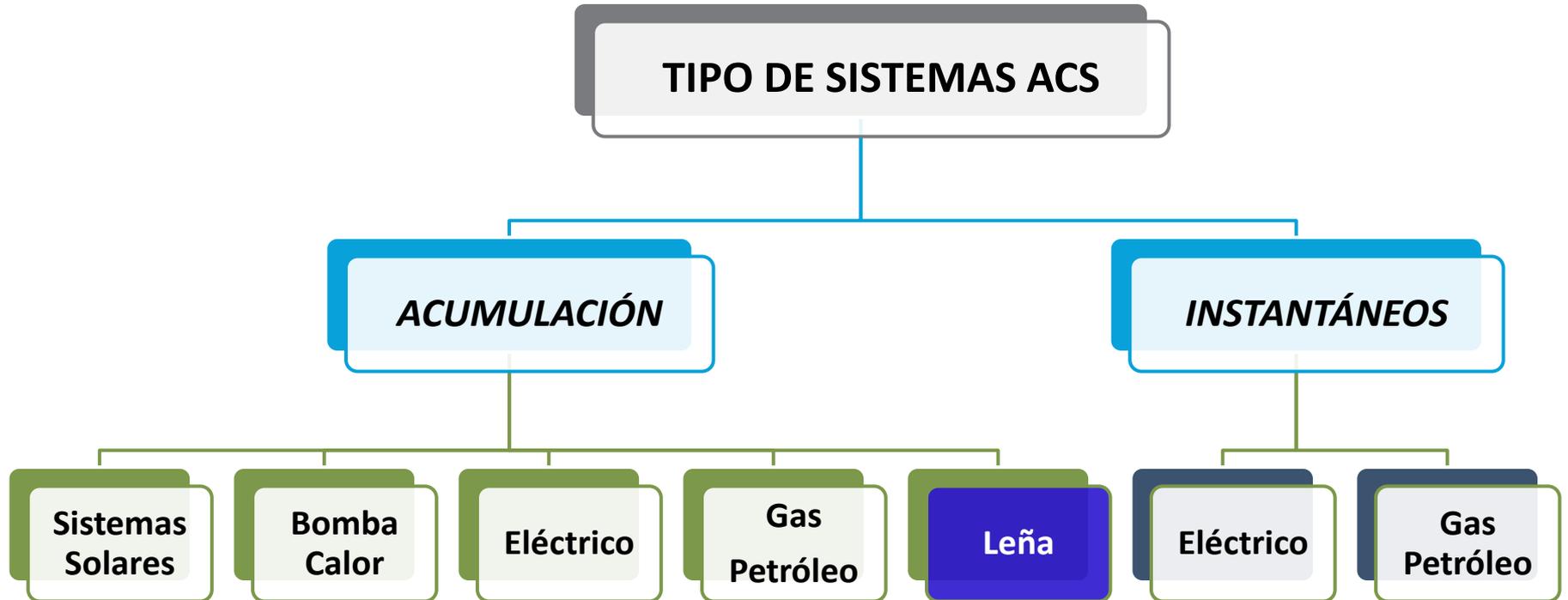
El P.C.I es el P.C.S. menos el calor latente de vaporización de la cantidad de agua condensada.

$$PCI = PCS - 597 (9H + H_2O)$$



# FUNDAMENTO TEÓRICO

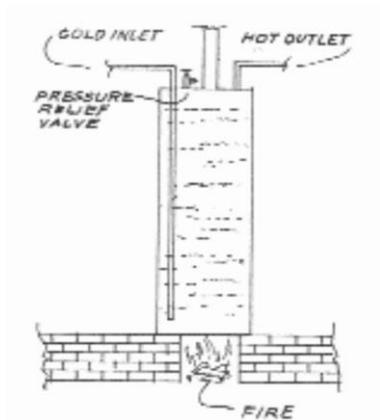
9



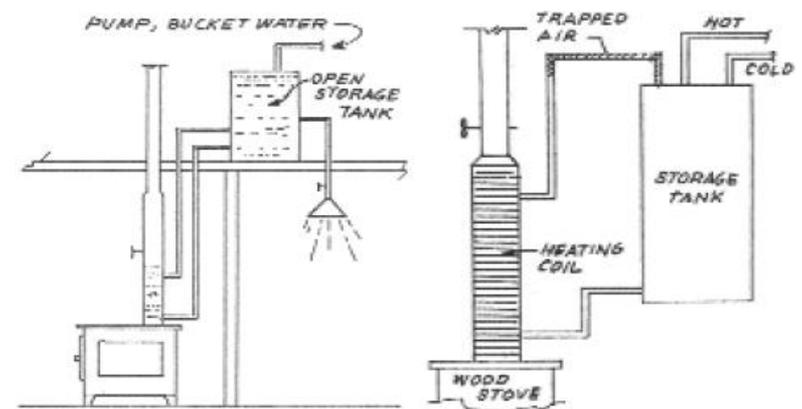
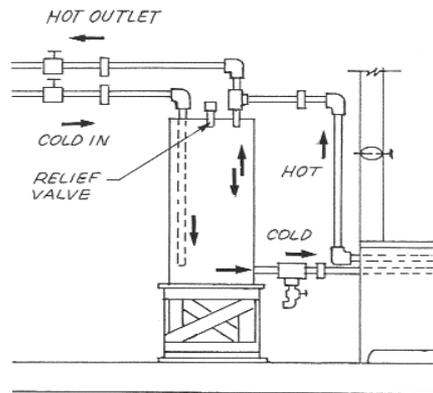
# FUNDAMENTO TEÓRICO

10

## SISTEMAS DE CALENTAMIENTO DE AGUA CON LEÑA



CALENTAMIENTO  
DIRECTO

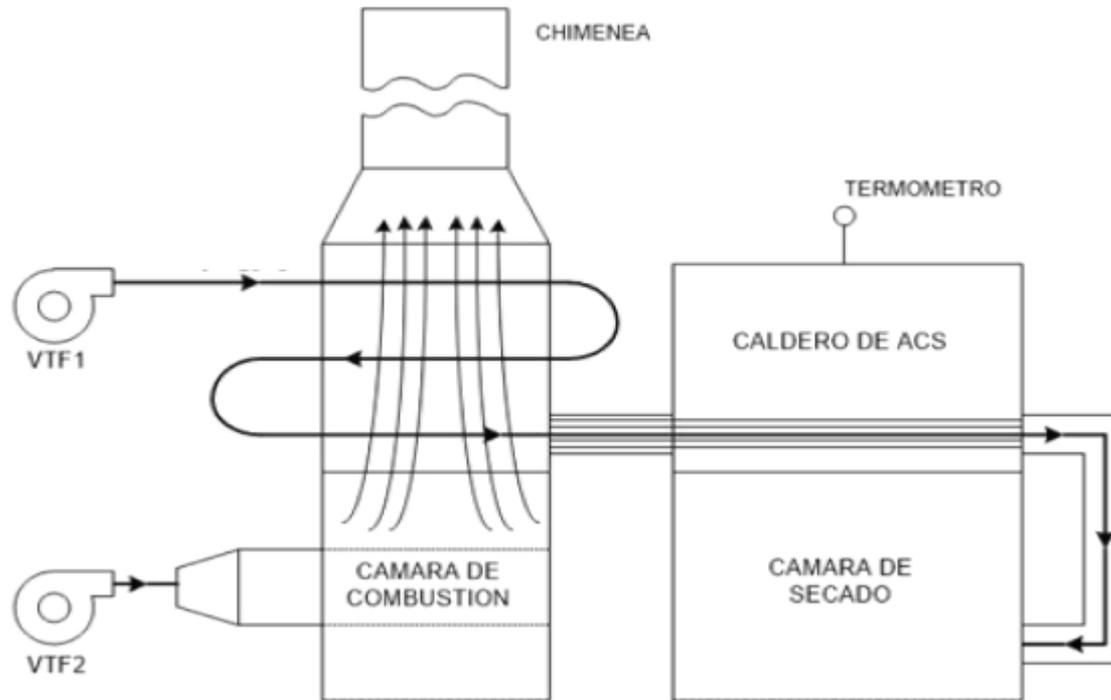


CALENTAMIENTO  
INDIRECTO

# FUNDAMENTO TEÓRICO

11

## SISTEMAS DE CALENTAMIENTO DE AGUA CON LEÑA



BIOCALEFON EN ESTUDIO



# FUNDAMENTO TEÓRICO

12

## TECNOLOGIA DEL SECADO

Los granos, como es bien conocido, no pueden conservarse almacenados si no están secos. Como término general, para los cereales, una humedad del 15% se considera el límite para estimarlo como "seco".

La medición de la humedad del grano se fija sobre la llamada "base húmeda", es decir, la cantidad de agua que tiene el grano en total.

El peso del agua a evaporar se determina mediante la siguiente ecuación:

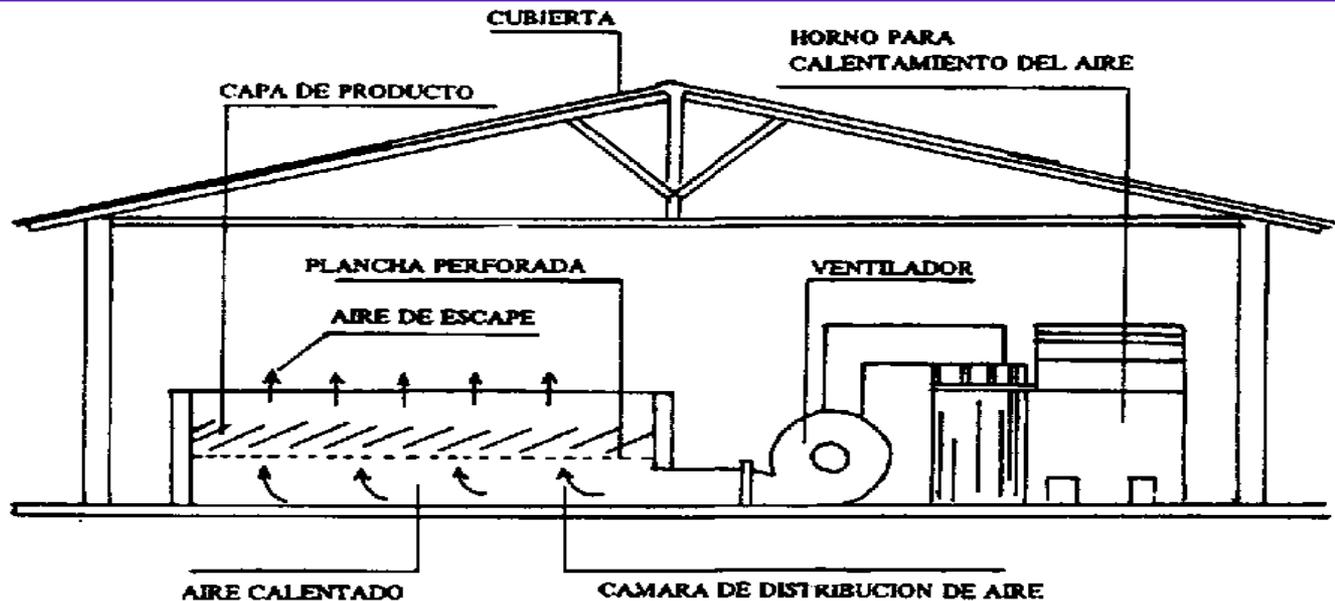
$$\text{Peso agua evaporada} = \frac{h_{\text{inicial}} - h_{\text{final}}}{100 - h_{\text{final}}} (P_h)$$



