

**EVALUACIÓN TÉRMICA Y EXPERIMENTAL DE UN BANCO DE
INTERCAMBIADORES DE CALOR DE TUBO Y CORAZA UTILIZANDO
GASES PROVENIENTES DE LA COMBUSTIÓN DE PELLET DE MEZCLA DE
BIOMASA Y FLUJO AGUA EN CONFIGURACIÓN VARIABLE**



MIGUEL LEONARDO MARTÍN PEÑA

OSCAR DAVID REZA MORALES

**UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
MONTERÍA, CÓRDOBA**

2017

**EVALUACIÓN TÉRMICA Y EXPERIMENTAL DE UN BANCO DE
INTERCAMBIADORES DE CALOR DE TUBO Y CORAZA UTILIZANDO
GASES PROVENIENTES DE LA COMBUSTIÓN DE PELLET DE MEZCLA DE
BIOMASA Y FLUJO AGUA EN CONFIGURACIÓN VARIABLE**

MIGUEL LEONARDO MARTÍN PEÑA

OSCAR DAVID REZA MORALES

**Trabajo de grado presentado en la modalidad de trabajo de investigación como
parte de los requisitos para optar al Título de Ingeniero Mecánico.**

Director (s):

Ing. JORGE MARIO MENDOZA FANDIÑO, Ph.D

Codirector (s):

Ing. ARNOLD RAFAEL MARTÍNEZ GUARÍN, MSc.

**UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
MONTERÍA, CÓRDOBA**

2017

La responsabilidad ética, legal y científica de las ideas, conceptos y resultados del proyecto, serán responsabilidad de los autores.

Artículo 61, acuerdo N° 093 del 26 de noviembre de 2002 del consejo superior.

Nota de aceptación

JORGE MARIO MENDOZA FANDIÑO

Director

ARNOLD RAFAEL MARTÍNEZ GUARÍN

Codirector

WILLIAM CESAR BELTRAN GALINDO

Jurado

JAIRO LUIS DURANGO PADILLA

Jurado

Este trabajo de grado está dedicado principalmente a mis padres por el sacrificio y el empeño que me brindaron para cumplir el sueño de ser un profesional en el área de la ingeniería

También a mis familiares y amigos quienes contribuyeron de manera directa e indirecta a mi formación integral

Oscar David Reza Morales

Dedicado a:

A Dios, mi madre Maria Ruby, mi padre Miguel Antonio.

A mi camarada Inyer Villareal, mi amiga Oriana Bruno y mi tío Gilberto Martín

Miguel Leonardo Martín Peña

Gracias a Dios por permitirme alcanzar esta gran meta en mi vida...

Agradecimientos especial a: mi madre Luz Helena Morales y a mi padre Oscar Manuel Reza por el apoyo moral, económico y fraternal que me brindaron durante el transcurso de mi carrera, sin ellos este sueño no sería posible. Agradezco a la profesora Judith Machado y a mi tía Paz Reza que son fuentes de inspiración y formación desde hace muchos años, a los ingenieros Jorge Mario Mendoza y Rafael Gómez que contribuyeron a nuestra formación académica y profesional, facilitaron la materialización de este trabajo de investigación y representan un modelo a seguir como profesionales de la ingeniería. Además, gracias a la fundación Solidaridad por Colombia por el apoyo económico y la formación en valores, brindadas durante el transcurso de mi carrera e incluso antes de ella.

También quiero agradecer a mis familiares, novia, amigos, compañeros, profesores y demás personas que estuvieron apoyándome y creyeron junto a mí que ser ingeniero más que un sueño, se convertiría en una realidad. Quiero terminar con esta frase que me acompañó durante el transcurso de mi carrera, "Diseñando momentos, manufacturando experiencias y ensamblando historias"

Oscar David Reza Morales

Agradecimientos especial a: mi madre María Ruby Peña quien ha sido una luchadora incansable y siempre ha sido y será un gran ejemplo de entrega, compromiso y amor al prójimo, a mi padre Miguel Antonio Martín quien con su disciplina y apoyo incondicional ha contribuido a mi formación como profesional, a Juana Yunis quien cuando llegó a mi vida me ayudó a entenderme mejor y quien me apoyo a finalizar este proyecto.

Quiero agradecer a mis compañeros y amigos que me han apoyado en este proceso de formación, quien también comparten las ideas que la educación no es un producto sino una oportunidad para transformar las realidades, a la Asociación Colombiana de Estudiantes Universitarios quien me forjo como líder estudiantil, a la Juventud Comunista que me ha ayudado a ver la realidad de una manera crítica y al Colectivo Poder Mestizo que ha sido mi escuela en el servicio a la comunidad.

Miguel Leonardo Martín Peña

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	12
ABSTRACT	13
1. INTRODUCCIÓN	15
1.1. OBJETIVOS GENERAL.....	19
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
2. REVISIÓN DE LITERATURA	20
2.1. ASPECTOS GENERALES SOBRE LA BIOMASA.....	21
2.2. COMBUSTIÓN DE BIOMASA	24
2.3. INTERCAMBIADORES DE CALOR.....	26
2.4. MÉTODOS DE CÁLCULOS PARA LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN INTERCAMBIADORES.....	28
2.4.1. Método de la efectividad – NUT	32
3. MATERIALES Y MÉTODOS	34
3.1. DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL BANCO DE INTERCAMBIADORES DE CALOR.....	35
3.2. DISEÑO DE LA BATERÍA DE MEZCLAS	39
3.3. PREPARACIÓN Y ELABORACIÓN DE LOS PELLETS.....	41
3.4. MÉTODOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS	42
3.4.1. Pruebas pilotos.....	46
3.4.2. Pruebas Experimentales.....	47
3.5. MODELACIÓN DEL BANCO DE INTERCAMBIADORES DE CALOR.....	48
4. RESULTADOS Y DISCUSIONES	54

4.1. BANCO DE INTERCAMBIADORES DE CALOR	55
4.2. BATERÍA DE MEZCLA OPTIMIZADA.....	57
4.3. ELABORACIÓN DE LOS PELLETS	61
4.4. DATOS EXPERIMENTALES	63
4.4.1. Perfiles de temperatura	64
4.5. RENDIMIENTO DEL BANCO DE INTERCAMBIADORES	66
4.6. MODELACIÓN DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR	68
5. CONCLUSIONES.....	70
6. RECOMENDACIONES.....	72
7. BIBLIOGRAFÍA.....	74
ANEXOS	76

LISTADO DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1. Propuestas de montajes y criterios previos al diseño y fabricación de la configuración final.	77
Anexo 2. Dispositivos e instrumentos utilizados para el montaje final	78
Anexo 3. Tipos de biomasa utilizadas en su estado natural	81
Anexo 4. Trituración y peletización de las biomosas.	82
Anexo 5. Datos de regresión para modelo cubico especial	83
Anexo 6. Gráficas de optimización de mezclas para una temperatura de respuesta de 440 °C	84
Anexo 7. Informe del análisis elemental de algunas biomosas.....	85
Anexo 8. Código de modelación EES 2004 (Datos de la prueba M6-1).....	86
Anexo 9. Interfaz de modelación EES 2004 (Datos de la prueba M6-1).	89
Anexo 10. Tabla de temperaturas ingresadas y propiedades arrojada por EES 2004 (Datos de la prueba M6-1 hasta la corrida 26)	90
Anexo 11. Gráficas de temperaturas por pruebas	91
Anexo 12. Efectividad por mezclas para los 6 montajes disponibles.....	106
Anexo 13. Resultados obtenidos de la modelación, propiedades y parámetros de transferencia de calor	111

LISTADO DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Consideraciones y criterios para la fabricación y ensamblaje del banco de intercambiadores de calor	37
Tabla 2. Batería de mezcla de partida para cinco residuos biomásicos de la región.....	39
Tabla 3. Configuraciones del montaje con diferentes combinaciones de intercambiadores.....	42
Tabla 4. Nomenclatura utilizada para identificar las pruebas	47
Tabla 5. Valores estadísticos para modelos de regresión aplicados a la batería de mezclas	58
Tabla 6. Valores estadísticos para modelo cubico especial exceptuando mezclas.	60
Tabla 7. Coeficiente de regresión cubica especial.	60
Tabla 8.. Mezclas optimizadas y porcentajes en peso para biomasas de la región.....	62
Tabla 9. Efectividades máximas obtenidas para las evaluaciones de mezclas	67

LISTADO DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Procedencia de la biomasa	22
Figura 2. Intercambiadores de calor de tubo y coraza en la industria.	28
Figura 3. Perfil de temperatura y regímenes de flujo para intercambiadores de calor.	30
Figura 4. Línea calentamiento y de precalentamiento.....	36
Figura 5. Diseño y montaje final del banco.	36
Figura 6. Esquema del montaje e instrumentación para las pruebas	43
Figura 7. Bitácora de pruebas experimentales	44
Figura 8. Pantallazo de plantilla Excel 2016 y registro de temperaturas	45
Figura 9. Function Informations – Fluid properties, para calor específico y densidad.	51
Figura 10. Fotografía del equipo puesto en marcha.	55
Figura 11. Diseño inicial banco.....	56
Figura 12. Diseño final banco.....	56
Figura 13. Conexión del banco de intercambiadores al gasificador.....	57
Figura 14. Pellets obtenidos de la PELETIZADORA ZLSP S-230B.	63
Figura 15. Forma de descarga anterior y preparación de las porciones de descarga.....	64

RESUMEN

Este trabajo de investigación está desarrollado en el campo de la termodinámica, específicamente en el área de transferencia de calor. Consta de cinco partes, la primera se compone del diseño y construcción de un banco de intercambiadores de calor compuesto por un combustor de pellets, un sistema de circulación de agua y otro de circulación de gases de combustión; de configuración ajustable según las posiciones para los intercambiadores, el equipo tiene una línea de precalentamiento y otra de calentamiento para tres intercambiadores. En la segunda parte se desarrolla la optimización de una batería de mezclas de biomásas residuales de cultivos de la región (Algodón, Ajonjolí, Arroz, Maíz y Coco) a través del software estadístico Minitab 17, para proceder a la tercera parte del proyecto que consta de la elaboración y fabricación de los pellets.

La cuarta parte se compone de la puesta en marcha de 30 pruebas, obtenidas entre el cruce de las 5 mezclas optimizadas y los 6 montajes posible; con el fin de obtener los datos necesarios para la realización de un análisis de las eficiencias de las configuraciones evaluadas, se desarrolló de una interfaz gráfica y un código de programación en el software EES (Engineering Equation Solver) partiendo de las ecuaciones necesarias para el cálculo de las eficiencias de las pruebas. Finalmente se presentan resultados de propiedades y parámetros de transferencia de calor y se muestra el montaje con mayor rendimiento a partir de la comparación de graficas de efectividad de cada montaje.

Palabras Clave: mezclas de biomasa, combustión de biomasa, transferencia de calor, efectividad.

ABSTRACT

This research project is inscribed in the field of thermodynamics, specifically in the area of heat transfer. It is composed of five parts. The first part consists in the design and construction of a bank of heat exchangers, itself composed by a pellet combustor, a water circulation system, and a combustion gas circulation system. The bank has an adjustable configuration according to the position of these inter-changers given that it has a pre-heating line and a heating line for three exchangers. The second part of the project develops the optimization of a battery of mixtures of residual biomasses resulting from regional crops (cotton, sesame, rice, corn, and coconut) through the statistics software Minitab 17. This was the basis for the third part of the project, which refers to the fabrication of pellets.

The fourth part relates to the implementation of the 30 tests resulting from the crossing the five optimized mixtures with the six possible schemes, in order to obtain the data necessary to analyze the efficiency of the different configurations being evaluated. Lastly, we developed a graphic interface and a programming code using the EES (Engineering Equation Solver) based on the equations needed to calculate the efficiency of the tests.

Keywords: Biomass mix, biomass combustion, Heat transfer, efficiency

INTRODUCCIÓN

Debido al gran auge de proyectos que buscan reemplazar los combustibles fósiles por combustibles alternativos, la generación de energía a partir de biomasa ha tomado una participación importante a nivel mundial, actualmente se ha incorporado dentro de los procesos industriales, para aprovechamiento térmico, cogeneración y/o energía eléctrica, también como combustible sólido alternativo utilizados para calefacción a nivel doméstico o comercial en zonas de bajas temperaturas o como fuente de energía en zonas de difícil acceso para los servicios básicos del hogar. En Colombia aproximadamente 62.200 GWh de electricidad fueron producidos en el SIN en el 2013 del cual el 1,3 % correspondieron al uso de biomasa y la producción de calor en la industria representó aproximadamente un 11% del total de energía final utilizada por tal sector de consumo (UPME 2015).