# FUNDAMENTO TEÓRICO

13

## SISTEMAS DE CALENTAMIENTO DE AGUA CON LEÑA



**SECADORA HORIZONTAL DE CAPA ESTÁTICA**

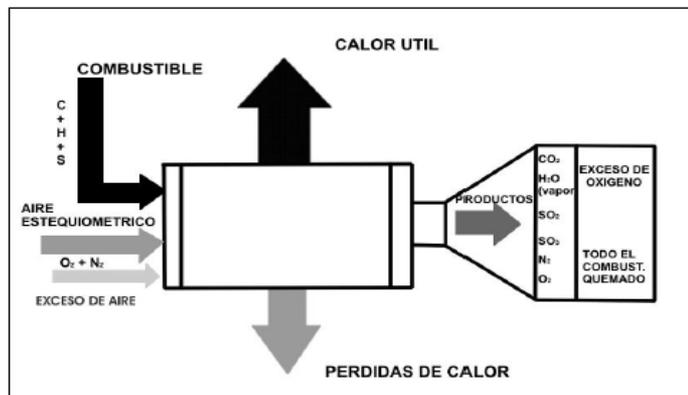


# FUNDAMENTO TEÓRICO

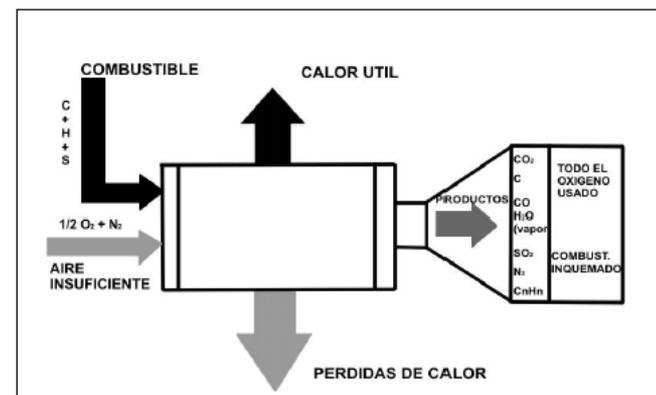
14

## EMISIONES DE CO

El monóxido de carbono resulta de la combustión incompleta de combustible a base de carbón. El CO es un gas peligroso para la salud de las personas y reduce el calor aprovechable del carbono.



**COMBUSTIÓN  
COMPLETA**



**COMBUSTIÓN  
INCOMPLETA**

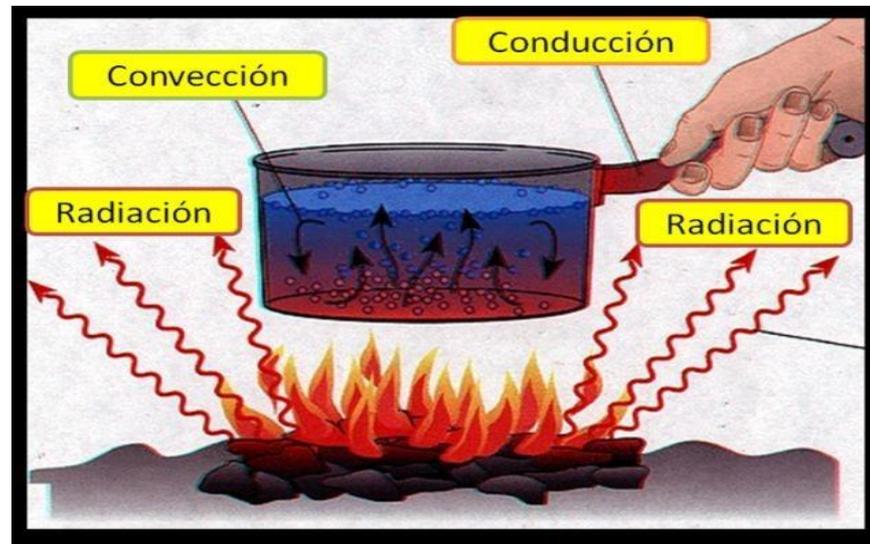


# FUNDAMENTO TEÓRICO

15

## TRANSFERENCIA DE CALOR

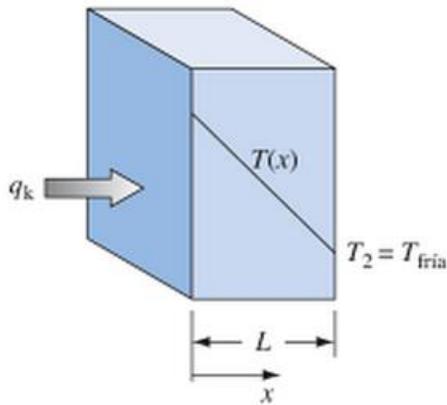
Hay tres procesos básicos de la transferencia de calor: la conducción, convección y radiación. En la mayoría de los problemas de importancia práctica dos o a veces todos estos modos pueden darse simultáneamente.



# FUNDAMENTO TEÓRICO

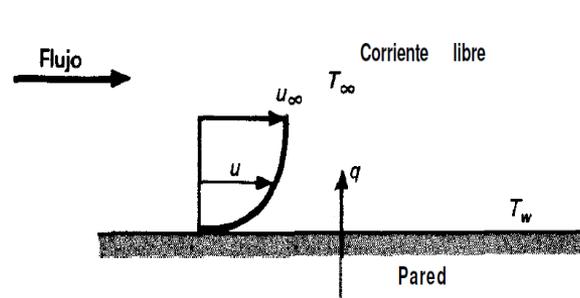
16

## TRANSFERENCIA DE CALOR



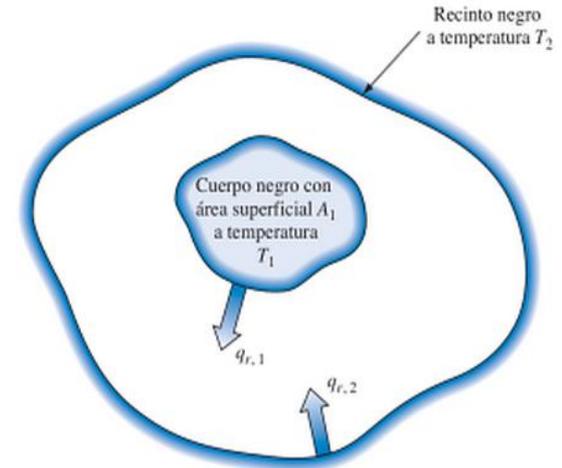
$$q_k = \frac{A k}{L} (T_{caliente} - T_{fria})$$

CONDUCCIÓN



$$q = hA(T_w - T_\infty)$$

CONVECCIÓN



$$q_r = \sigma A(T_1^4 - T_2^4)$$

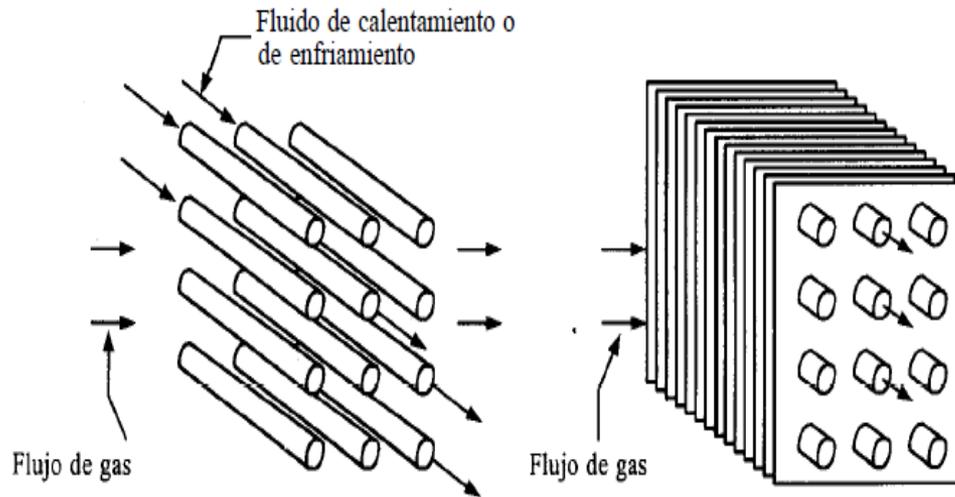
RADIACIÓN



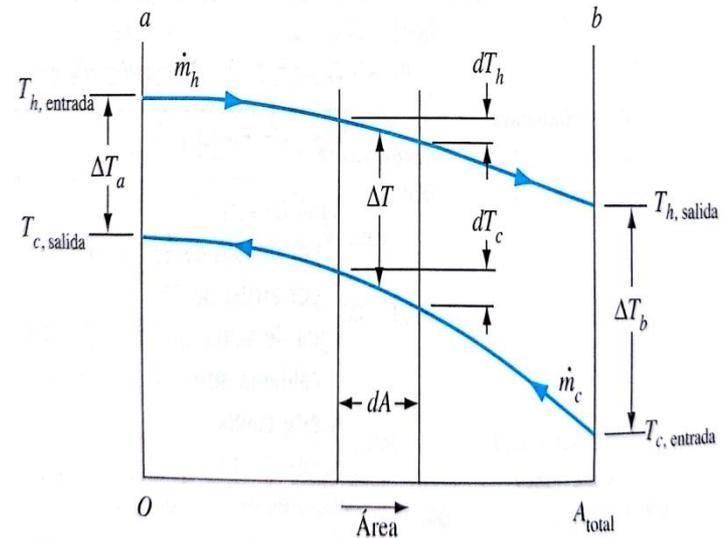
# FUNDAMENTO TEÓRICO

17

## FLUJO DE CALOR EN UN BANCO DE TUBOS



TIPOS DE  
INTERCAMBIADORES



TEMPERATURAS EN EL  
INTERCAMBIADOR



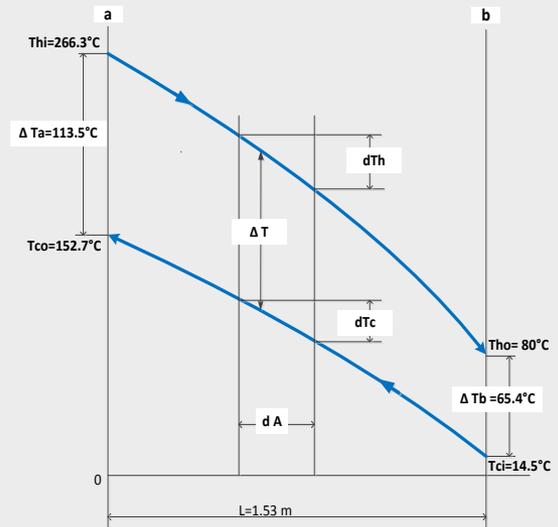
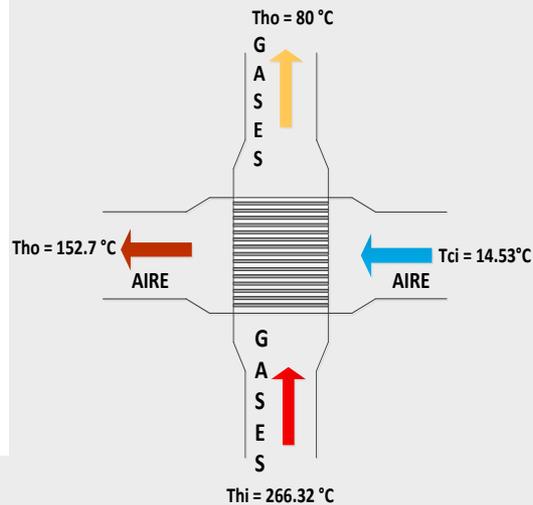
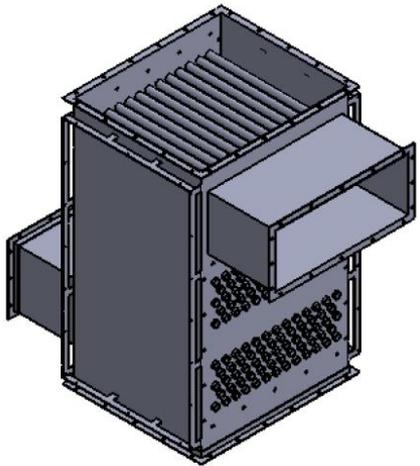
# BIOCALEFÓN

18

## INTERCAMBIADOR DE GASES-AIRE

### PARÁMETRO

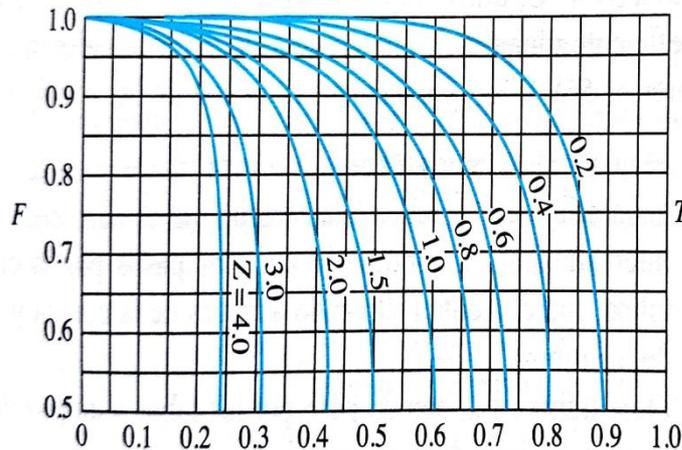
Calor transferido en el intercambiador gases-aire



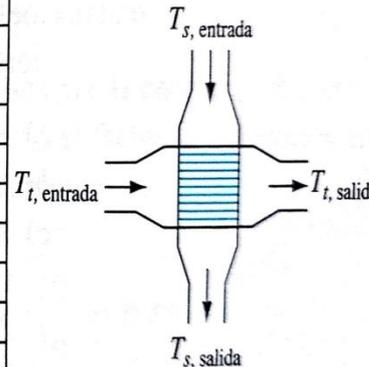
# BIOCALEFÓN

19

## FLUJO DE CALOR EN UN BANCO DE TUBOS



$$P = \frac{T_{t, \text{salida}} - T_{t, \text{entrada}}}{T_{s, \text{entrada}} - T_{t, \text{entrada}}}$$



$$q = U \cdot A \cdot N \cdot F \cdot (\Delta T_{ml})$$

$$\overline{\Delta T} = \frac{\Delta T_a - \Delta T_b}{\ln(\Delta T_a / \Delta T_b)}$$

$$\Delta T_a = Th_i - Tc_o$$

$$\Delta T_b = Th_o - Tc_i$$

$$P = \frac{Tc_o - Tc_i}{Th_i - Tc_i}$$

$$Z = \frac{Th_i - Th_o}{Tc_o - Tc_i}$$

**FACTOR DE CORRECCION PARA LMTD  
FLUIDO MEZCLADO**

**DETERMINACIÓN DE F**



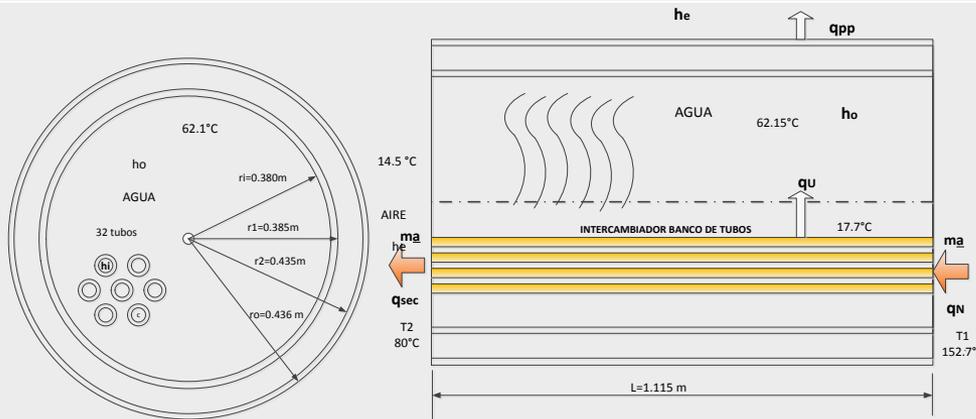
# BIOCALEFÓN

20

## INTERACUMULADOR

### PARÁMETRO

Flujo de calor para el calentamiento del agua

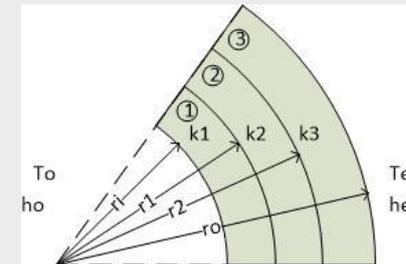


Pérdidas en el interacumulador

### ECUACIÓN

$$q_{H_2O} = \dot{m}_{H_2O} C_{p_{H_2O}} (T_2 - T_1)$$

$$Gr_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L_C^3}{\gamma^2}$$



$$U = \frac{1}{\frac{r_o}{r_1 h_o} + \frac{r_o \ln(\frac{r_1}{r_i})}{k_{ace}} + \frac{r_o \ln(\frac{r_2}{r_1})}{k_{ais}} + \frac{r_o \ln(\frac{r_0}{r_2})}{k_{ace}} + \frac{1}{h_e}}$$



# BIOCALEFÓN

21

## SECADORA DE GRANOS

Calor que ingresa a la secadora de grano:

$$q_{sec} = \dot{m}_{aire} C_{p_{aire}} \Delta T$$

Calor que se pierde por las paredes de la secadora:

$$q_{ps} = U \cdot A \cdot \Delta T$$

$$U_0 = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{e_a}{k_a} + \frac{1}{h_o}}$$

Agua ( $M_{H_2O}$ ) evaporada :

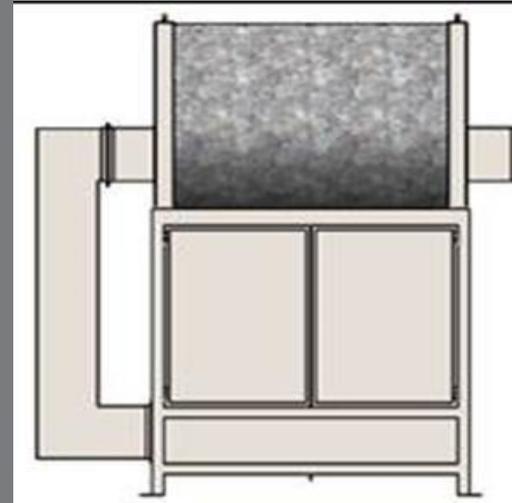
$$\text{Peso agua evaporada} = \frac{h_{inicial} - h_{final}}{100 - h_{final}} (M_{prod})$$

Peso de producto a secar:

$$q_{us} = \frac{M_{prod}}{t_{sec}} \cdot C_{p_{prod}} \cdot (T_2 - T_1) + \frac{M_{H_2O} \times 540}{t_{sec}}$$

Eficiencia secadora:

$$\text{Eficiencia (\%)} = \frac{T_{as} - T_{au}}{T_{as} - T_{aa}} 100$$



# DESARROLLO EXPERIMENTAL

22

## OPTIMIZACIÓN DEL BIOCALEFÓN



ANTES



ADECUACIONES



DESPUÉS

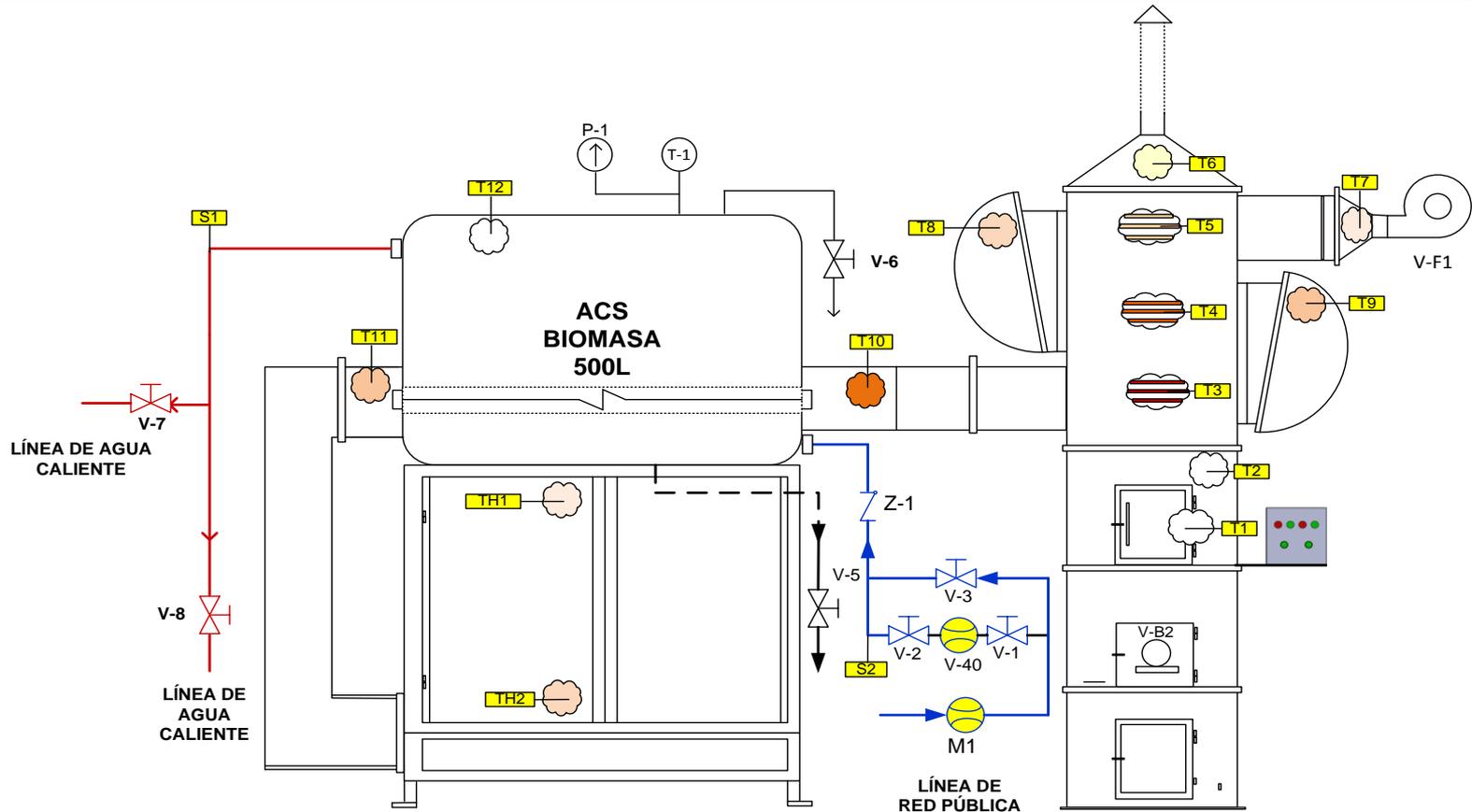


**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

# DESARROLLO EXPERIMENTAL

23

## INSTALACIÓN DE INSTRUMENTACIÓN PARA MEDICIONES



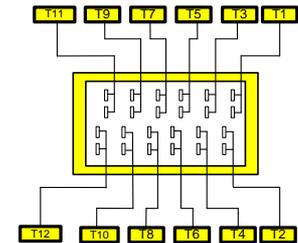
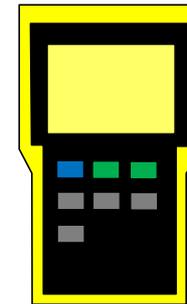
# DESARROLLO EXPERIMENTAL