En los últimos años los mercados mundiales de pellets han sido impulsados por la incorporación de los combustibles alternativos a la canasta energética internacional, según estadísticas de la FAO para 2016 se produjeron alrededor de 28,6 Mt de pellets de madera, siendo Europa el mayor productor con el 58,3 %, seguido de América con 32,6 %, Asia 8,4 %, Oceanía con 0,5 % y África con 0,1 %. Estados Unidos ocupa el primer lugar en producción con 6,4 Mt a nivel global; América del sur es dominada por Brasil con 75 kt, Chile con 30 kt y Argentina con 6 kt (FAO 2017), lo cual representa un crecimiento en la producción de los combustibles alternativos. En contraste los residuos agroindustriales también representan recursos biomásicos con proyecciones concretas en el sector energético, por ejemplo, en Colombia los residuos agrícolas de la industria de la palma, tanto sólidos como los efluentes del proceso de extracción del aceite pueden

ser insumos de sistemas eficientes de cogeneración basados principalmente en la producción de electricidad a través de turbinas de condensación, o la generación de biogás para producción de electricidad a través de motores de combustión interna (UPME 2015).

El proceso más utilizado actualmente para la generación de energía eléctrica es la combustión en parrilla, donde la biomasa es llevada desde el sistema de alimentación hasta el hogar de la caldera donde será quemada desprendiendo calor y cenizas, la energía liberada calentará el agua transformándola en vapor, luego el vapor es llevado a una turbina quien transformará la energía térmica en energía mecánica y posteriormente a través de un generador en energía eléctrica (Quiceno y Mosquera 2010).

De igual manera en los diversos sistemas donde se dan calentamientos o enfriamientos entre fluidos se puede utilizar residuos biomásicos como fuente de energía. La evolución de las tecnologías ha incursionado en el desarrollo de dispositivos encargados aprovechar los principios térmicos, como el caso de los intercambiadores de calor, que son usados para ceder energía entre dos o más fluidos disponibles a diferentes temperaturas separados por una superficie de transferencia de calor e idealmente estos no se mezclan y según las aplicaciones y las condiciones de operación varían en geometrías y configuraciones.

En principio, los intercambiadores se pueden analizar con dos métodos que son de uso común; el método de la diferencia media logarítmica de temperatura que permite seleccionar un intercambiador definiendo la variación de la temperatura y el flujo

másico de un fluido, y el método de la efectividad–NUT, que permite predecir las temperaturas de salida de las corrientes de los fluidos conociendo los parámetros técnicos del intercambiador (Cengel y Ghajar 2011).

.1. OBJETIVOS GENERAL

Analizar la transferencia de calor entre gases de combustión de pellets de mezclas de biomasa y agua utilizando un banco de intercambiadores de calor de tubo y coraza, con configuración variable.

.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Construir un banco de intercambiadores de calor que permita evaluar la transferencia de calor entre gases de combustión y agua en contracorriente a través de cambios de configuración.
- Elaborar pellets de mezclas de biomasa a partir de una batería de ensayo obtenida de un diseño de mezclas.
- Analizar el rendimiento del banco de intercambiadores de calor para configuraciones dadas.
- Modelar la transferencia de calor de las configuraciones del banco de intercambiadores para la evaluación de su comportamiento.

REVISIÓN DE LITERATURA

.1. ASPECTOS GENERALES SOBRE LA BIOMASA

“La biomasa es materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizable como fuente de energía” (RAE 2014). Partiendo de tal definición los recursos biomásicos representan aquella porción de materia orgánica producto de actividades del ciclo de los ecosistemas o donde hay un proceso de transformación por parte del hombre. Las características y la composición varían según su procedencia, generalmente está constituida (en base seca y en porcentaje de masa) por Carbono entre 45 y 52 %, Hidrógeno entre 4 y 7 % y Oxígeno entre 42 y 50 %, con cantidades menores de Nitrógeno y Azufre. Además, contiene un rango de 70 – 80 % de material volátil, entre 0,5 – 5 % de cenizas y el resto en carbono fijo, una humedad de hasta el 50 % en peso y un poder calorífico inferior entre 15 y 22 MJ/kg (Arauzo et al. 2014).

Según Nogués et al. 2010 se puede en tres grupos principales a partir de su procedencia:

Primaria o natural, obtenida directamente de un ecosistema para uso energético, p ej., leña, corteza de árboles, ramas, hojas, vegetación, entre otros.

Secundaria o residual, generada de subproductos de actividades agrícolas, pecuarias, ganaderas, entre otros.

Terciaria, previamente procesada para su uso como recurso energético, p ej., el biogás resultado de la digestión de materia residual húmeda, del biodiesel o bioetanol, o de los pellets y briquetas.

Después de un barrido literario en la figura 1 se ilustraron algunos orígenes de la biomasa.

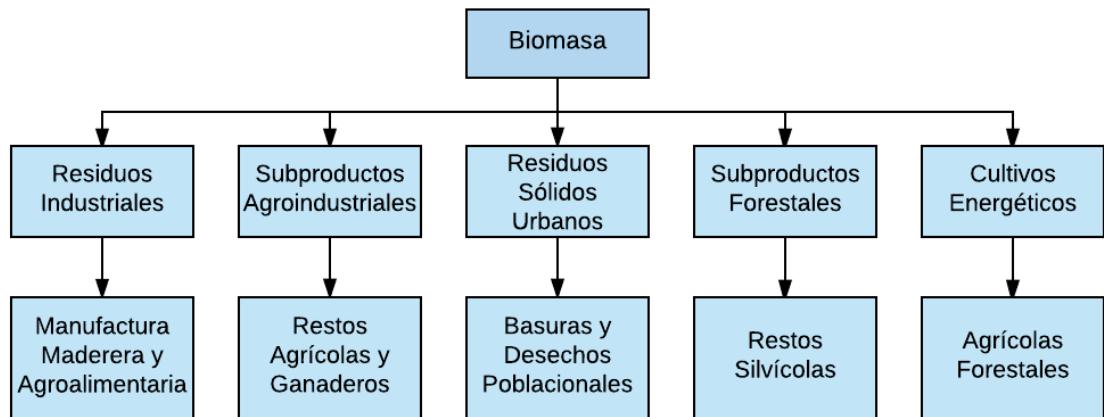


Figura 1. Procedencia de la biomasa

Fuente: Autores, 2017

La biomasa originalmente contiene algunos problemas para su uso debido a la baja densidad de masa y energía, contenido de humedad variable y heterogeneidad en forma y tamaño, indispensable para el aprovechamiento energético, esto conlleva a desarrollar procesos de pretratamiento (secado, molienda y peletización) para aumentar su valor económico y energético (Mediavilla et al. 2009). Específicamente se usa la densificación que, a través de sistemas mecánicos con alta presión y temperatura, con o sin incorporación de aditivos, generan combustibles sólidos de mayor eficiencia como los pellets y las briquetas, para mejorar algunas características y propiedades (Nogués et al. 2010).

En el caso de **Las briquetas** la compactación y calentamiento provocando internamente procesos termoquímicos que generan productos adherentes, favoreciendo la cohesión del material, comúnmente materia prima lignocelulósica. Las geometrías son muy variadas, se pueden encontrar con forma cilíndrica con diámetros entre 50 y 90mm y longitudes entre 74 y 300mm, con forma de prisma cuadrado o prisma hexagonal con un orificio en el centro, entre otras formas, mientras que **los pellets** son cilindros más pequeños elaborados mediante prensas de granulación que poseen unos rodillos encargados de compactar la biomasa (de forma natural o mediante la adición de elementos químicos no contaminantes) contra los agujeros de una matriz, el material extruido es cortado por unas cuchillas permitiendo obtener los pellets con geometrías que dependen del equipo utilizado, los diámetros puede oscilar entre 6 y 30 mm y longitud entre 10 y 70 mm, (Fernández 2007; Nogués et al. 2010).

Algunos de los factores que influyen en las características finales de las briquetas y los pellets son la materia prima utilizada, los dispositivo o equipos, los tipos de aglutinantes o agentes de cohesión (en caso de utilizarlos), entre otros factores. Por ejemplo, La densidad de las briquetas y pellets está ligada a la densidad inicial y al diseño y presión de compactación del equipo; la composición química depende exclusivamente de la biomasa inicial o de algún elemento químico utilizado en el proceso; la humedad depende del proceso de densificado y de la humedad inicial; y el poder calorífico superior depende de la composición química mientras que el inferior adicionalmente depende de la humedad inicial.

.2. COMBUSTIÓN DE BIOMASA

La combustión es una reacción química donde predomina un proceso de oxidación rápido de un combustible acompañada de un gran flujo de calor exotérmico, en la que se producen ruptura de enlaces químicos de sustancias que desaparecen (reactivos) y se generan nuevos enlaces de sustancias que aparecen, distintas a las iniciales (productos), en el proceso de ruptura y formación se da una liberación de energía térmica (Sánchez 2011). El agente oxidante empleado con mayor frecuencia es el aire y el oxígeno puro sólo se utiliza en aplicaciones especiales, p. ej., las de corte y soldadura. Según las características del proceso, la combustión se puede dar de manera completa o incompleta, en esta primera el combustible se quema en su totalidad haciendo que todo el carbono presente se transforme en CO_2 , todo el hidrógeno se transforme en H_2O , todo el azufre (en caso de contener) se transforme en SO_2 y cualquier otro elemento contenido se oxide, mientras que para la combustión incompleta la reacción no consume todo el combustible y se obtienen productos como C, CO, H_2 , OH, inquemados entre otros (Cengel y Michael 2011).

Para la combustión de biomasa el proceso no se da de manera homogénea debido a su complejidad estructural y a los diferentes comportamientos de componentes orgánicos (celulosa, hemicelulosa, ligninas, extractos, entre otros) e inorgánicos (agua, cenizas) de lo cual se pueden distinguir cuatro etapas sucesivas:

- *El secado y volatilización de compuestos ligeros*
- *Descomposición térmica de polímeros*

- *Combustión de la fracción volátil*
- *Combustión de la fracción carbonizada*

En la primera etapa se vaporiza el agua libre presente en los combustibles. Al considerar una partícula pulverizada de carbón o de madera que entra a un horno, la partícula recibe calor por convección sobre su superficie y por conducción dentro de ella provocando la vaporización y la salida de agua, fomentando la formación de elementos contaminantes y volátiles. Si la temperatura no es suficientemente se incrementa la formación de compuestos parcialmente oxidados y se reduce la eficiencia del proceso de combustión, esta etapa es altamente endotérmica, posteriormente, cuando se alcanza temperaturas entre 200 y 600 °C ocurre la *descomposición térmica de polímeros* como la celulosa, hemicelulosa y lignina. En esta etapa comienza una serie de reacciones pirolíticas donde la biomasa se transforma en un residuo carbonizado, una fracción de compuestos orgánicos volátiles (COVs) y una mezcla permanente de gases; CO₂, CO, H₂, CH₄, C₂H₄, C₂H₆.

En la tercera los compuestos volátiles generados por la descomposición térmica entran en combustión siempre que la temperatura sea elevada y la cantidad de oxígeno sea suficiente, se da una ruptura de los enlaces covalentes dando paso a la formación de radicales libres que son atacados por el oxígeno formando especies inestables que se transforman en compuestos parcial o completamente oxidados, por último, en la *combustión de la fracción carbonizada* el oxígeno puede fácilmente difundirse a través de la frontera externa del lecho y penetrar a la fracción carbónica donde reaccionan a

temperaturas superiores a 400 °C, se da una pérdida de masa debido al proceso y se liberan los no volátiles como el carbono y las cenizas, además, se presenta una reacción en la superficie del lecho generando monóxido de carbono y este reacciona fuera de la partícula generando dióxido de carbono (Soler y Gómez 2004; Fernández et al. 2015)

La combustión directa de la biomasa produce gases contaminantes y materia particulada que son liberado a la atmosfera. Los contaminantes más importantes generados son: óxidos de nitrógeno (NO_x), principalmente NO y NO_2 , óxidos de azufre SO_2 , monóxido de carbono CO, hidrocarburos C_xH_y y partículas; con una concentración menor pueden emitirse gases ácidos como HCL y metales trazas. Algunos contaminantes se generan por la presencia de N, S, CL, K, entre otros elementos, que hacen parte del combustible, mientras que las emisiones de CO e hidrocarburos, compuestos orgánicos volátiles (COVs) e hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs) se generan por una combustión incompleta. En cuanto a la materia particulada, esta incluye las cenizas de menor tamaño, el hollín e inquemados. La mayoría de partículas generadas en el proceso tienen un tamaño de partícula aerodinámica inferior a $1\mu\text{m}$ (Fernández et al. 2015).

.3. INTERCAMBIADORES DE CALOR

Actualmente con el desarrollo de las tecnologías a nivel industrial y de ingeniería se encuentran diferentes dispositivos que aprovechan los principios termodinámicos y de transferencia para aplicaciones específicas, ellos varían en configuración y características, y son diseñado según la función que desempeñen. Estos dispositivos

abarcen aplicaciones que van desde actividades para el confort humano hasta la producción de energía a gran escala, comúnmente se distinguen los intercambiadores de calor.