24

## MEDICIÓN DE TEMPERATURAS Y TIEMPO DE CALENTAMIENTO

CANALES	DESCRIPCIÓN	TIPO
T1	Temperatura en flama o llama.	K
T2	Temperatura del Hogar.	K
T3	Temperatura de gases de combustión primera sección de tubos.	K
T4	Temperatura de gases de combustión segunda sección de tubos.	K
T5	Temperatura de gases de combustión tercera sección de tubos.	K
T6	Temperatura de salida gases.	K
T7	Temperatura del aire al ingreso a la tercera sección de tubos.	K
T8	Temperatura del aire al ingreso a la segunda sección de tubos.	K
T9	Temperatura del aire al ingreso a la primera sección de tubos.	K
T10	Temperatura del aire al ingreso del intercambiador del interacumulador de agua	K
T11	Temperatura del aire a la salida del intercambiador del interacumulador de agua.	K
T12	Temperatura de calentamiento del agua.	K

ENTRADAS DATALOGGER  
BTM 4250 SD



# DESARROLLO EXPERIMENTAL

25

## CARACTERIZACIÓN DE BIOMASA (EUCALIPTO Y PINO)

Características*	PINO						EUCALIPTO						MÉTODO
	M1	M2	M3	M4	M5	PROMEDIO	M1	M2	M3	M4	M5	PROMEDIO	
<b>Análisis elemental:</b>													
C (%)	50.69	52.08	51.58	50.87	52.75	51.59	36.86	50.41	50.66	45.97	52.62	47.30	BS EN 15104:2011
N (%)	0.11	0.03	0.02	0.04	0.06	0.05	0.10	0.09	0.07	0.05	0.04	0.07	BS EN 15104:2012
H (%)	6.76	6.47	5.93	6.49	5.29	6.19	6.69	5.27	5.34	5.93	4.93	5.63	BS EN 15104:2013
S (%)	0.11	0.60	0.63	0.04	0.62	0.40	0.55	0.73	0.60	0.68	0.64	0.64	BS EN 15104:2014
O (%)	42.33	40.82	41.84	42.56	41.28	41.77	55.80	43.50	43.33	47.37	41.77	46.35	BS EN 15104:2015
<b>Análisis proximal:</b>													
PCS Doulong (MJ/Kg)	18.89						15.85						DOULONG
PCS Ensayos (MJ/Kg)	17.77	17.64	16.50	16.33	15.53	16.75	16.65	17.74	15.45	15.91	14.78	16.11	ASTM D 1989-96
Genizas (%)	0.22	0.74	0.76	0.14	0.66	0.50	0.97	1.16	1.45	0.95	1.46	1.20	BS EN 14775:2009
Humedad (%)	44.68	42.01	49.66	54.36	52.36	48.61	52.54	52.44	51.68	51.61	51.25	51.90	Termobalanza
Material Volátil (%)	97.77	97.41	97.9	99.31	99.29	98.34	98.19	97.43	98.06	97.97	98.06	97.94	BS EN 15148:2009
Densidad aparente (Kg/m <sup>3</sup> )	140.00	150.00	110.00	100.00	100.00	120.00	130.00	120.00	140.00	140.00	150.00	136.00	BS EN 15103

\* Expresado en b



INSTITUTO NACIONAL DE EFICIENCIA ENERGÉTICA Y ENERGÍAS RENOVABLES  
LABORATORIO PARA TERMOVALORIZACIÓN DE BIOMASAS Y RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

INFORME DE ENSAYOS N° LTB-26-2014



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

# DESARROLLO EXPERIMENTAL

26

## DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD DE LA LEÑA



Muestra	CH [%]
1	12.6
2	12.6
3	12.5
4	12.4
5	13.4
6	13.4
7	12.5
8	11.6
9	11.3
10	12.7
<b>Promedio</b>	<b>12.50</b>
<b>Desviación estandar</b>	<b>0.66</b>
<b>Coefficiente de variación</b>	<b>5.29</b>
<b>Valor t</b>	<b>1.83</b>
<b>Error (%)</b>	<b>3.07</b>

MEDICIÓN CON EL  
XILOHIGRÓMETRO

# DESARROLLO EXPERIMENTAL

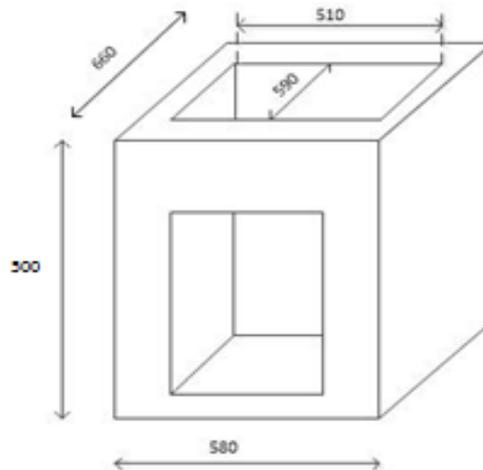
27

## DETERMINACIÓN DE FLUJO MÁSCO DE LEÑA

Potencia Térmica=Carga térmica x Volumen

$$\left(\frac{Kcal}{h}\right)_{min} = 150000 \frac{Kcal}{m^3 h} (0.15 m^3) = 22500$$

$$\left(\frac{Kcal}{h}\right)_{max} = 350000 \frac{Kcal}{m^3 h} (0.15 m^3) = 52500$$



El PCI para el eucalipto al 12.5% de humedad corresponde, **3476.1 Kcal/kg**, con este valor se determina el flujo másico de la leña de eucalipto.

$$\left(\frac{Kg}{h}\right)_{min} = \frac{27000 \frac{Kcal}{h}}{3476.1 \frac{Kcal}{kg}} = 6.41 \frac{Kg}{h}$$

$$\left(\frac{Kg}{h}\right)_{max} = \frac{52500 \frac{Kcal}{h}}{3476.1 \frac{Kcal}{kg}} = 15.1 \frac{Kg}{h}$$

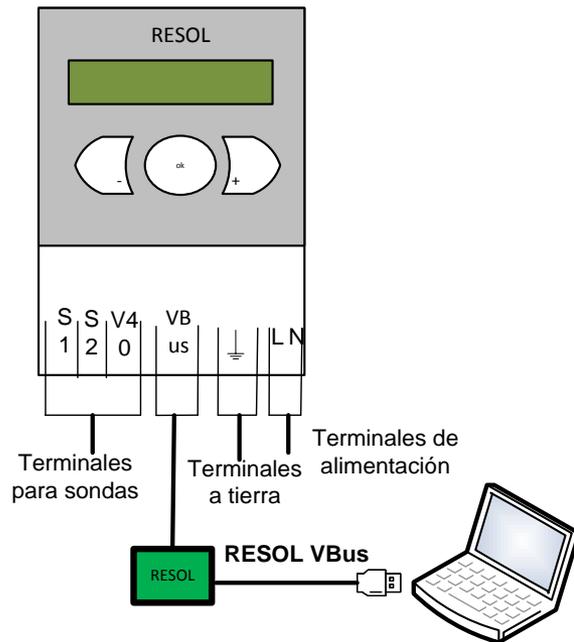


# DESARROLLO EXPERIMENTAL

28

## MEDICIÓN DE ENERGÍA TÉRMICA ACUMULADA EN EL AGUA

CALORÍMETRO WMZ



# DESARROLLO EXPERIMENTAL

29

## PRUEBAS TERMOGRÁFICAS



Editar IR000080

Paleta  
Colores:  Negro  
 Ultra-Contraste  
Saturación: Ninguno  
Alarma de color: Desactivado  
Rango: Color realístico

Mostrar marcadores  
 Punto central  
 Punto más caliente  
 Punto más frío  
Eliminar todos los marcadores

Emisividad: 0.95  
Temperatura de fondo: 20.0 °C  
Corrección de transmisión: 100 %

210.0 °C  
100.0 °C  
32.1 °C

Ajuste automático de Nivel y Rango

Información de la imagen  
Ubicación del: C:\Nuevo Menu\Documentos\TESIS-CAMARA...  
Hora de la im.: 06/12/2014 13:27:48  
Energía: 0.95  
Temperatura: 20.0 °C  
Rango de la: 23.7 °C a 101.0 °C  
Temperatura: 73.2 °C  
Modelo de ca.: Ruka T32  
Número de s.: 320 x 240  
Fabricante: Ruka Thermography  
Rango de cal.: 10.0 °C a 200.0 °C  
Número de s.: Ruka T32.11120.124  
Descripción d.: Edificador  
Versión DSP: 1.2.14  
Versión DCA: 1.2.14.0

101.7 °C  
96  
88  
80  
72  
64  
56  
48  
40  
32  
22.6 °C

Infrafraro completo  
Nivel de mezcla  
Visible completo

Aceptar Cancelar Aplicar Ayuda



# DESARROLLO EXPERIMENTAL

30

## PRUEBAS DE EMISIONES (CO)



**Las mediciones se efectuaron para dos condiciones:**

- 1) Sin exceso de aire (Tiro natural)
- 2) Con exceso de aire



# DESARROLLO EXPERIMENTAL

31

## PRUEBAS DE SECADO DE GRANOS



Pruebas realizadas con:  
Maíz amarillo al 36.9%  
Maíz blanco al 29%

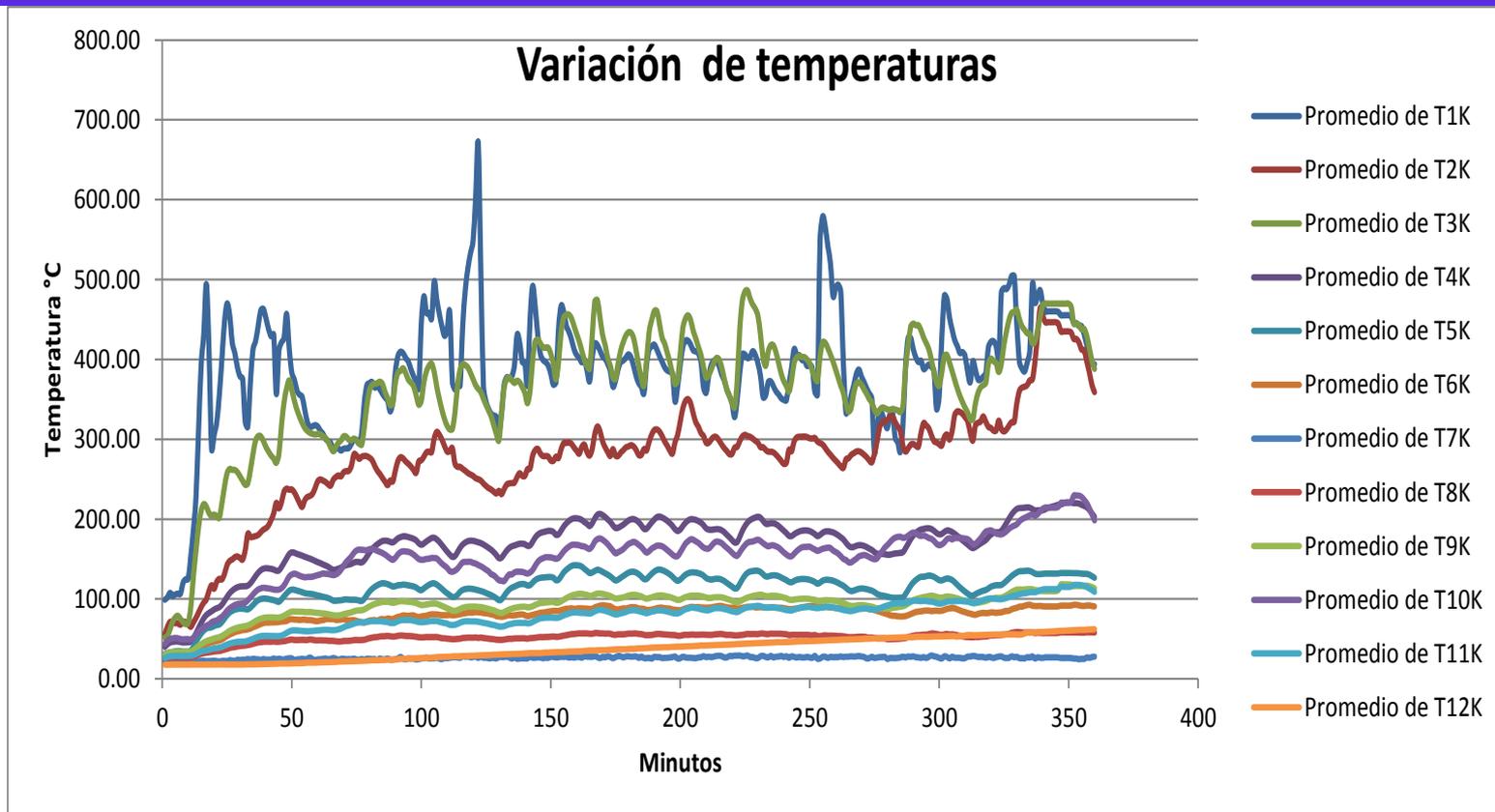


**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

# RESULTADOS Y ANÁLISIS

32

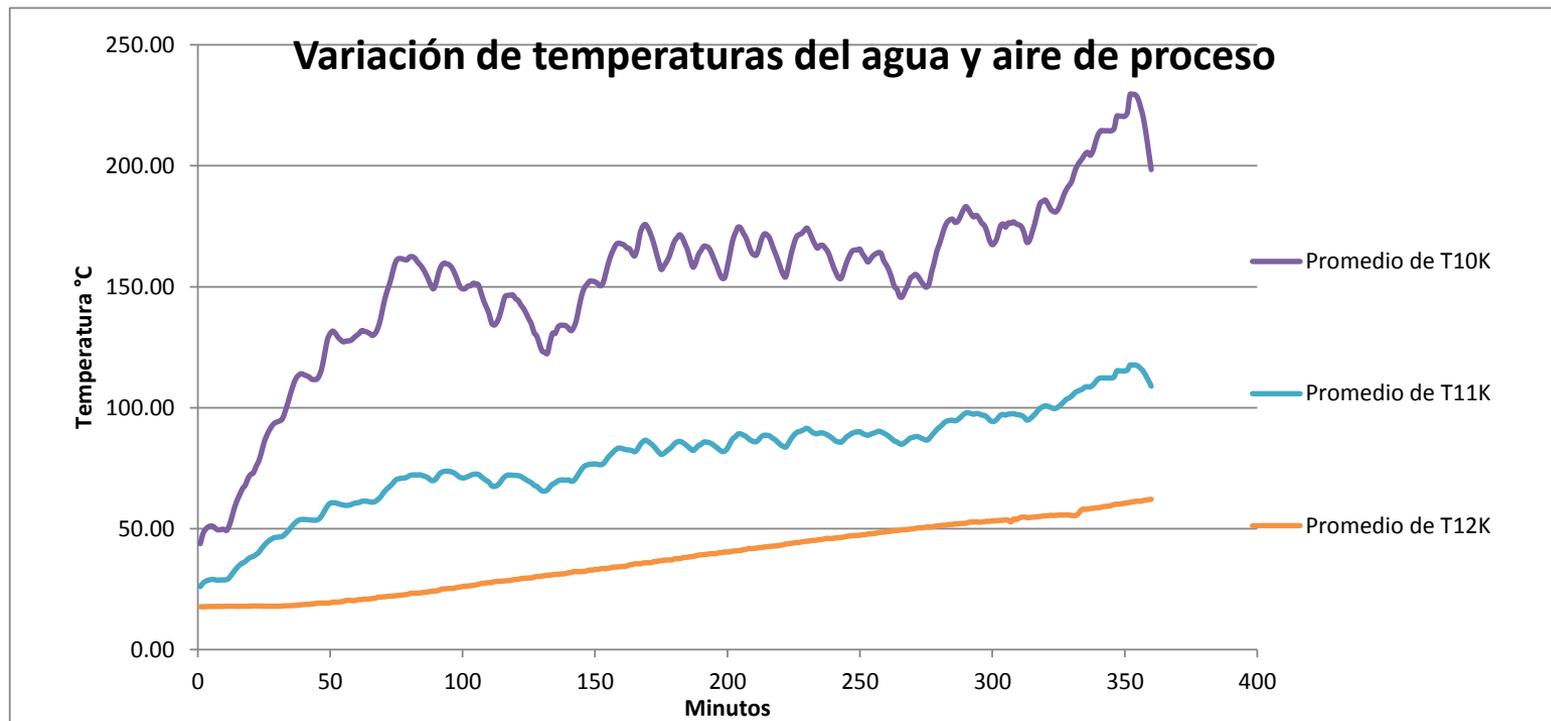
## TEMPERATURAS EN EL SISTEMA CON LEÑA EUCALIPTO AL 12.5% DE HUMEDAD



# RESULTADOS Y ANÁLISIS

33

## TEMPERATURAS EN EL AIRE DE PROCESO Y AGUA



# RESULTADOS Y ANÁLISIS

34

## FLUJO DE CALOR GENERADO POR LA BIOMASA

Para los cálculos se considera el peso de biomasa requerido para calentar el agua desde una temperatura promedio de red de 17.7°C a 62.1°C:

Leña eucalipto

Masa de la biomasa = 39.8 Kg

Humedad relativa medida = 12.5 %

Poder calorífico superior (PCS) = 16.11 MJ/Kg

Poder calorífico inferior (PCI) = 14530 KJ/Kg = 3476.07 Kcal

Tiempo de quema = t = 6 horas

$$q_{com} = \frac{39.8 \text{ Kg}}{6 \text{ h}} \cdot 14.53 \frac{\text{MJ}}{\text{Kg}} = 96382.33 \frac{\text{KJ}}{\text{h}} = 26.77 \text{ Kw}$$
$$q_{com} = 26.77 \text{ Kw}$$



# RESULTADOS Y ANÁLISIS

35

## ANÁLISIS EN LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN

PÉRDIDA	VALOR [KW]
Calor que se pierde con las cenizas	$q_{cen} = 0.0085 Kw$
Pérdidas de calor en paredes (Cond y Conv)	$q_{pcc} = 1.92 Kw$
Pérdidas por combustión imperfecta mecánica	$q_{cimec} = 0.021 Kw$
Pérdidas por combustión química imperfecta	$q_{VCO} = 6.93 Kw$
Flujo de calor en gases de escape	$q_{gases} = 4.47 Kw$
Pérdidas humedad relativa del aire cámara	$q_{acc} = 0.28 Kw$
Pérdidas por radiación	$q_{pr} = 4.37 Kw$
Pérdidas por infiltraciones	$q_{pif} = 0.084 Kw$



# RESULTADOS Y ANÁLISIS

36

## INTERCAMBIADOR DE CALOR GASES DE COMBUSTIÓN-AIRE

PÉRDIDA-TRANSFERENCIA	VALOR [KW]
Pérdidas en paredes de intercambiador	$q_{ppi} = 0.37 \text{ KW}$
Pérdidas humedad relativa del aire en el intercambiador gases aire.	$q_{aia} = 0.32 \text{ Kw}$
Cálculo calor transferido en el intercambiador	$q_{ti} = 8.55 \text{ KW}$



# RESULTADOS Y ANÁLISIS

37

## ANÁLISIS EN EL INTERACUMULADOR AIRE AGUA

PÉRDIDA-TRANSFERENCIA	VALOR [KW]
Flujo de calor para el calentamiento del agua	$q_{H_2O} = 4.30 \text{ Kw}$
Pérdidas paredes	$q_{ppc} = 0.15 \text{ Kw}$