Estos equipos permiten transmitir energía térmica interna entre dos o más fluidos a diferentes temperaturas que generalmente están separados por una superficie que evita que se mezclen, son usados en la industria del petróleo y la energía (incluyendo energías renovables), del transporte y los combustibles, en industrias de refrigeración y aire acondicionado, en la criogenia, en la industria química y de alimentos, entre otras y se pueden clasificar según la construcción (doble tubo, tubo y coraza, tubo en espiral, tubo con aletas y otros), según el proceso de transferencia (de contacto directo e indirecto), según la fase de los fluidos (liquido-liquido, liquido-gas y gas-gas), según la disposición del flujo (flujo paralelo, en contracorriente y de flujo cruzado), según los mecanismos de transferencia (condensadores y evaporadores), entre otras clasificaciones (Thulukkanam 2013).

Los intercambiadores de calor de tubo y coraza, ver figura 2, están compuestos por una serie de tubos paralelos que proporcionan el área de transferencia y son fabricados de materiales altamente conductores térmicos por donde transita uno de los fluidos internamente, recubiertos por una coraza o caparazón que da soporte y permite el tránsito del otro fluido, el intercambio calor tiene lugar a medida que uno se mueve por dentro de los tubos y el otro por fuera de éstos (dentro de la coraza), por lo general se utilizan desviadores en esta última para forzar al fluido a moverse en dirección

transversal a los tubos y aumentar la turbulencia con el fin de mejorar la transferencia de calor y mantener un espaciado uniforme entre los tubos (Cengel y Ghajar 2011).



Figura 2. Intercambiadores de calor de tubo y coraza en la industria.

Catálogo de Edelflex S. A., extraído de <http://www.edelflex.com>

.4. MÉTODOS DE CÁLCULOS PARA LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN INTERCAMBIADORES

Los intercambiadores se pueden considerar como aparatos de flujo estacionario ya que funcionan durante largos periodos sin cambios en sus condiciones de operación e idealmente para facilitar los procedimientos de cálculo relacionados se pueden plantear las siguientes consideraciones:

- El gasto de masa de los fluidos es constante
- Las propiedades como la temperatura y la velocidad, en cualquier entrada o salida, permanece constantes.
- Se desprecian los cambios en la energía cinética y en la potencial.

- El calor específico constante en un valor promedio, el C_p de un fluido cambia con la temperatura; pero, en un intervalo específico de temperaturas, se puede considerar como una constante en algún valor promedio, con poca pérdida en la exactitud.
- La conducción axial de calor a lo largo del tubo suele ser insignificante y se puede considerar despreciable.
- Por último, se supone que la superficie exterior del intercambiador de calor está perfectamente aislada, de modo que no se tiene pérdida de calor hacia el medio circundante y cualquier transferencia de calor sólo ocurre entre los dos fluidos.

Con las idealizaciones propuestas se logran aproximaciones muy cercanas a la práctica, con estas suposiciones, la primera ley de la termodinámica requiere que la velocidad de la transferencia de calor desde el fluido caliente sea igual a la transferencia de calor hacia el frío (Cengel y Ghajar 2011). Según esto se tiene la ecuación de la conservación de la energía;

$$q = C_h(T_{h,in} - T_{h,out}) = C_c(T_{c,in} - T_{c,out}) \quad (1)$$

Donde C_h y C_c se definen como las razones de *capacidad calorífica* para el fluido caliente y frío respectivamente, y son equivalentes a;

$$C_h = \dot{m}_h c_{p,h} \quad y \quad C_c = \dot{m}_c c_{p,c} \quad (2)$$

Además, las corrientes fluidas al perder o absorber calor modifican su temperatura a lo largo del recorrido, por lo que existe un mapa de temperatura ver figura 3, coeficientes de película y coeficientes de transmisión de calor que varía dentro del intercambiador.

Así que es apropiado utilizar un coeficiente promedio de transferencia de calor y una diferencia media de temperatura de naturaleza logarítmica para la ecuación de termotransferencia, análoga a la ley de enfriamiento de Newton.

$$q = UA\Delta T_m = \frac{\Delta T_m}{R_t} \quad (3)$$

Donde la diferencia de temperatura media logarítmica puede calcularse con la ecuación 4 y depende del régimen de flujo, es decir, si el flujo es paralelo o en contracorriente, en la figura 3 se aprecian los perfiles de temperatura para cada caso.

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} \quad (4)$$

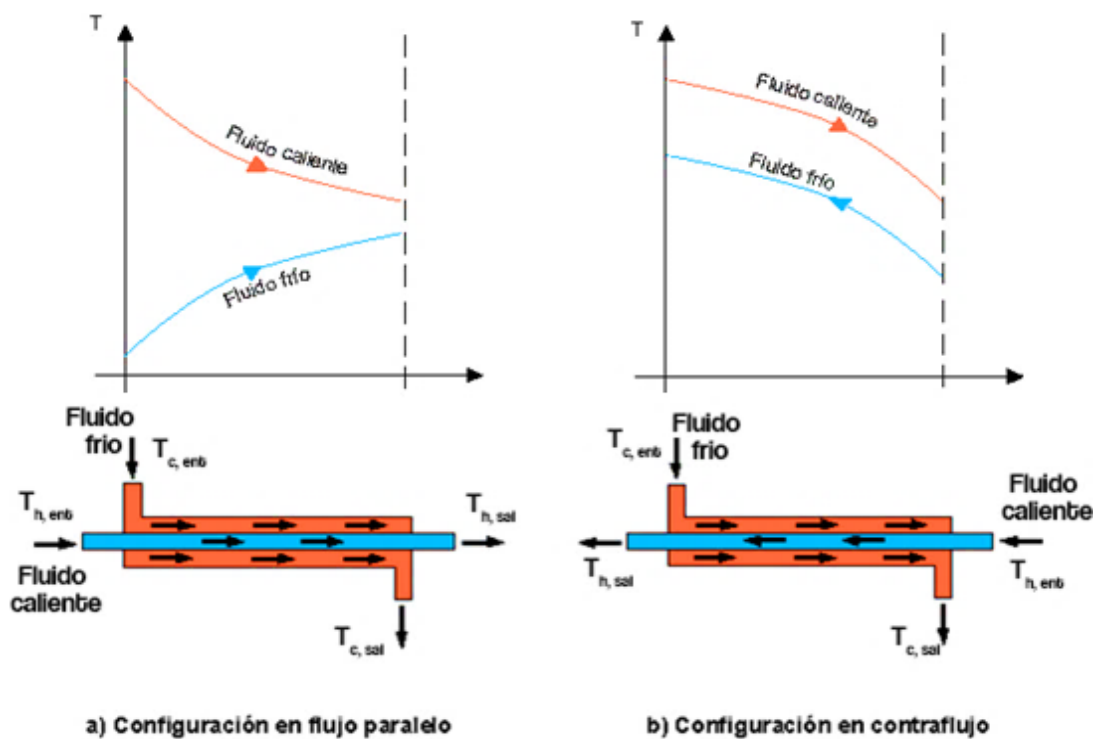


Figura 3. Perfil de temperatura y regímenes de flujo para intercambiadores de calor.

Fuente; (Betancourt, 2003)

Para los intercambiadores de calor con configuración de flujo para paralelo se tiene que:

$$\Delta T_1 = T_{h,ent} - T_{c,ent} \quad ; \quad \Delta T_2 = T_{h,sal} - T_{c,sal} \quad (5)$$

Mientras que para los intercambiadores de calor con configuración de a contraflujo:

$$\Delta T_1 = T_{h,ent} - T_{c,sal} \quad ; \quad \Delta T_2 = T_{h,sal} - T_{c,ent} \quad (6)$$

En la literatura se pueden encontrar algunos métodos para el análisis de intercambiadores de calor de donde se pueden destacar, el método de la diferencia media logarítmica de temperatura que facilita definir parámetros técnicos del intercambiador conociendo la variación de la temperatura y el gasto másico de un fluido, y el método de la efectividad–NUT, que permite predecir las temperaturas de salida de las corrientes de los fluidos conociendo los parámetros técnicos del intercambiador. En la ecuación 3 para un intercambiador de doble tubo y de flujo en contracorriente y se corrige con un factor F para otras configuraciones y disposiciones de flujo, F depende de la configuración geométrica del intercambiador y de las temperaturas de entrada y salida de las corrientes de fluido caliente y frío, $F = f(\text{configuración}, P, R)$, convirtiendo la ecuación 3 en;

$$q = UA\Delta T_m F \quad (7)$$

El factor de corrección F para tubos y corazas de un solo paso por los tubos y la coraza es igual a 1 (Jaramillo, 2007).

.4.1. Método de la efectividad – NTU

Debido a que en algunos casos se tornada tedioso el cálculo porque resultaba en complicadas iteraciones, Kays y London presentaron en 1955 un procedimiento llamado método de la efectividad-NTU, el cual simplificó el análisis de los intercambiadores de calor. Este método se basa en un parámetro adimensional llamado efectividad de la transferencia de calor es definido en la ecuación 8:

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}}{Q_{max}} = \frac{\text{razón de transferencia de calor real}}{\text{razón máxima posible de transferencia de calor}} \quad (8)$$

Donde la razón de la transferencia de calor real se puede determinar de la ecuación 1 y la máxima transferencia de calor posible se puede calcular con la ecuación 9. Un intercambiador alcanzará su valor de transferencia máximo cuando el fluido frío se caliente hasta la temperatura de entrada del caliente o el fluido caliente se enfríe hasta la temperatura de entrada del frío. Estas dos condiciones límites no se alcanzarán de forma simultánea así que el fluido con la razón de capacidad calorífica menor experimentará un cambio más grande en la temperatura y, de este modo, será el primero en experimentar la diferencia máxima de temperatura.

$$Q_{max} = C_{min}\Delta T_{max} = C_{min}(T_{h,in} - T_{c,in}) \quad (9)$$

C_{min} , es el mínimo entre C_h y C_c , luego de una serie de artificios matemáticos se llega a que las relaciones de la efectividad para los intercambiadores de calor están dadas por:

$$NTU = \frac{U \cdot A_s}{C_{min}} \quad (10)$$

$$C = \frac{C_{min}}{C_{max}} = \frac{(\dot{m}c_p)_{min}}{(\dot{m}c_p)_{max}} \quad (11)$$

Para un intercambiador de calor tipo doble tubo a contra flujo se tiene como relación de efectividad es:

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NTU(1-c)]}{1 - c \exp[-NTU(1-c)]} \quad (12)$$

MATERIALES Y MÉTODOS

.1. DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL BANCO DE INTERCAMBIADORES DE CALOR

Se planteó el diseño de un banco de intercambiadores de calor para analizar la transferencia de calor entre gases de combustión de pellets de biomasa y agua. Básicamente se acoplaron dos partes, una de circulación de gases de combustión y otra de circulación de agua. Durante el desarrollo de esta fase del trabajo de grado se diseñaron tres propuestas del montaje, que se pueden apreciar en el Anexo 1, donde se escogió la opción 3. Adicionalmente con esta opción se buscaba recolectar los gases en la zona de mayor temperatura del combustor (dato empírico de combustiones previas) y minimizar la resistencia térmica para cada dispositivo (perdidas por pared) y resistencia al flujo (por diferentes cambios de sección). El sistema se definió de tal forma que se podían utilizar dos de los tres intercambiadores disponible para cualquier combinación posible. El adaptador se diseñó con dos salidas, una que representa la línea de transferencia de calor principal de calentamiento (longitudinal) y una línea de precalentamiento (transversal) que admite el resto de gases que no alcanzaron la principal. Esta primera consta de una copa que recoge los gases del proceso de combustión, localizada al interior del combustor, en uno de sus extremos se une una reducción de campana, continuando con un tubo acero galvanizado y una unión lisa roscada al adaptador. Por otra parte, el lado externo del adaptador presenta una terminación roscada que junto a un juego de bushing admite cualquier intercambiador de calor. La segunda línea tiene un niple con un comportamiento análogo a la primera. Además, se usaron elementos para acoplar termocuplas a la configuración. Ver figura 4.

Partiendo de lo anterior, se definió la circulación del agua en contraflujo a los gases. Se inició en un recipiente de 20 L a una altura de 165 cm, continuando con una manguera de uso común adaptada a una reducción roscada según el precalentador, seguidamente hacia el intercambiador principal se dio el recorrido con una manguera de 1 in, resistente a altas temperaturas con acoples hidráulicos en ambos extremos, al final se adaptó una válvula para controlar el flujo de líquido. En la figura 5 se puede apreciar el diseño final con los elementos necesarios para el funcionamiento y en la tabla 1, algunas consideraciones y criterios para la fabricación y ensamblaje del banco.