## ANÁLISIS EN SECADORA DE GRANOS

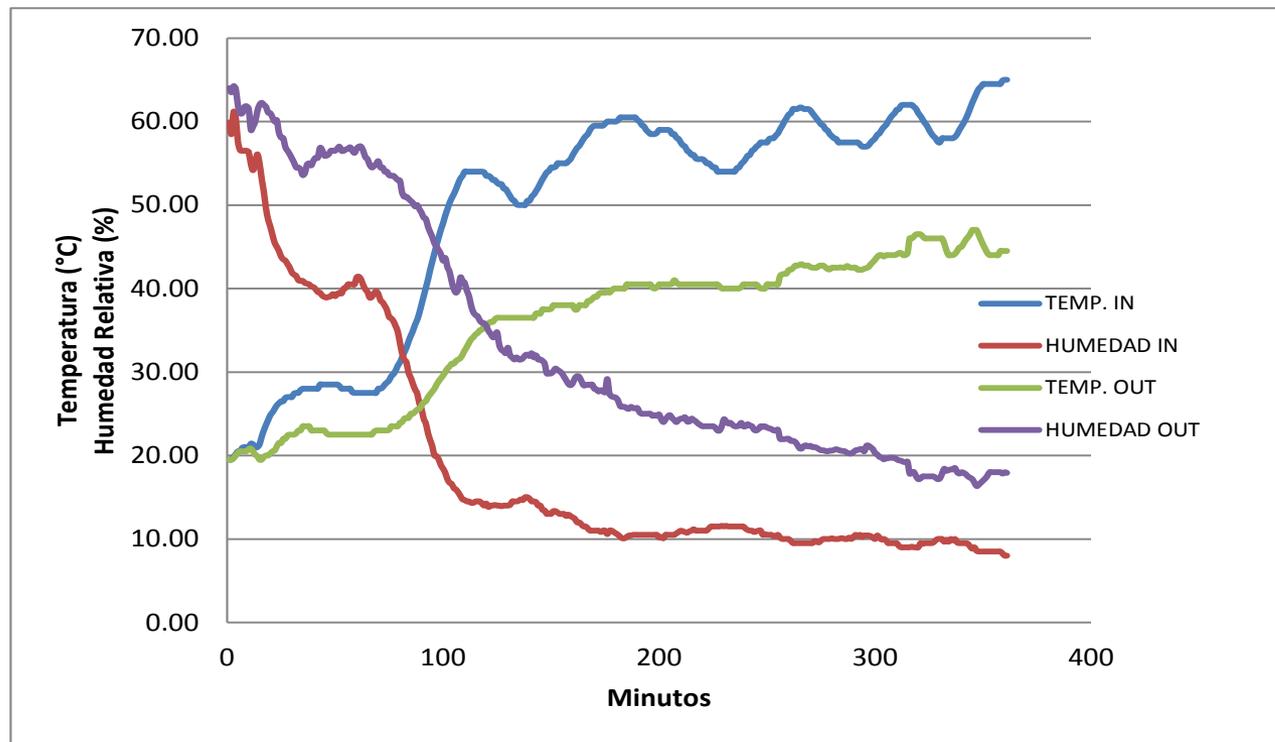
Pérdidas por las paredes	$q_{ps} = 1.14 \text{ Kw}$
Calor útil para el secado	$\begin{aligned} q_{us} &= q_{sec} - q_{PS} \\ &= 4.13 - 1.14 \\ &= 2.99 \text{ KW} \end{aligned}$



# RESULTADOS Y ANÁLISIS

38

## TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA A LA ENTRADA Y SALIDA DE LA SECADORA



# RESULTADOS Y ANÁLISIS

39

## ANÁLISIS EN SECADORA DE GRANOS

**Peso del producto a secar:**

**Maíz a 38% de humedad inicial se lleva a humedad final del 13%**

$$M_{H_2O} = \frac{h_{inicial} - h_{final}}{100 - h_{final}} (M_{prod})$$

$$q_{us} = \frac{M_{prod}}{t_{sec}} \cdot C_{p_{prod}} \cdot (T_2 - T_1) + \frac{M_{H_2O} \times 540}{t_{sec}}$$

$$q_{us} = 2.99 \text{ KW}$$

$$= 2575.11 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}$$

$$C_{p_{prod}} = 0.531 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}^\circ\text{C}}$$

$$CLV_{\text{agua}} = 540 \text{ Kcal/Kg}$$

$$M_{prod} = \frac{2575.11}{28.92} = 88.31 \text{ Kg}$$

**Eficiencia de la secadora**

*Eficiencia (%)*

$$= \frac{73 - 30.5}{73 - 14.5} 100$$
$$= 72.6\%$$

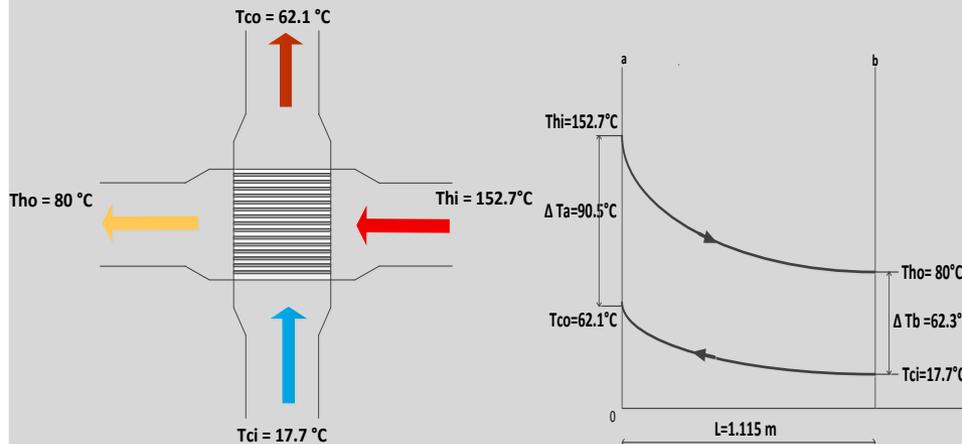


# RESULTADOS Y ANÁLISIS

40

## ANÁLISIS EN INTERACUMULADOR

### Determinación del tiempo de calentamiento



$$q = U \cdot A \cdot N \cdot F \cdot \overline{\Delta T}_{nl}$$

$$q = (20)(0.105)(30)(0.92)(75.52)$$

$$= 4377.14 \text{ W} =$$

$$4.38 \text{ KW}$$

$$Q_{H_2O} = m C_p (T_2 - T_1)$$

$$= 500 \text{ Kg} \left( 4.18 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}^\circ\text{C}} \right) (62.15$$

$$- 17.7)^\circ\text{C} = 92900.5 \text{ KJ}$$

$$t = \frac{Q}{q} = \frac{92900.5}{4.38}$$

$$= 21210.16 \text{ (s)}$$

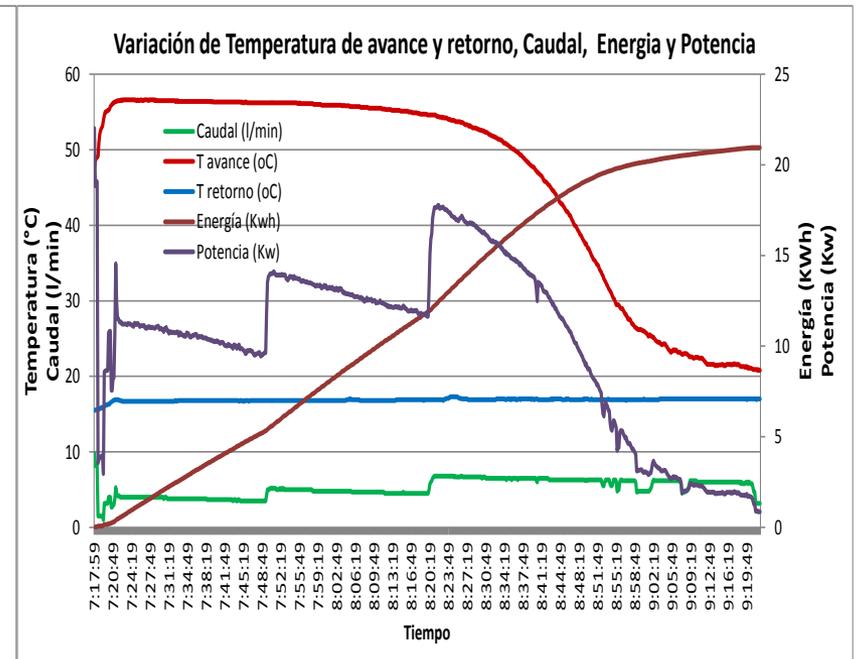
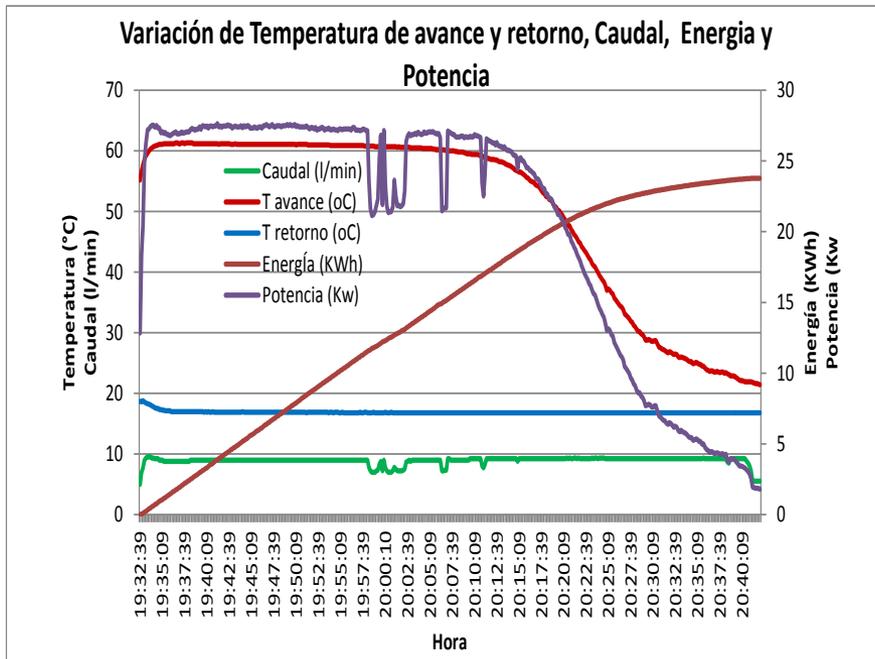
$$= 5.89 \text{ horas}$$



# RESULTADOS Y ANÁLISIS

41

## VARIACIÓN DE TEMPERATURAS, CAUDAL, ENERGÍA Y POTENCIA EN EL INTERACUMULADOR DE AGUA



# RESULTADOS Y ANÁLISIS

42

## MEDICIONES DE CO A DISTINTAS HUMEDADES

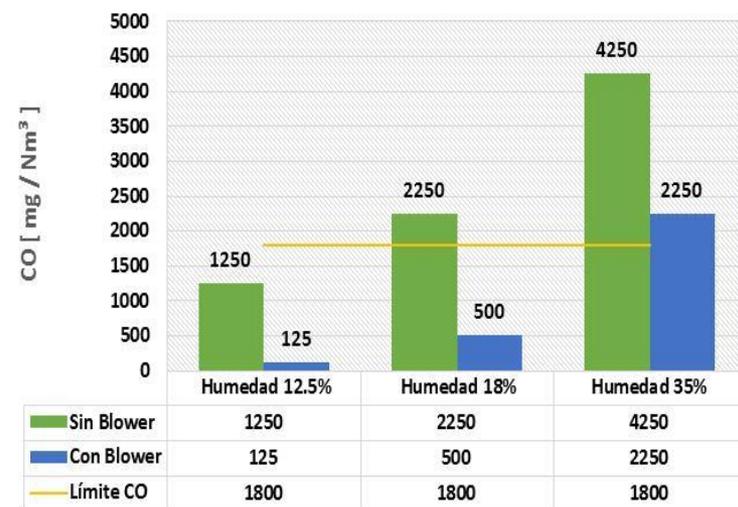
Humedad de Madera [%]		EUCALIPTO			PINO		
		12.50%	18.00%	35.00%	15.80%	18.20%	39.10%
Emisiones CO [%]	Con Blower	0.01	0.04	0.18	0.06	0.09	0.18
	Sin Blower	0.10	0.18	0.34	0.10	0.28	0.34
Emisiones CO [PPM]	Con Blower	100.00	400.00	1800.00	600.00	900.00	1800.00
	Sin Blower	1000.00	1800.00	3400.00	1000.00	2800.00	3400.00
Emisiones CO [mg/Nm <sup>3</sup> ]	Con Blower	125.00	500.00	2250.00	750.00	1125.00	2250.00
	Sin Blower	1250.00	2250.00	4250.00	1250.00	3500.00	4250.00