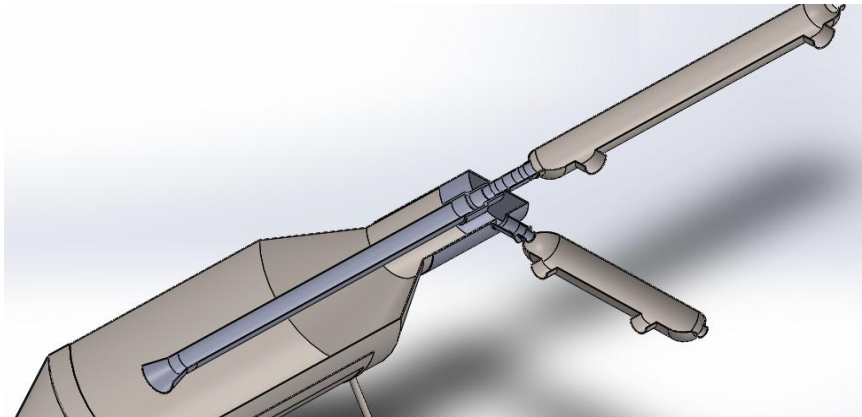


Figura 4. Línea calentamiento y de precalentamiento.

Fuente; autores, 2017

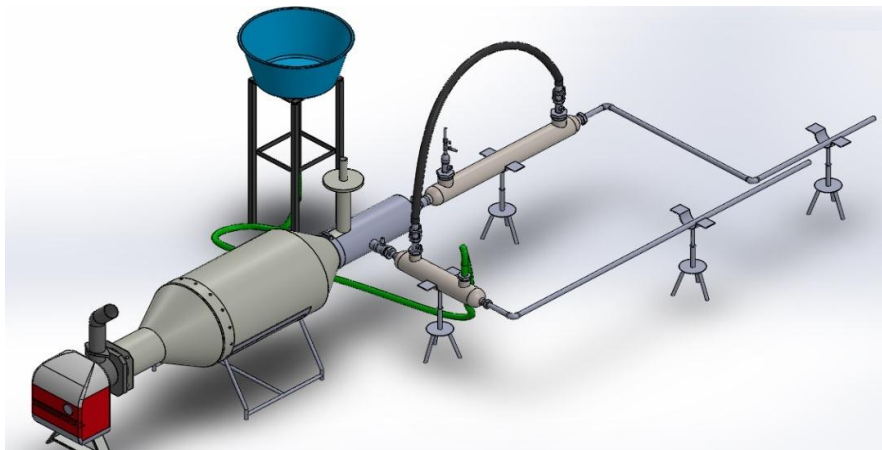


Figura 5. Diseño y montaje final del banco.

Fuente; autores, 2017

Tabla 1. Consideraciones y criterios para la fabricación y ensamblaje del banco de intercambiadores de calor



Sistemas	Consideraciones de diseño	Proceso de fabricación y ensamble	
<p>Sistema de circulación de gases</p> <p>Copa de recolección; $\varnothing_{m\acute{a}x}=14cm$, $\varnothing_{m\acute{i}n}=2in$</p> <p>Reducción de campana; 2-1½ in NPT(M)</p> <p>Tubería Galvanizada; 1½in×70cm</p> <p>Adaptador; $\varnothing=15cm$ y 23 cm de longitud</p> <p>Bushing; 2-1 in, 1½-1 in, 1-¾</p> <p>Uniones lisas con perforaciones para termocuplas</p> <p>Empaques o-ring y silicona para alta temperatura</p>	<p>Las medidas de la copa y el adaptador se establecieron según restricciones geométricas del combustor.</p> <p>Las medidas de los accesorios se tomaron según la referencia de entrada del intercambiador BT-ST-300-B del lado de los tubos, pues presenta la mayor tasa de transferencia de calor nominal según especificaciones de fábrica.</p> <p>La longitud total al interior del combustor del sistema de recolección de gases se estableció para la zona de mayor temperatura. Entre 70 y 80 cm de la boca final del dispositivo según datos empíricos de combustiones previas.</p> <p>Se utilizaron materiales con recubrimientos galvanizado ya que son resistentes a agentes corrosivos y se prestan fácilmente para procesos de corte y soldadura</p> <p>A la entrada y salida de los intercambiadores se le adaptaron uniones lisas con apéndices perforados para las termocuplas de diámetros 3/16 in y 1/4 in</p>	<p>Para el adaptador se utilizó una lámina de hierro de 1/8 in, se dobló y soldó longitudinalmente para formar un cilindro de. Se le soldó una tapa circular y se cortó una U alargada en la parte superior para encajar en el combustor, por último, se perforaron y soldaron niples 1 ½ in NPT(M) sobre la tapa y otra sobre la superficie lateral del cilindro.</p> <p>Para la construcción de la copa se realizó el desarrollo en un lamina de acero galvanizado calibre 20, se dobló para una junta de costura, finalmente se le soldó a un niple cortado con rosca 2 in NPT(M).</p> <p>Se ensambló el adaptador al combustor ajustado por una abrazadera metálica, se roscaron los accesorios, recubiertos con teflón, y se conectaron los intercambia-dores de calor en cada terminal.</p> <p>Para las adaptaciones de las termocuplas se hicieron perforaciones de ½ in y se insertaron tornillos en algunas uniones, los tornillos se perforaron axialmente de 3/16 in o 1/4 in, y se ajustaron con tuercas y empaques para evitar fugas.</p> <p>Para las fugas se utilizaron empaque o-ring y silicona térmica con resistencia de hasta 600 °C.</p>	

Tabla 1 (Continuación). Consideraciones y criterios para la fabricación y ensamblaje del banco de intercambiadores de calor

Sistemas	Consideraciones de diseño	Proceso de fabricación y ensamble	
<p>Sistema de circulación de agua</p> <p>Recipiente de 20 L</p> <p>Niples de 1 in</p> <p>Manguera de jardín ¾ in x 3m</p> <p>Acoples hidráulicos Camlock de 1in</p> <p>Manguera de caucho para vapor de 1 in x 1 m</p> <p>Válvula para gas de 5/8 in</p>	<p>El recipiente se ubicó a una altura 1,20 m respecto los intercambiadores para aprovechar la gravedad con fuerza impulsora del fluido.</p> <p>Se decidió utilizar acoples hidráulicos tipo Camlock para las entradas y salidas de agua para facilitar el cambio de posición de los intercambiadores de calor.</p> <p>Se seleccionó la manguera para el transporte de agua del precalentador al evaporador que resistiera temperaturas alrededor de 120 °C.</p> <p>Las conexiones principales se establecieron de 1 in NPT(M) para estandarizar, la medida fue la más asequible en el mercado local para los acoples hidráulicos tipo Camlock.</p> <p>La válvula en que finaliza el sistema de circulación de agua se dispuso para controlar el flujo volumétrico.</p>	<p>Se instaló el recipiente a la altura dada, sobre una estructura presente en el laboratorio</p> <p>Se instalaron los acoples hidráulicos a la manguera para vapor.</p> <p>Se roscaron los bushing del lado de la coraza según el intercambiador usado y se instalaron niples con tornillos perforados</p> <p>Se ajustó la válvula de salida de agua</p> <p>Se sellaron fugas con teflón y silicona de alta temperatura</p> <p>Se diseñaron y fabricaron soportes con alturas ajustables para reposar los intercambiadores y permitir que estos dispositivos permanezcan horizontales.</p> <p>Los dispositivos e instrumentos utilizados se pueden apreciar en el anexo 2, donde se detallan algunos atributos y características</p>	

2. DISEÑO DE LA BATERÍA DE MEZCLAS

Se utilizaron cinco tipos de biomasa provenientes de residuos agroindustriales, Arroz, Ajonjolí, Algodón, Maíz y Coco para la elaboración de las mezclas. Se realizó una optimización de la batería de mezclas mostrada en la tabla 2 tomando como variable de respuesta la temperatura de los gases. Esto se asumió porque el análisis de transferencia exige conocer la temperatura, las propiedades de los gases de combustión (que dependen de la composición) y el gasto másico, por criterios de cálculos se asume un valor promedio para las propiedades de los gases y el flujo másico constante, reduciendo la batería a las composiciones de las mezclas y la temperatura de gases. La tabla 2 se obtuvo de informes desarrollados en el laboratorio de energías renovables, UPB - Montería, en la cual concluyeron una batería de mezcla optimizada para factores de durabilidad, realizaron mediciones de parámetros de combustión para pellets donde se obtuvieron los resultados de temperatura de gases, eficiencias, partículas contaminantes, entre otros factores.

Tabla 2. Batería de mezcla de partida para cinco residuos biomásicos de la región

Exp	Arroz (%)	Ajonjolí (%)	Algodón (%)	Maíz (%)	Coco (%)	T _g (°C)
1	3,06	23,89	47,78	12,50	12,780	317,95
2	10,56	23,89	45,28	7,50	12,780	355,92
3	0,00	40,00	60,00	0,00	0,000	286,21
4	15,00	40,00	0,00	45,00	0,000	288,81
5	8,06	23,89	47,78	7,50	12,780	324,88
6	0,00	40,00	0,00	0,00	60,000	242,18
7	3,060	23,89	12,78	12,50	47,780	390,68
8	6,11	27,78	25,56	15,00	25,560	399,10
9	10,00	20,00	0,00	0,00	70,000	379,17
10	15,00	20,00	0,00	65,00	0,000	382,64
11	3,060	23,89	17,78	7,50	47,780	288,15

Exp	Arroz (%)	Ajonjolí (%)	Algodón (%)	Maíz (%)	Coco (%)	T_g (°C)
12	8,060	23,89	12,78	7,50	47,780	288,15
13	3,06	33,89	12,78	7,50	42,780	332,13
14	15,00	40,00	0,00	0,00	45,000	365,91
15	15,00	40,00	45,00	0,00	0,000	128,41
16	3,06	23,89	12,78	47,50	12,780	430,84
17	0,00	40,00	0,00	60,00	0,000	263,31
18	3,06	28,89	12,78	7,50	47,780	325,21
19	10,56	33,89	35,28	7,50	12,780	361,31
20	10,56	33,89	12,78	30,00	12,780	420,37
21	0,00	20,00	0,00	10,00	70,000	370,20
22	3,06	33,89	12,78	37,50	12,780	354,60
23	10,56	33,89	12,78	7,50	35,280	338,89
24	15,00	20,00	0,00	0,00	65,000	225,36
25	3,06	33,89	42,78	7,50	12,780	301,41
26	0,00	20,00	70,00	10,00	0,000	190,07
27	0,00	20,00	70,00	0,00	10,000	291,51
28	10,00	20,00	70,00	0,00	0,000	293,33
29	10,56	23,89	12,78	40,00	12,780	475,36
30	15,00	20,00	65,00	0,00	0,000	262,05
31	3,06	28,89	47,78	7,50	12,780	438,00
32	0,00	30,00	70,00	0,00	0,000	164,24
33	3,06	23,89	47,78	7,50	17,780	344,68
34	0,00	20,00	0,00	80,00	0,000	436,91
35	0,00	30,000	0,00	0,00	70,000	359,29
36	10,56	23,89	12,78	7,50	45,280	299,14
37	0,00	20,00	10,00	0,00	70,000	291,62

Fuente: Mendoza, J., 2016. Convenio especial de cooperación n° 753. Proyecto de desarrollo de integración tecnológica de recursos energéticos renovables en sistemas productivos agrícolas y agroindustriales Montería, Córdoba, Caribe.

Para la optimización se utilizó el software estadístico Minitab 17, donde se evaluaron modelos de regresión no lineal para describir las relaciones estadísticas entre las mezclas de biomasa y la temperatura. Se analizaron los valores estadísticos para comparar la potencia explicativa de los modelos, por ejemplo, con R-Cuadrado se verificó el porcentaje de variación de la respuesta en relación con las variables exógenas, con R-Cuadrado Ajustado se midió el

porcentaje de variación en la variable de la respuesta explicada por su relación con una o más variables endógenas ajustado para el número de predictores. Estos criterios son importantes porque al agregar o quitar un término se esperaría que R-Cuadrado Ajustado siempre aumentara o disminuyera respectivamente para cualquier modelo, sin embargo, algunas variaciones en R-Cuadrado podrían atribuirse únicamente a razones aleatorias (Guerra et al. 2003). También se tuvo en cuenta el error estándar de la regresión S , mientras la ecuación mejor pronostique la respuesta más bajo será el valor de S .

Por último, se observaron los valores inusuales o atípicos que se presentaban en cada modelo. Una vez obtenido el modelo y a partir de los datos arrojados para la regresión seleccionada, se realizó la optimización de las mezclas según las siguientes consideraciones; a partir de varias pruebas de combustión con mezclas aleatorias se observó que para alcanzar 100 °C en el agua era necesario un rango de temperaturas en los gases de combustión entre 300 °C y 440 °C para 40 min de combustión aproximadamente, de lo cual se estableció un límite inferior 300 °C y un objetivo de 440 °C para la optimización. El límite superior se tomó de 500 °C, ya que la temperatura máxima de operación para empaques y sellos del montaje era de 550 a 600 °C.

.3. PREPARACIÓN Y ELABORACIÓN DE LOS PELLETS

Se recolectaron y almacenaron residuos de cultivos de la región adquiridas en los municipios de Cereté, Montería e inmediaciones, fueron utilizadas del arroz la cascarilla, para el ajonjolí se usaron las espigas sobrantes luego del secado y cosechado, además para el algodón se utilizó la cacota y otras partes de la planta, tusa de maíz y concha de coco, ver Anexo 3. Las biomásas fueron llevadas al laboratorio de energías renovables donde fueron trituradas a partir

del equipo PENAGOS TRITURADOR PICADOR TP-24, a excepción de la cascarilla de arroz que debido a su tamaño no lo requería y el coco que se obtuvo ya picado. A partir de pruebas de combustión experimentales con mezclas aleatorias se determinó que aproximadamente 2 kilogramos son necesarios para obtener los datos respuesta para 30 min de experimentación y como el banco tiene 6 configuraciones posibles, en total se debieron utilizar 12 kg por cada una. Por último, se peletizaron a través de la PELETIZADORA ZLSP S-230B, ver Anexo 4.

.4. MÉTODOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Para la realización de las pruebas experimentales se consideraron algunos parámetros obtenidos en pruebas pilotos, se armaron los montajes disponibles para cada combinación de intercambiadores con su respectiva instrumentación y se procedió al inicio de las pruebas y a la captura de los datos. Se armaron 6 tipos de montajes usando los accesorios necesarios para las conexiones, en el Anexo 2 se detalla cada uno de los modelos de intercambiadores usados en la tabla 3.

Tabla 3. Configuraciones del montaje con diferentes combinaciones de intercambiadores

	Línea calentamiento	Línea de precalentamiento
Montaje 1	BT-ST-300-B	BT-ST-155-B
Montaje 2	BT-ST-155-B	BT-ST-300-B
Montaje 3	BT-ST-85-1	BT-ST-300-B
Montaje 4	BT-ST-85-1	BT-ST-155-B
Montaje 5	BT-ST-155-B	BT-ST-85-1
Montaje 6	BT-ST-300-B	BT-ST-85-1

Luego se instalaron los instrumentos de medición de temperatura (termocuplas tipo K) y se conectaron a los dos Psicrómetro y al Termómetro de cuatro canales, y el montaje de registro en tiempo real, ver figura 6 se puede ver el esquema que ilustra la instrumentación utilizada para la captura de datos y en el Anexo 2 se detallan los instrumentos utilizados para las mediciones.

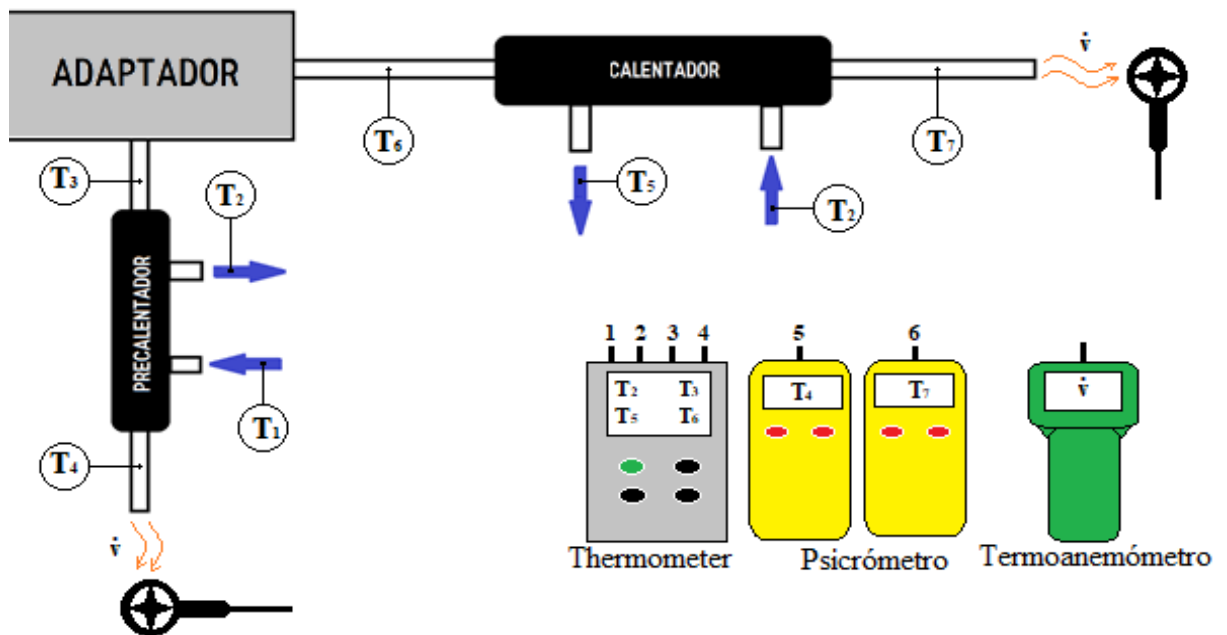


Figura 6. Esquema del montaje e instrumentación para las pruebas

Al no contar con tarjetas de adquisición de datos que registrara continuamente las temperaturas se recurrió a la técnica de *timelapse*, basados en investigaciones de diversas áreas del conocimiento en las cuales se utiliza esta técnica, en la actualidad esto se puede ver

en trabajos donde se registra el comportamiento de una muestra durante el transcurso del tiempo, por ejemplo, el desarrollo embrionario "in vitro" (Castro 2014.).

Para la técnica se utilizó la aplicación FrameLapse de un smartphone Samsung Galaxy Note 3, capturando una foto de las temperaturas cada 10 segundos y exportándolas al formato video mp4, con una velocidad de 30 fotogramas por segundo, para posteriormente ser revisado en el software de edición de video Adobe Premiere CS5 fotograma por fotograma. Al iniciar la captura de datos se tomó nota en la bitácora de pruebas (ver figura 7) donde se registraba la hora de inicio de la prueba, los tiempos de las descargas de pellets y las anotaciones generales de cada prueba.

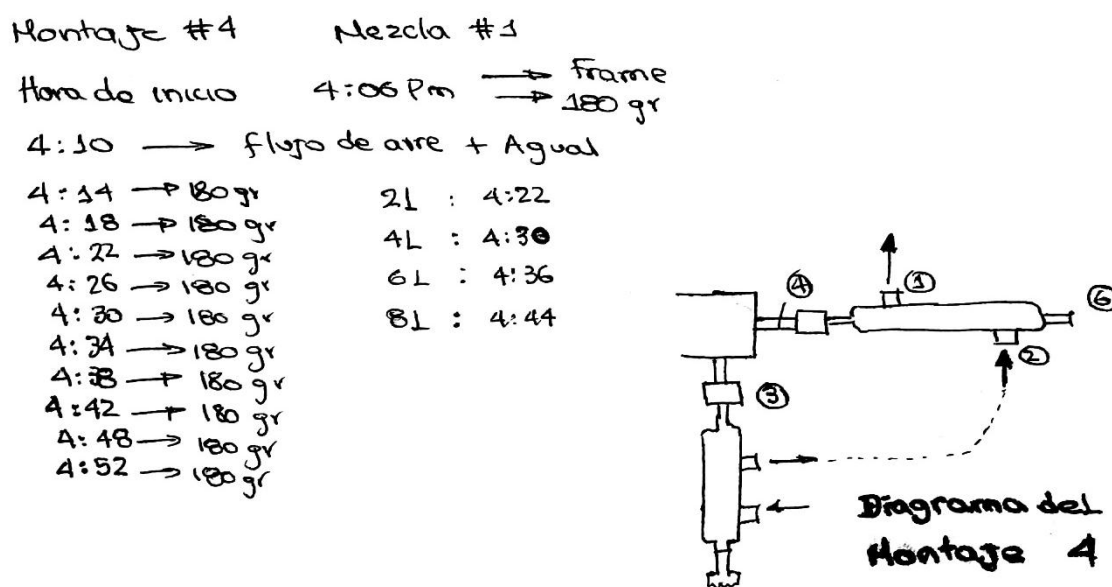


Figura 7. Bitácora de pruebas experimentales

Con esta información posteriormente se guio el proceso de sistematización de los datos, para esto se creó un formato de tabulación de los datos en excel 2016, que especificaba el número

del montaje, la mezcla probada, los tiempos de la prueba, el orden de los fotogramas y la posición del cabezal y se llenó con los datos de temperaturas sacados del software de edición de vídeos como se muestra en la figura 8

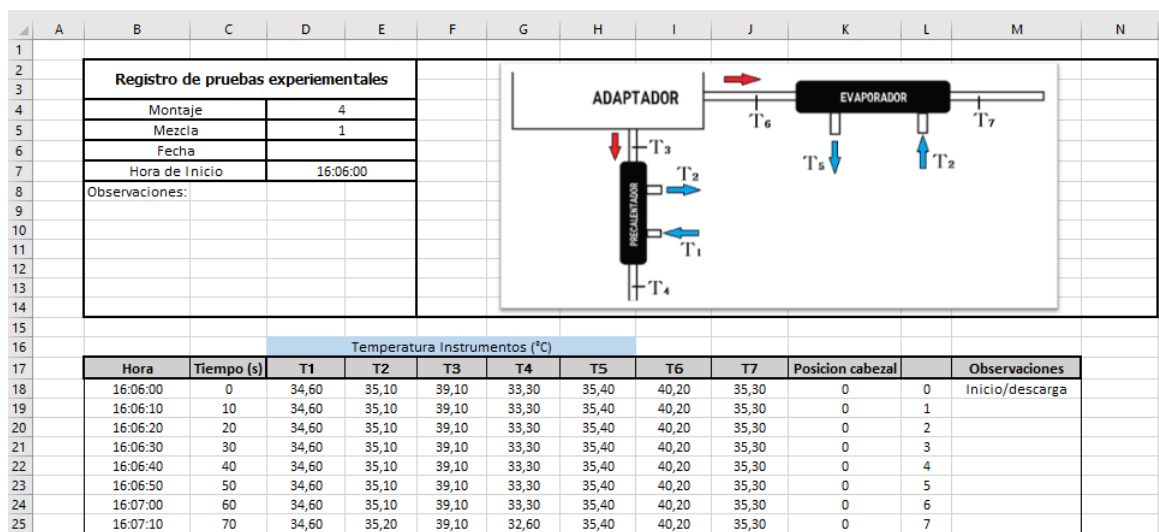


Figura 8. Pantallazo de plantilla Excel 2016 y registro de temperaturas

Las otras variables medidas fueron el flujo másico del agua, del aire de entrada y de los gases de combustión. El sistema de circulación de agua finalizaba con una válvula que direccionaba el flujo hacia un tanque graduado, en la bitácora se anotaba el tiempo para el volumen almacenado en el tanque. Para el flujo de aire se midió la velocidad de entrada a la cámara con la ayuda del Termoanemómetro CFM/CMM HD300, de igual manera se midieron las dos salidas de las líneas del sistema de circulación producto de los gases de combustión.

.4.1. Pruebas pilotos

Se realizaron pruebas pilotos donde se estandarizaron los pasos del proceso y se identificaron algunos parámetros de manera empírica. Para las pruebas se utilizaron mezclas de biomasa entre ajonjolí, algodón, coco, cascarilla de arroz y tusa de maíz en porcentajes no definidos y se usó el intercambiador de mayor tasa nominal de transferencia en la línea de calentamiento y según mayor para el precalentamiento.

Uno de los parámetros definidos de la observación fue el gasto másico de la biomasa, suministrando 180 gramos de pellets cada 4 minutos se presentó un comportamiento más homogéneo con un tiempo de combustión y una intensidad de llama muy parecidos. Al inicio se realizaba la descarga con una taza graduada que indicaba la masa según el nivel de pellets, pero se corría el riesgo de errores humanos de medición, como el paralelismo, entonces se decidió preparar cada descarga previamente e individualmente en empaques individuales en bolsas plásticas con una masa de 180 g.

Para cada cambio de configuraciones se evidenció la necesidad sustituir el aislante que evita las fugas en el sistema de distribución de agua, de igual manera sustituir los empaques que presenten fallas, producto de la fatiga térmica durante el funcionamiento del equipo.

El hogar de la cámara de combustión se tiene una resistencia eléctrica de 220V que eleva la temperatura de los pellets hasta la ignición, este proceso necesita una etapa de precalentamiento para generar la combustión junto al flujo de aire, empíricamente se determinó que ocurre en un tiempo aproximado de 4 minutos.