### NORMATIVA ECUATORIANA - MEDICIONES DE BIOMASA EN CALDERAS NORMA CHILENA EN FUENTE FIJA

Valor Máximo Permisible CO en fuente fija [ 1800 mg/Nm <sup>3</sup> ]	Cumple	Cumple Parcial	No Cumple	Cumple	Cumple Parcial	No Cumple
Concentración Máxima CO Calderas Biomasa [ 5000 ppm ]	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple

**Nota:** Factor para convertir de PPM a mg/m<sup>3</sup> multiplicar 1.25

Emisión CO para distintas humedades del Eucalipto



# RESULTADOS Y ANÁLISIS

43

## RESUMEN DE BALANCE ENERGÉTICO

COMPONENTE	EUCALIPTO						PINO					
	HUMEDAD 12.5%		HUMEDAD 18%		HUMEDAD 35 %		HUMEDAD 15.8%		HUMEDAD 18.2%		HUMEDAD 39.1%	
	(Kw)	(%)	(Kw)	(%)	(Kw)	(%)	(Kw)	(%)	(Kw)	(%)	(Kw)	(%)
<b>POTENCIA INGRESO</b>	<b>27.36</b>	<b>100.00%</b>	<b>24.64</b>	<b>100.00%</b>	<b>24.59</b>	<b>100.00%</b>	<b>25.70</b>	<b>100.00%</b>	<b>26.70</b>	<b>100.00%</b>	<b>22.59</b>	<b>100.00%</b>
Calor suministrado por el combustible (leña)	26.77	97.84%	24.05	97.61%	24	97.60%	25.11	97.70%	26.11	97.79%	22.00	97.39%
Potencia eléctrica entregada al ventilador de 2.5 pulg	0.24	0.88%	0.24	0.97%	0.24	0.98%	0.24	0.93%	0.24	0.90%	0.24	1.06%
Potencia eléctrica entregada al ventilador 3.0 pulg	0.35	1.28%	0.35	1.42%	0.35	1.42%	0.35	1.36%	0.35	1.31%	0.35	1.55%
<b>PÉRDIDAS DE CALOR</b>	<b>20.06</b>	<b>73.30%</b>	<b>18.35</b>	<b>74.48%</b>	<b>18.71</b>	<b>76.09%</b>	<b>18.19</b>	<b>70.78%</b>	<b>19.74</b>	<b>73.95%</b>	<b>17.32</b>	<b>76.68%</b>
<i>Pérdidas en cenizas</i>	0.0085	0.031%	0.0067	0.027%	0.0081	0.033%	0.0044	0.017%	0.0042	0.016%	0.0033	0.015%
<i>Pérdidas por combustión imperfecta mecánica</i>	0.021	0.08%	0.01	0.05%	0.01	0.04%	0.01	0.03%	0.00	0.02%	0.00	0.01%
<i>Pérdidas por combustión química imperfecta</i>	6.93	25.33%	5.89	23.90%	6.18	25.13%	6.00	23.35%	7.46	27.94%	5.46	24.17%
<i>Pérdidas en gases de escape</i>	4.47	16.34%	3.89	15.79%	3.49	14.19%	4.33	16.85%	3.71	13.90%	3.24	14.34%
<b>Pérdidas por paredes</b>	<b>7.95</b>	<b>29.06%</b>	<b>7.88</b>	<b>31.98%</b>	<b>8.31</b>	<b>33.79%</b>	<b>7.40</b>	<b>28.79%</b>	<b>8.01</b>	<b>30.00%</b>	<b>7.83</b>	<b>34.66%</b>
<i>Pérdidas en paredes de la cámara de combustión</i>	1.92	7.02%	1.84	7.47%	2.06	8.38%	1.66	6.46%	1.76	6.59%	1.74	7.70%
<i>Pérdidas por radiación en la cámara de combustión</i>	4.37	15.97%	4.32	17.53%	4.33	17.61%	4.30	16.73%	4.27	15.99%	4.33	19.17%
<i>Pérdidas en paredes del intercambiador de calor</i>	0.37	1.35%	0.38	1.54%	0.44	1.79%	0.37	1.44%	0.67	2.51%	0.52	2.30%
<i>Pérdidas en paredes del interacumulador</i>	0.15	0.55%	0.14	0.57%	0.15	0.61%	0.12	0.47%	0.12	0.45%	0.14	0.62%
<i>Pérdidas en paredes de secadora</i>	1.14	4.17%	1.20	4.87%	1.33	5.41%	0.95	3.70%	1.19	4.46%	1.10	4.87%
<b>Pérdidas por humedad del aire</b>	<b>0.60</b>	<b>2.19%</b>	<b>0.60</b>	<b>2.44%</b>	<b>0.62</b>	<b>2.52%</b>	<b>0.36</b>	<b>1.40%</b>	<b>0.47</b>	<b>1.76%</b>	<b>0.72</b>	<b>3.19%</b>
<i>Pérdidas aire de combustión</i>	0.28	1.02%	0.25	1.01%	0.29	1.18%	0.11	0.43%	0.22	0.82%	0.33	1.46%
<i>Pérdidas aire de proceso</i>	0.32	1.17%	0.35	1.42%	0.33	1.34%	0.25	0.97%	0.25	0.94%	0.39	1.73%
<b>Pérdidas por infiltraciones</b>	<b>0.084</b>	<b>0.31%</b>	<b>0.08</b>	<b>0.33%</b>	<b>0.1</b>	<b>0.41%</b>	<b>0.09</b>	<b>0.36%</b>	<b>0.09</b>	<b>0.34%</b>	<b>0.07</b>	<b>0.31%</b>
<b>CALOR ÚTIL</b>	<b>7.29</b>	<b>26.64%</b>	<b>6.28</b>	<b>25.49%</b>	<b>5.83</b>	<b>23.71%</b>	<b>7.51</b>	<b>29.22%</b>	<b>6.90</b>	<b>25.84%</b>	<b>5.25</b>	<b>23.24%</b>
<i>Calor útil interacumulador</i>	4.3	15.72%	3.87	15.71%	3.52	14.31%	5.18	20.16%	4.30	16.10%	3.05	13.50%
<i>Calor útil secadora</i>	2.99	10.93%	2.41	9.78%	2.31	9.39%	2.33	9.07%	2.60	9.74%	2.20	9.74%
<b>RENDIMIENTO</b>		<b>26.64%</b>		<b>25.49%</b>		<b>23.71%</b>		<b>29.22%</b>		<b>25.84%</b>		<b>23.24%</b>