.4.2. Pruebas Experimentales

Se realizaron 30 pruebas experimentales (6 montajes \times 5 mezclas) donde se obtuvieron datos para cada una de las mezclas evaluadas en cada una de las configuraciones posibles del montaje del banco de intercambiador de calor, estas pruebas se realizaron con los parámetros definidos anteriormente y ajustada con las experiencias de las pruebas pilotos. Se estableció una nomenclatura para identificar las pruebas como se puede apreciar en la tabla 4.

Tabla 4. Nomenclatura utilizada para identificar las pruebas

	Mezcla 1	Mezcla 2	Mezcla 3	Mezcla 4	Mezcla 5
Montaje 1	M1-1	M1-2	M1-3	M1-4	M1-5
Montaje 2	M2-1	M2-2	M2-3	M2-4	M2-5
Montaje 3	M3-1	M3-2	M3-3	M3-4	M3-5
Montaje 4	M4-1	M4-2	M4-3	M4-4	M4-5
Montaje 5	M5-1	M5-2	M5-3	M5-4	M5-5
Montaje 6	M6-1	M6-2	M6-3	M6-4	M6-5

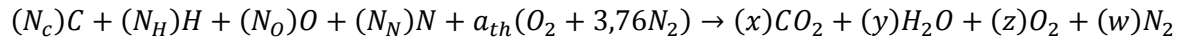
La experimentación iniciaba con la preparación de las masas de pellets, para cada prueba se medía 180 gramos, para un total de 1620 gramos durante toda la prueba, esto equivale a 9 descargas. Luego se daba inicio al proceso de precalentamiento de la cámara de combustión junto a la primera descarga de pellets, la resistencia eléctrica se calentaba durante 4 minutos, lo que provocaba que los pellets estuvieran listos para la ignición simultáneamente iniciaba el flujo de aire para la combustión.

Luego del proceso de precalentamiento de la biomasa en el combustor se iniciaba la circulación del flujo de aire el cual ocasionaba la ignición y el inicio de la combustión, luego de los primeros 4 minutos de combustión de los pellets se realizaba la próxima descarga de 180 gramos, y así consecutivamente hasta completar los 1620 gramos de biomasa evaluada en 32 minutos de prueba, para la última descarga el intervalo de tiempo de combustión aumentaba a 6 minutos para realizar el máximo consumo del combustible, luego de esto se suspendía el flujo de aire y se dejaba entre 4 y 7 minutos más para la recolección de datos y apreciar así un lapsus del comportamiento del enfriamiento del equipo en esta etapa.

.5. MODELACIÓN DEL BANCO DE INTERCAMBIADORES DE CALOR

Para la modelación del banco se utilizó el software EES (Engineering Equation Solver) 2004 versión académica se desarrolló un código de programación con las ecuaciones necesarias para calcular el rendimiento y se diseñó una interfaz gráfica para facilitar el ingreso de las variables y la corrida del software. En el Anexo 8 se aprecia el código ingresado en el software con el paquete de ecuaciones necesarias para el cálculo. Se inició planteando el análisis elemental de cada mezcla (C H O N) calculado con las fracciones de componentes y análisis elemental de las biomásas implicadas. Del informe del Laboratorio Ciencias de la Energía de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín 2104, (ver Anexo 7) se obtuvo la composición de C, H, O, N de muestras de biomasa residual de cultivos en estudio para este trabajo. Seguidamente, se planteó un balance estequiométrico teórico de la reacción de combustión, igualando las moles de los reactivos con las moles de

los productos para cada componente, asumiendo una combustión completa con exceso de aire mediante la siguiente reacción:



a_{th} , representa la cantidad de aire suministrada a la combustión que es calcula a través de la velocidad, la densidad y el área transversal de salida del aire y las moles de los reactivos (mezclas) se calculan con la ecuación 13 a partir de la cantidad de biomasa que interviene en la reacción y las fracciones de elementos de la mezcla

$$N_C = \frac{m \cdot C}{PM_C} \quad ; \quad N_H = \frac{m \cdot H}{PM_H} \quad ; \quad N_N = \frac{m \cdot N}{PM_N} \quad ; \quad N_O = \frac{m \cdot O}{PM_O} \quad (13)$$

m , masa de pellets de biomasa de entrada 180 g cada 4 min (0,0075 kg/s)

C, H, O, N , la fracción de Carbono, Hidrogeno, Oxigeno y Nitrógeno en la mezcla.

PM , peso molecular de cada elemento, C, H, O y N son 12, 1, 16, y 14 Kg/Kmol respectivamente

Para cada uno de los componentes del gas producto se obtienen las cantidades molares que interviene en la combustión x, y, z y w y se calculan las fracciones correspondiente ($Y_i = \text{mol de compuesto/moles totales}$). Se determina teóricamente algunas propiedades específicas (intensivas) como densidad y calor específico, asumiendo un comportamiento de gas ideal a través de la ecuación 14.

$$c_p = \sum x_i c_{pi} \quad (14)$$

El c_p de cada componente se insertó con el atributo “Funcion Information – Fluid properties”, ver figura 8, especificando el compuesto y la temperatura promedio entre la entrada y salida de cada intercambiador.

El flujo másico de los gases se puede calcular con la ecuación 15, donde la densidad ρ se determina con la ecuación 16, el área de sección transversal A corresponde a la del instrumento de medición Termoanemómetro y la velocidad de los gases ϑ medida con él.

$$\dot{m} = \rho A \vartheta \quad (15)$$

$$\rho = \sum x_i \rho_i \quad (16)$$

Análogamente, ρ de cada componente se insertó con el atributo “Funcion Information – Fluid properties”, ver figura 9, especificando el compuesto y la temperatura promedio entre la entrada y salida de cada intercambiador y la presión del gas (101,3 KPa por ser un sistema abierto sometido solo a presión atmosférica).

Se establecen las condiciones del agua, flujo másico calculó de la ecuación 17, dónde el flujo volumétrico se mide con un recipiente titulado y un cronometro durante el transcurso de cada prueba.

$$\dot{m} = \rho \dot{V} \quad (17)$$

La densidad del agua se estableció como constante y el calor específico c_p también, tomando valores de 1000 kg/m^3 y $4,18 \text{ KJ/kg } ^\circ\text{C}$ respectivamente. Estas consideraciones se asumieron debido a que las variaciones respecto a la temperatura no son significativas para los rangos obtenidos durante las pruebas

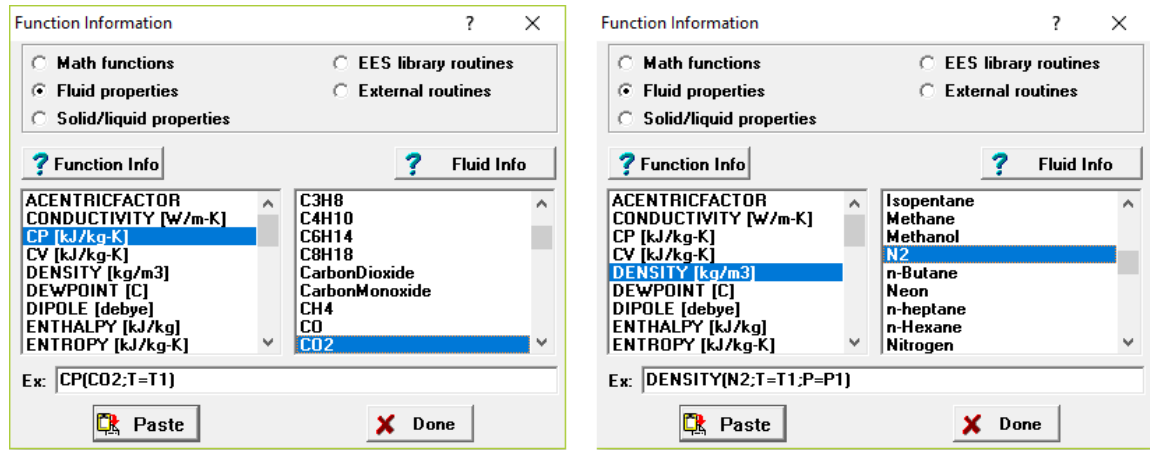


Figura 9. Function Informations – Fluid properties, para calor específico y densidad.

A continuación, se desarrolló el cálculo del rendimiento o efectividad del banco, se determinó para el intercambiador en la línea de precalentamiento y en la línea de calentamiento, se tomó como punto de partida la ecuación 8, del cual el calor real transferido de fluido a fluido corresponde al calor absorbido por el agua. La diferencia de energía a la entrada y salida del agua, sumada a las pérdidas de energía por paredes y fugas, corresponden a la energía cedida por el gas. Haciendo un balance de energía del sistema se tiene la ecuación 18.

$$Q_{gas} = Q_{agua} + Q_{pérdidas} \quad (18)$$

Donde Q_{real} es el calor transferido de un fluido al otro durante el proceso, puede considerarse que el calor real es el absorbido por el agua ya que es el último receptor de energía durante las pruebas, puede calcularse a partir de la ecuación 19;

$$Q_{real} = Q_{agua} = [\dot{m} c_p (T_{salida} - T_{entrada})]_{agua} \quad (19)$$

$Q_{m\acute{a}x}$ está dado por la ecuación 9, el valor correspondiente para capacidad calorífica mínima se escogió comparando el mínimo valor entre la capacidad calorífica del agua y la del gas, y

el delta de temperatura máxima corresponde a la diferencia de temperatura entre la entrada del gas y la entrada del agua. Al simplificar las ecuaciones se llegaron a dos condicionales para el cálculo del rendimiento;

Si el C_p mínimo es del agua, la efectividad se reduce a la ecuación 20.

$$\varepsilon = \frac{(T_{salida})_{agua} - (T_{entrada})_{agua}}{(T_{entrada})_{gas} - (T_{entrada})_{agua}} \quad (20)$$

Si el C_p mínimo es de los gases la efectividad se convierte en la ecuación 21.

$$\varepsilon = \frac{(\dot{m} * c_p)_{agua} * [(T_{salida})_{agua} - (T_{entrada})_{agua}]}{(\dot{m} * c_p)_{gas} * [(T_{entrada})_{gas} - (T_{entrada})_{agua}]} \quad (21)$$

Se compararon las capacidades caloríficas del agua y de los gases y se escogió la ecuación 21 porque el c_{\min} fue el de los gases (en la sección 4.6. se explica con mayor detalle), se digitaron las ecuaciones 10, 11 y 12 para calcular las unidades de transferencia de calor, la relación de capacidades caloríficas y la expresión de efectividad ligada a estos parámetros.

Cabe resaltar que las propiedades definidas internamente dentro del código dependen de la temperatura y la temperatura varia en el tiempo debido esto se estableció un cálculo para el rendimiento del banco planteando 181 iteración para cada prueba donde se graficó las efectividades vs tiempo según cada mezcla en el intercambiador en la línea de precalentamiento y el de la línea de calentamiento. Se realizaron está cantidad de corridas debido a la información analizada en los perfiles de temperatura (sección 4.4.1), con un tiempo inicial de 600 s (10 min) y final de 2400 s (40 min). Además, las temperaturas se

insertaron como tablas de datos, ver Anexo 8, para que sus corridas, la temperatura inicial del agua T_1 se midió para cada prueba y consideró constante durante el transcurso de éstas, el resto de variables de entrada definidas en la interfaz fueron aquellas que permanecían constantes durante cada prueba como se puede identificar en los valores encerradas en recuadro del Anexo 9, las flechas azules indican el flujo de agua y las rojas el flujo de gas

RESULTADOS Y DISCUSIONES

.1. BANCO DE INTERCAMBIADORES DE CALOR

El diseño del banco de intercambiadores de calor está ligado a un concepto basado en el principio de crear un equipo que sea simple en su implementación, operación y mantenimiento. Las características del diseño en términos generales fueron aplicadas teniendo en cuenta la facilidad de montaje entre las diferentes posiciones de los intercambiadores en la línea de calentamiento y precalentamiento, ya que el uso para el estudio en este trabajo se basa en la experimentación en los diversos montajes posibles. Una de las premisas que se tuvo en cuenta fue no intervenir el combustor por lo cual surge la propuesta del diseño de un equipo con la capacidad de instalarse o desinstalarse sin alterar las condiciones de este, ver figura 10.



Figura 10. Fotografía del equipo puesto en marcha.

Como los gases que circulan por el sistema son productos de la combustión se tuvo en cuenta que el diseño permitiera con facilidad realizarle tareas de mantenimiento y limpieza. Todo el diseño estuvo enmarcado en la idea de reducir el costo del equipo lo máximo posible, esto se pudo evidenciar en el costo inicial del proyecto y el costo final, se pasó de un presupuesto de 25 millones de pesos (ver figura 11) y a partir de los avances en el diseño logramos construirlo con 1,5 millones de pesos (ver figura 12), sin sacrificar las funciones y operabilidad de equipo. El avance del diseño se puede ver en el anexo 1

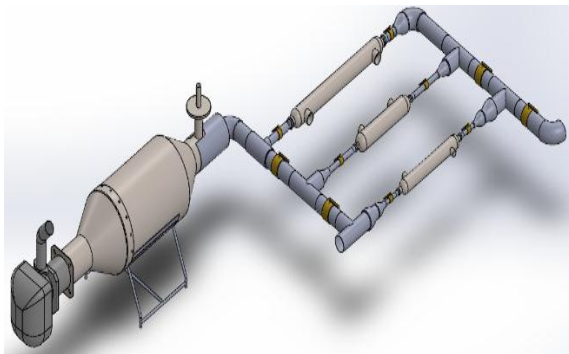


Figura 11. Diseño inicial banco.

Fuente: Autores

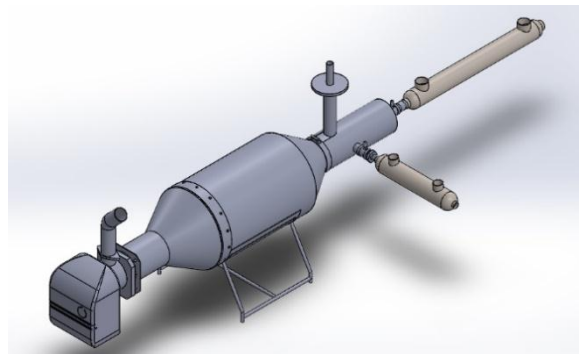


Figura 12. Diseño final banco.

Fuentes: Autores

Además, en pruebas aleatorias con parámetros no definidos, ni estandarizados se llegó a la generación de vapor de agua, lo que da pie al interés en que investigaciones venideras establezcan la forma estándar de generar vapor con el dispositivo. Ligado a lo anterior se presenta el caso del desarrollo de un proyecto de investigación que se desarrollará en el laboratorio de energías renovables de UPB Montería, en el que se harán pruebas de gasificación de biomasa utilizando vapor de agua como agente gasificante, para esto se diseñó un sistema de conexión entre el banco de intercambiadores de calor y el equipo

gasificador del laboratorio de energías renovables de UPB Montería como se aprecia en la figura 13.



Figura 13. Conexión del banco de intercambiadores al gasificador.

.2. BATERÍA DE MEZCLA OPTIMIZADA

Otro resultado conseguido con el proyecto de grado fue obtener una batería de mezcla optimizada para la evaluación de la transferencia de calor, como se planteó en la metodología del diseño de la batería de mezcla, partiendo de la tabla 2 se evaluaron regresiones; cuadrática, cubica especial, cubica completa, cuartica especial y cuartica completa obteniendo los valores estadísticos mostrados en la tabla 5

Tabla 5. Valores estadísticos para modelos de regresión aplicados a la batería de mezclas

Regresión Cuadrática		
S = 62,8518	R-cuad. = 58,66%	R-cuad. (ajustado) = 32,35 %
Observaciones inusuales de T(°C)		
Observación	T(°C)	Residuo Estándar
3	286,210	2,13R
14	365,91	2,21R
15	128,41	-2,54R
26	190,070	-2,14R
31	438,000	2,03R
Regresión Cubica Especial		
S = 55,4267	R-cuad. = 82,46%	R-cuad. (ajustado) = 47,39 %
Observaciones inusuales de T(°C)		
Observación	T(°C)	Residuo Estándar
3	286,210	2,20R
4	288,810	0,42X
10	382,640	-0,22X
17	263,310	-0,18X
31	438,000	2,05R
32	164,2400	-2,38R
Regresión Cubica Completa		
S = 39,9358	R-cuad. = 96,97%	R-cuad. (ajustado) = 72,69 %
Observaciones inusuales de T(°C)		
Observaciones	T(°C)	Residuo Estándar
1	317,950	0,07X
3	286,210	2,20R
4	288,810	0,42X
6	242,180	-1,70X
7	390,680	0,07X
9	379,170	-0,50X
10	382,640	-0,22X
14	365,910	0,80X
15	128,410	-0,87X
17	263,310	-0,18X
21	370,200	-0,07X
24	225,360	-0,16X
26	190,070	-0,07X
27	291,510	0,26X
28	293,330	0,48X

Regresión Cubica Completa		
Observaciones	T(°C)	Residuo Estándar
30	262,050	0,22X
32	164,240	-2,38R
34	436,910	0,07X
35	359,290	1,73X
37	291,620	-0,27X

Para la regresión cuartica especial el programa no pudo determinar los estadísticos y para la regresión cuartica completa a pesar de que $R\text{-cuad} = 97,13\%$, el $R\text{-ajustado}$ es cero, por lo tanto, no se ajustan los valores de predicción a los valores reales para la cantidad de datos suministrados.

Según los criterios mencionados se seleccionó el tipo de Regresión Cúbica Especial, se analizaron las observaciones inusuales y se realizaron nuevas corridas eliminando las mezclas con datos atípicos, obteniendo los resultados mostrados en la tabla 6. A partir de los estadísticos mostrados en las nuevas regresiones se esperaba que el $R\text{-cuad}$ se mantuviera constante para verificar que no influye dentro del modelo, pero varía en todos los casos, el cambio mínimo se observó en la mezcla 4, adicionalmente se presentó la menor cantidad de valores atípicos. Teniendo en cuenta que $R\text{-cuad}$ en esta mezcla cambia menos de una unidad porcentual se determinó que su influencia no era significativa, por el contrario, $R\text{-cuad}$ ajustado disminuyó aproximadamente 6 % respecto a las 37 mezclas, así que no era recomendable eliminar ninguna de las mezclas.

Tabla 6. Valores estadísticos para modelo cubico especial exceptuando mezclas.

Mezcla Eliminada	S	R-cuad	R-cuad (ajustado)	Datos atípicos
3	44,7336	89,45%	66,44%	4
4	57,4600	82,62%	44,69%	4
10	57,7777	82,24%	43,49%	6
17	57,8121	82,19%	43,32%	6
31	46,6589	87,84%	61,32%	8
32	42,0800	89,40%	66,28%	5

De lo anterior se tomó el modelo cubico especial para describir la temperatura de los gases de combustión respecto a las composiciones, en la tabla 7 se presentan los coeficientes de regresión y en el Anexo 5 otros valores estadísticos arrojados por Minitab 17.

Tabla 7. Coeficiente de regresión cubica especial.

Variables	coeficiente
Ajonjolí (%)	-0,104672
Algodón (%)	1,35624
Maíz (%)	6,52019
Coco (%)	3,62629
Arroz (%)*Ajonjolí (%)	-1,84477
Arroz (%)*Algodón (%)	0,195147
Arroz (%)*Maíz (%)	-0,111434
Arroz (%)*Coco (%)	-0,312648
Ajonjolí (%)*Algodón (%)	0,0701282
Ajonjolí (%)*Maíz (%)	-0,0512506
Ajonjolí (%)*Coco (%)	0,0247513
Algodón (%)*Maíz (%)	-0,181703
Algodón (%)*Coco (%)	0,0295903
Maíz (%)*Coco (%)	0,359800
Arroz (%)*Ajonjolí (%)*Algodón (%)	0,0644664
Arroz (%)*Ajonjolí (%)*Maíz (%)	0,0774992
Arroz (%)*Ajonjolí (%)*Coco (%)	0,0852108

Arroz (%)*Algodón (%)*Maíz (%)	0,0241376
Arroz (%)*Algodón (%)*Coco (%)	-0,0217620
Variables	coeficiente
Arroz (%)*Maíz (%)*Coco (%)	-0,0136502
Ajonjolí (%)*Algodón (%)*Maíz (%)	0,00528567
Ajonjolí (%)*Algodón (%)*Coco (%)	-5,91101E-04
Ajonjolí (%)*Maíz (%)*Coco (%)	-0,0159175
Algodón (%)*Maíz (%)*Coco (%)	0,00463211

A partir de esto se optimizó el modelo para una temperatura deseables de 440 °C, arrojando los porcentajes óptimos, ver tabla 8. En el Anexo 6. se puede evidenciar el comportamiento de las soluciones arrojada por el software para la temperatura respecto a las composiciones.

.3. ELABORACIÓN DE LOS PELLETS

Luego obtener la batería de mezclas optimizadas se calculó la cantidad de biomasa triturada para cada componente, según las experimentaciones pilotos el tiempo de la prueba fue de 30 minutos para obtener datos respuesta representativos, garantizar la combustión de esa media representa un gasto de alrededor de 2 kg de pellets según las pruebas pilotos, Por último, con lo porcentajes establecidos, se determinó la cantidad necesaria de biomasa para la elaboración de cada mezcla como se muestra en la tabla 9.

En el proceso de trituración con el equipo PENAGOS TRITURADOR PICADOR TP–24 no presentó mayores contratiempos, por el contrario, el proceso de mejora al que ha sido sometido facilito su uso. Mientas que el equipo PELETIZADORA ZLSP S-230B

presento varios inconvenientes, inicialmente el equipo no producía pellets por lo que se tuvo que hacer un revisión y mantenimiento previo a la producción, aquí se encontró que la matriz de la maquina no estaba haciendo su movimiento giratorio correspondiente, puesto que el acople al eje presentaba un daño, la chaveta, estaba totalmente deformada, para la reparación del equipo se fabricó una nueva chaveta y se realizó el mantenimiento general del equipo, en el Anexo 4 se puede observar el proceso de trituración y la apariencia de las biomazas picadas y el proceso de peletización con las mezclas como resultado .

Tabla 8. Mezclas optimizadas y porcentajes en peso para biomazas de la región

	Arroz (%)	Ajonjolí (%)	Algodón (%)	Coco (%)	Maíz (%)	Respuesta pronosticada (°C)	Deseabilidad
M1	6,1132	27,7732	25,5568	17,2253	23,3315	440,00	1,0000
M2	6,5000	20,0000	28,5000	17,0770	27,9230	440,00	1,0000
M3	7,0000	29,0000	0,0000	60,0753	3,9247	440,00	1,0000
M4	4,7056	29,3127	1,4611	64,5206	0,0000	440,00	1,0000
M5	3,8315	30,0185	47,4612	0,0000	18,6888	440,00	1,0000

Con la puesta en marcha de la peletizadora se esperaba producir pellets, lo cual no se logró debido a que los rodillos que comprimen la biomasa sobre la matriz no tenían el ajuste adecuado, iniciando así una serie de pruebas de ensayo y error que precisó la presión correcta de compactación. Otro de los retos que se presentó para este equipo fue encontrar la relación de Biomasa-Agua que arrojará un aspecto constate para los pellets, demasiada cantidad de agua emulsionaba la biomasa y no permitía la peletización y poca cantidad no brindaba la cohesión suficiente para densificar y sobrecargaba el equipo,

además, la adición de agua no solo correspondía a humedecer la biomasa sino a enfriar el dispositivo cuando este presentara picos elevados de amperaje, el comportamiento de la peletizadora también estuvo relacionado con el tipo de mezclas, ya que la presencia de algodón y coco complejizo la labor. Superar los retos implicó obtener la calidad de los pellets deseado, con geometría cilíndricas de diámetros entre 5 mm y 10 mm y longitudes que no superan los 6 cm. En la figura 14 se ilustra los tipos de pellets obtenidos.



Figura 14. Pellets obtenidos de la PELETIZADORA ZLSP S-230B.

.4. DATOS EXPERIMENTALES

A partir de las pruebas pilotos se obtuvieron los parámetros y procedimientos para tener en cuenta en las pruebas experimentales, se definió el gasto másico de la biomasa, mediante ensayo y error, 180 gramos de pellets cada 4 minutos (0,00075 kg/s), garantizaba un desempeño homogéneo, se mantenía la llama durante gran parte del intervalo de tiempo. Al inicio de las pruebas piloto se notó que el suministro de la biomasa se tenía que estandarizar, pues se realizaba de manera poco rigurosa al

Combustor Ferroli Sun P7 - P12, la manera tradicional usada en el laboratorio para realizar la descarga generaba un alto contenido de desperdicio, cerca del 11%, puede apreciarse en la parte izquierda de la figura 15. Con el fin de superar esto se decidió preparar porciones de 180 g almacenadas en bolsas plásticas, parte de derecha de la figura 15.



Figura 15. Forma de descarga anterior y preparación de las porciones de descarga

Después de pruebas experimentales se sistematizaron los datos, en la que se recopilaban todos los datos encontrados en los fotogramas del video y se registraron en una planilla en el software Microsoft Excel, en esta tabla se insertó la información de los instrumentos guiados de las observaciones y apuntes realizados en la bitácora.

.4.1. Perfiles de temperatura

Posteriormente se realizaron las pruebas de combustión con cada uno de los montajes, durante las cuales se obtuvieron los perfiles de temperatura en las entradas y salidas de

los intercambiadores de calor para cada fluido, cada mezcla y cada configuración en el tiempo estimado, del Anexo 11 se muestran los comportamientos obtenidos y se realizan las siguientes observaciones.

Las temperaturas presentaron un comportamiento oscilatorio en la mayor parte del tiempo, caracterizándose por tres lapsus con comportamientos diferentes.

1. *Comportamiento con tendencia constante*; se da en los primeros minutos de la prueba donde los pellets se calientan sobrepasando su temperatura de ignición y se inicia el suministro de aire 280 s (4 min) después de comenzada la prueba, oxigenando la combustión. La temperatura tiende a ser constante hasta un tiempo transcurrido entre 300 a 600 s (5 a 10 min) para el caso de los gases, a excepción de M1-3, M4-4 y M5-4 donde el incremento de temperatura se da desde el inicio, éstas últimas tienen la particularidad de que al inicio de las pruebas las temperaturas eran relativamente altas, mayores a 50, 45 y 50 °C respectivamente. Para el caso del agua esta etapa se da hasta un lapsus entre 300 y 800 s (5 y 13 min) a excepción de las pruebas anteriores.

2. *Comportamiento creciente – transferencia de calor*; este comportamiento se da en la parte intermedia de la prueba durante el tiempo de suministro de aire en el intervalo de 300 s (5 min) a 2600 s (aproximadamente 44 min). Para las entradas de los gases se presenta un crecimiento oscilatorio de la temperatura alcanzando máximos y mínimos locales, así como un máximo global que difiere en cada una de las pruebas, las temperaturas en la línea de calentamiento son mayores que para la línea de precalentamiento y sus comportamientos generalmente son simétrico, en esta etapa

comienza el proceso de transferencia de calor evidente en el aumento de temperatura del agua para las dos líneas, cabe resaltar que en M1-1 y M2-1 para la parte final del calentamiento se presentó cambio de fase. La máxima temperatura alcanzada por los gases en esta fase es de 360 °C y se experimenta en montaje 2 - mezcla 1 y la de agua 102,3 °C obtenida en la misma prueba.

3. *Comportamiento decreciente – enfriamiento*; esta es la última etapa correspondiente a los últimos minutos de las pruebas, donde se cortó el suministro de aire a los 2520 s (42 min) hasta el final de la prueba. Aquí la temperatura disminuye para los dos fluidos de manera diferente para cada prueba, unos con un enfriamiento más rápido que otros, pero iniciando en un tiempo cercano a los 42 min. Este comportamiento no se presenta en M1-4, M3-4 y M3-5, donde no se evidencia caída de temperatura en la parte final.

.5. RENDIMIENTO DEL BANCO DE INTERCAMBIADORES

Partiendo del comportamiento de las temperaturas descrito anteriormente se pudo establecer que el análisis de la transferencia de calor y los cálculos correspondientes eran significativos en un rango de tiempo comprendido entre 600 s (4 min) y 2400 s (40 min) donde se presenta un cambio notorio de temperaturas para el agua.

Del Anexo 12 se presentan las efectividades calculadas del banco comparando los montajes según la mezcla evaluada. De las diez graficas presentadas se observó que el montaje 4 presenta una mayor efectividad al establecer las comparaciones, en la línea de precalentamiento predomina M4-1, M4-2 y M4-4 y en la línea de calentamiento M4-1,

M4-3 y M4-4, correspondientes al 60 % del total de las comparaciones, también el montaje 1 presenta efectividades relativamente altas, pero fluctúan considerablemente respecto al tiempo, este predomina para el calentamiento en la mezcla 2 y precalentamiento de la mezcla 5 equivalente al 20 % del total de las gráficas. El resto presentaron efectividades bajas, por ejemplo, en el montaje 2 y 3, el 90 % de las pruebas no supero el 50 % de rendimiento, aunque en M2-1 se alcanzó un máximo de 70 %, y en M3-3 de 75 %, para el montaje 6 las pruebas no superaron el 55 % de rendimiento.

Al analizar lo picos de rendimiento para cada grafica la presencia de máximos globales están dominados por los montajes 1, 4 y 6 como se evidencia en la tabla 10

Tabla 9. Efectividades máximas obtenidas para las evaluaciones de mezclas

	Línea	Prueba	Efectividad	Tiempo transcurrido
Mezcla 1	Precalentamiento	M1-1	75 %	2400 s (40 min)
	Calentamiento	M1-1	59 %	2380 s (\approx 40 min)
Mezcla 2	Precalentamiento	M4-2	75 %	2350 s (\approx 39 min)
	Calentamiento	M1-2	64 %	1810 s (\approx 30 min)
Mezcla 3	Precalentamiento	M1-3	84 %	1260 s (21 min)
	Calentamiento	M4-3	62 %	2110 s (\approx 35 min)
Mezcla 4	Precalentamiento	M4-4	90 %	2400 s (40 min)
	Calentamiento	M4-4	74 %	2130 s (\approx 36 min)
Mezcla 5	Precalentamiento	M6-5	54 %	1710 s (\approx 29 min)
	Calentamiento	M4-5	47 %	1070 s (\approx 18 min)

De las configuraciones evaluadas el montaje 4 y el montaje 1 generalmente presentaron mayores eficiencias y estas configuraciones presentan los intercambiadores de calor de manera consecutiva sin obedecer un orden creciente o decreciente, decir, (BT–ST–85–1 y BT–ST–155–B) y (BT–ST–300–B y BT–ST–155–B) respectivamente, coincidiendo en el intercambiador de calor de 155 000 BTU.

.6. MODELACIÓN DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR

Para la modelación se usó EES versión académica, se introdujo el código de programación y se diseñó la interfaz gráfica como se pudo apreciar del Anexo 8 y Anexo 9. A partir de las corridas desarrolladas se evidenció que la ecuación para el cálculo de las efectividades es la 16 puesto que la capacidad calórica mínima de los fluidos evaluados correspondió a la de los gases de combustión en las 30 pruebas realizadas. Se observó que el C_{gases} está en el orden de las milésimas de kW/°C mientras que el C_{agua} se encuentran en el orden de la centésimas de kW/°C, también se pudo notar que la máxima transferencia de calor alcanzada se aproxima a 1 kW y fue obtenido en el precalentador de la prueba M2-1, La propiedades y los parámetros de transferencia de calor están ligados a los perfiles de temperatura y éstos varían respecto al tiempo entonces cada iteración del software lanza valor diferentes, En el Anexo 13 se muestran algunos datos arrojados durante la modelación, para las densidades, el calor específico y los flujos máscicos se muestran valores promedios, debido a que su rango de variación no es tan amplio. Para la capacidad calórica, el coeficiente global de transferencia de calor y el calor real transferido se mostraron los valores máxicos alcanzado ya que son de especial interés para la transferencia de calor.

Las densidades promedio están entre $0,81 \text{ kg/m}^3$ (M2-1) y $1,03 \text{ kg/m}^3$ (M3-5) para el precalentamiento y entre $0,76 \text{ kg/m}^3$ (M5-2) y $0,98 \text{ kg/m}^3$ (M3-5) para el calentamiento, para el c_p la variación es mínima aproximándose a $1,10 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$. Para el flujo máscico promedio de gases en el precalentamiento variaban $0,0031 \text{ kg/s}$ (M4-3 y M4-4) y $0,0063 \text{ kg/s}$ (M1-1) y para el calentamiento entre $0,0028 \text{ kg/s}$ (M4-4) y $0,0069 \text{ kg/s}$ (M1-4). El

máximo coeficiente global de transferencia de calor en el precalentamiento fue de $0,0359 \text{ kW/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ (M1-3) y en el calentamiento de $0,0205 \text{ kW/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ (M1-4)

CONCLUSIONES

- El banco de intercambiadores de calor fabricado cumplió con las expectativas de diseño y fabricación, en cuanto a versatilidad, facilidad de ensamble y limpieza, además de su objetivo primordial de permitir la transferencia de calor de gases de combustión de biomasa en forma de pellets y agua.
- Los residuos generados en Córdoba por el sector agroindustrial representan una alternativa viable para el aprovechamiento energético, en esta industria cabe la posibilidad de vincular estas tecnologías dentro de la cadena de sus procesos.
- Se propone un método para la optimización de baterías de ensayo a partir de datos previos, en particular para esta investigación se concluye una batería de 5 mezclas
- El montaje 4 presentó mayor efectividad en el 60 % de las pruebas, el montaje 1 ocupó el segundo lugar con un 20 % de las prueba. Para los demás montajes las efectividades no superaban el 55 %.
- Encontramos que el equipo construido tiene la capacidad de generar vapor de agua lo que abre la posibilidad de que en el Laboratorio de energías renovables ubicado en Universidad Pontificia Bolivariana se puedan realizar procesos de gasificación utilizando como agente gasificante el vapor de agua.
- Este trabajo de investigación finalmente deja plasmada una guía minuciosa de *cómo hacer una evaluación térmica y experimental de un banco de intercambiadores de calor.*

RECOMENDACIONES

Se recomienda la aplicación de estas tecnologías en el uso de la cadena de procesos del sector agroindustrial, podrían presentarse alternativas de secado de productos, tales como el Arroz. La evaluación y caracterización de la biomasa residual en el departamento tiene que seguir la tendencia global y avanzar el campo de la aplicación en la industria. Por lo cual recomendamos ampliar el espectro de las evaluaciones respecto a las biomásas residuales y las tecnologías para el aprovechamiento energético de estas. Convertir esta información en atractiva para los empresarios del sector pasa por realizar investigaciones que también arroje comparaciones economías con respecto a las fuentes de energía que se encuentran en el mercado.

Los procesos ligados a la combustión tienen que someterse a un riguroso mantenimiento y tareas de limpieza, también al trabajar con empaques y sellos a altas temperaturas se hace necesario una revisión constante y sustitución de accesorios fallidos. Es necesario para aproximaciones más reales y para un código de modelación más robusto enlazar un análisis de combustión para las biomásas, y un análisis de transferencia, incorporando otros elementos de medición y otros parámetros de operabilidad.

Debido a que se están trabajando con gases de combustión de biomásas es recomendable limpiar el montaje una vez terminadas las pruebas. Para los nuevos montajes se debe recurrir al cambio de empaques y sellos, así como el recubrimiento con cinta de teflón.

Para ampliar el espectro de las evaluaciones y obtener un análisis más detallado se recomienda evaluar otras biomásas ya sea puras o mezcladas.

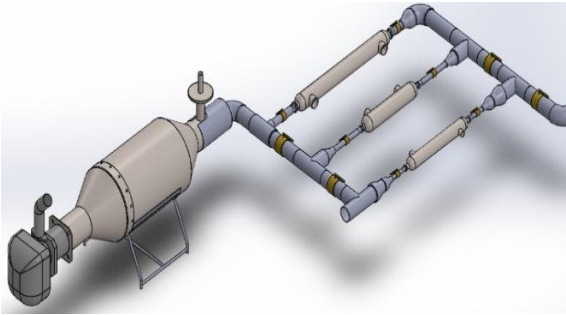
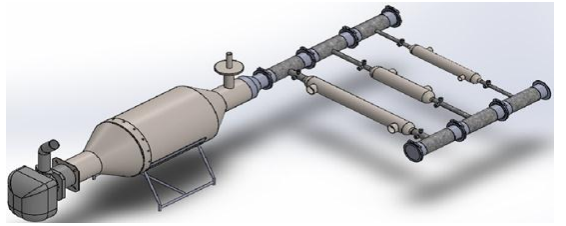
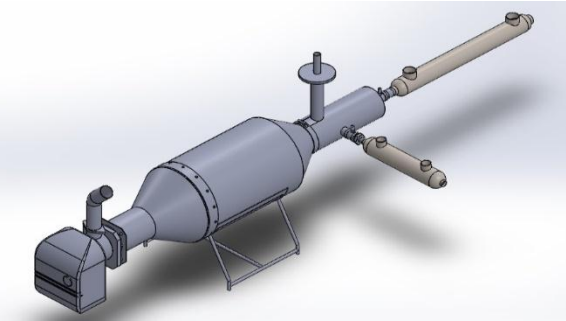
BIBLIOGRAFÍA

- Arauzo, J., Bimbela, F., Ábrego, J., Sánchez, J., y Gonzalo, A., Introducción a las tecnologías de aprovechamiento de biomasa, Boletín del Grupo Español Carbón, ISSN 2172 - 6094 (En línea) 33: 2-6, 2014. Recuperado el 22 de Enero de 2017, de: http://www.gecarbon.org/Boletines/Boletin/BoletinGEC_033.pdf
- Castro Viñuelas, R. (2014). La valoración de un sistema "time-lapse" como herramienta para la observación del desarrollo embrionario "in vitro".
- Cengel, Y., y Michael, B. 2011. Termodinámica (Séptima ed.), The McGraw-Hill Companies, México D.F., p777-782
- Cengel, Y., y Ghajar, A. 2011. Transferencia de calor y masa (Cuarta ed.), The McGraw-Hill Companies, México D.F., p17-30, p638-