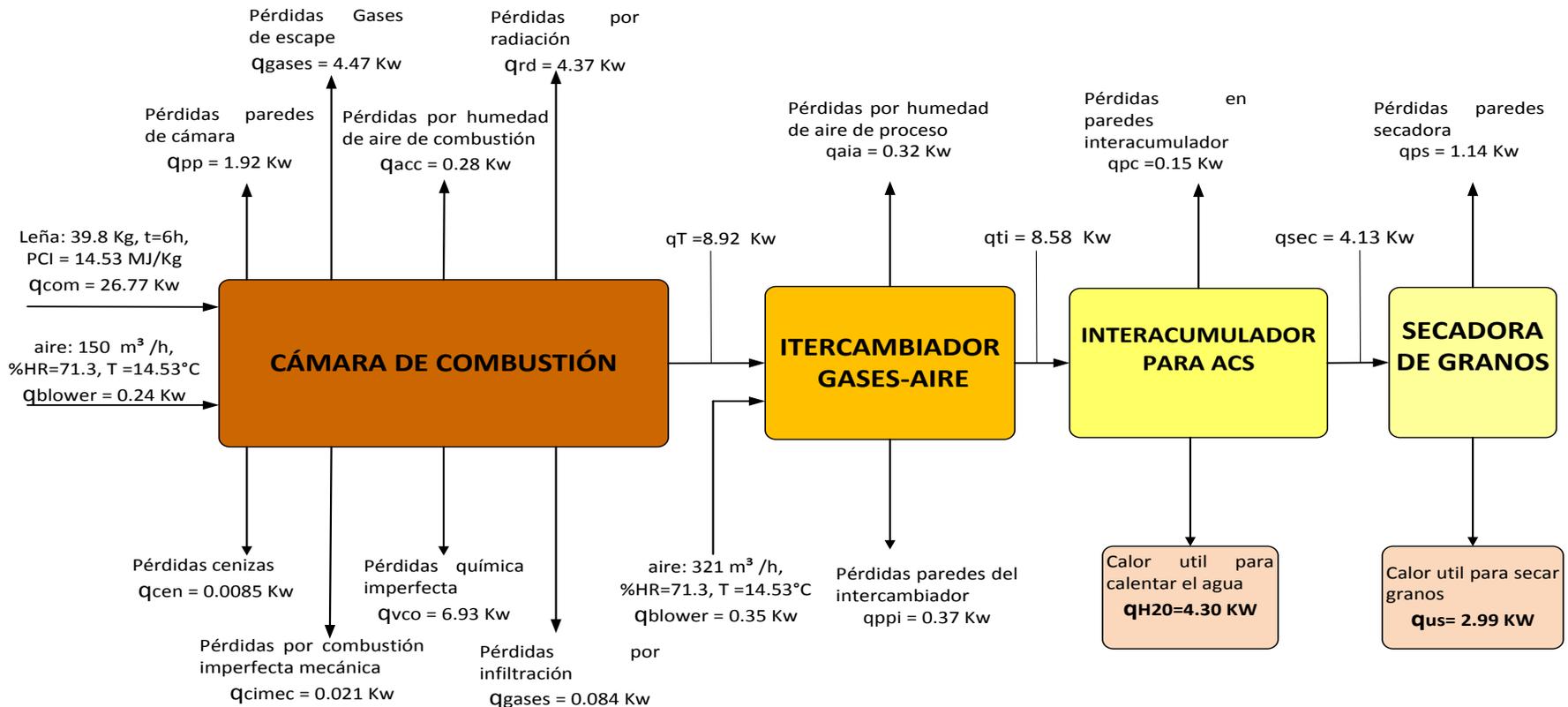


# RESULTADOS Y ANÁLISIS

44

## BALANCE ENERGÉTICO

RESULTADOS DE BALANCE DE ENERGÍA PARA EL SISTEMA DE BIOCALEFÓN CON LEÑA DE EUCALIPTO AL 12.5% DE HUMEDAD

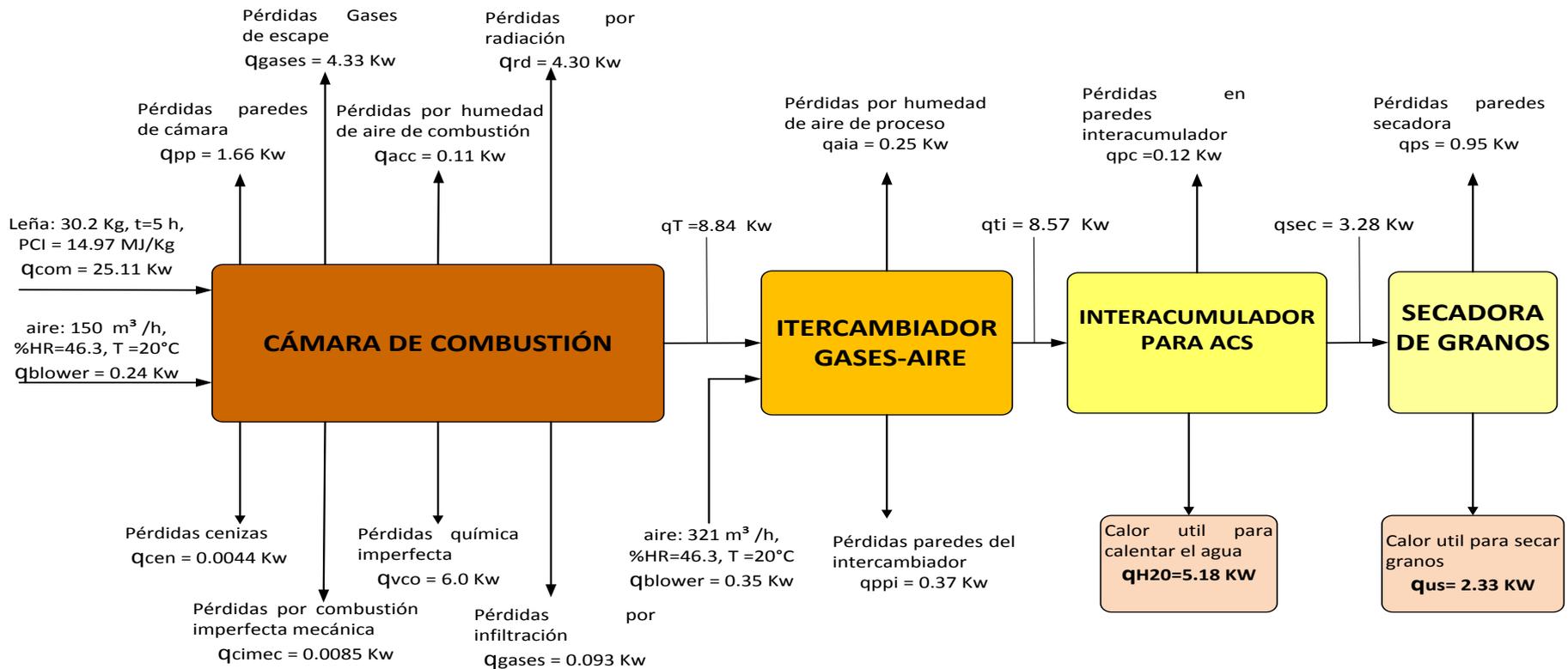


# RESULTADOS Y ANÁLISIS

45

## BALANCE ENERGÉTICO

RESULTADOS DE BALANCE DE ENERGÍA PARA EL SISTEMA DE BIOCALEFÓN CON LEÑA DE PINO AL 15.8% DE HUMEDAD



# RESULTADOS Y ANÁLISIS

46

## PROPUESTAS DE MEJORA

- Las pérdidas por radiación es alto para este sistema (15.97%).
- Del análisis termográfico se tiene que las temperaturas en las paredes exteriores en la cámara de combustión alcanzan los 150 °C. Las reglas de seguridad determinan la temperatura máxima de la pared a 55 °C (para evitar quemaduras).
- Al instalar la manta térmica (lana de roca), en las superficies exteriores de las tres secciones de la cámara de combustión la temperatura superficial se puede reducir a 40 °C.
- Ahora las pérdidas totales por radiación en las tres secciones son: 0.486 Kw, que corresponde al 11.12% del valor inicial y con lo cual la eficiencia aumenta.



# CONCLUSIONES

47

- En Ecuador la leña tiene un rol muy representativo para usos de cocción en zonas rurales, representando el 13% de la demanda de energía del sector residencial, donde es dominado por el uso del gas licuado de petróleo (59%) destinado especialmente para cocción y la electricidad el (28%).
- La función del Biocalefón, es obtener agua caliente sanitaria, con una capacidad de 500 litros. El proceso para el calentamiento es: los gases calientes producto de la combustión de la leña pasa por un intercambiador de tubos, el aire atmosférico ingresa por estos tubos impulsado por un ventilador de 3" de descarga, a la salida de este intercambiador el aire tiene una temperatura en promedio de 152.7 °C y sede calor al agua del interacumulador que se calienta por convección natural desde una temperatura de 17.7 a 62°C en un tiempo de 6 horas en promedio.



# CONCLUSIONES

48

- El Biocalefón empleado para la investigación es de aplicación múltiple pues permite al mismo tiempo disponer de 500 litros de agua caliente sanitaria a una temperatura de 62°C y el calor residual se utiliza para el secado de productos agrícolas o cereales. El combustible con el cual funciona el equipo es Biomasa sólida y en este trabajo se empleó leña de eucalipto y pino.
- En los ensayos se realizó el secado de maíz con un contenido de humedad inicial de 36.9% y al final se obtuvo grano con 13.3% de humedad y otro con 29% y se terminó con 7.5% de humedad, demostrando que es más fácil extraer humedad en granos con alta humedad.



# CONCLUSIONES

49

- Para la caracterización de la Biomasa de eucalipto y pino se realizó el análisis elemental y proximal en el Laboratorio para Termovalorización de Biomosas y Residuos Sólidos Urbanos del INER, determinándose un poder calórico superior de 16.11 MJ/Kg y 16.75 para el eucalipto y pino respectivamente.
- Dentro de la metodología empleada para el análisis energético en el Biocaléfón se instaló la instrumentación para medir variables físicas como: temperaturas, velocidad del aire, humedad relativa del aire, energía térmica acumulada en el agua, humedad relativa del grano y monóxido de carbono.



# CONCLUSIONES

50

- Los ensayos de quema se realizó con leña, con humedades relativas de: 12.5%, 18.0% y 35.0% para el eucalipto y de 15.8%, 18.2% y 39.1% para el pino. El mayor rendimiento se obtuvo con la leña de pino al 15.8% de humedad y fue de 29.22% para todo el sistema y 20.16% si se considera solo para el calentamiento de agua. El menor rendimiento fue con la leña de pino al 39.1% de humedad y fue de 23.24% para el sistema y 13.5% para el calentamiento del agua.
- El mayor porcentaje de pérdidas en la quema con eucalipto al 12.5% se da por las paredes 29.06%, le sigue las perdidas por combustión química imperfecta con el 25.33% y en los gases de escape 16.34%.



# CONCLUSIONES

51

- Para determinar el grado de contaminación de los gases de combustión se midió el monóxido de carbono en dos escenarios: sin exceso (tiro natural) y con exceso de aire (blower al 50% de apertura). Los menores valores fueron con exceso de aire 100 PPM para el eucalipto al 12.5% de humedad, mientras que el mayor valor fue sin exceso de aire 3400 PPM para el pino al 39.1% de humedad.
- El desarrollo de la investigación, se ha realizado conservando su fase inicial de diseño y se ha optimizado la estructura en la cámara de combustión al colocar la placa refractaria. Se proporciona un equipamiento con sensores de temperatura instalados y que facilitan la toma de datos empleando un sistema de adquisición mediante una datalogger de 12 canales, que permitirá continuar nuevas fases de estudio.



# RECOMENDACIONES

52

- Durante los ensayos se registra con la cámara termográfica puntos calientes en las superficies externas de la cámara de combustión. Como propuesta de mejora para la seguridad personal del operario se plantea aislar con manta térmica las paredes exteriores y este cambio además permitirá reducir el porcentaje de pérdidas por radiación.
- La alimentación de la leña actualmente se realiza en forma manual lo que demanda de un operador, por lo que se plantea realizar estudios futuros para la alimentación con briquetas lo que permitirá llegar a un proceso automatizado.



# RECOMENDACIONES

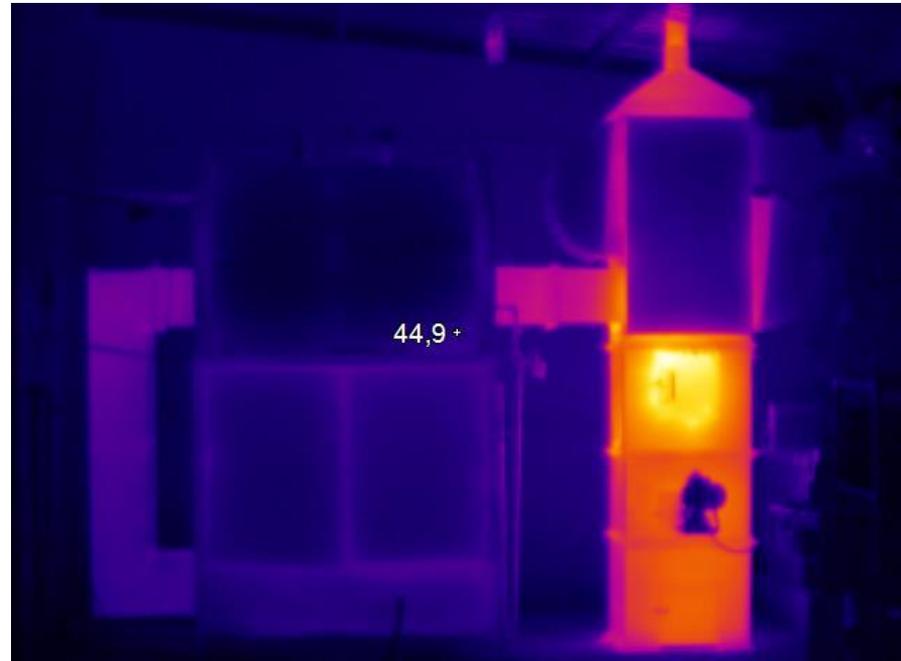
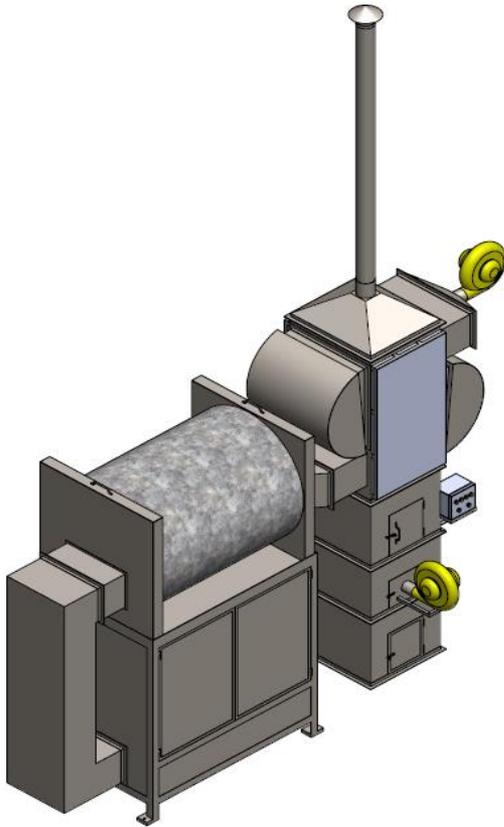
53

- De los ensayos para la medición del CO, se recomienda al quemar biomasa leñosa su contenido de humedad debe ser menor al 20% trabajando con exceso de aire para cumplir la normativa ecuatoriana para emisiones de combustión en fuentes fijas.



# GRACIAS

54



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA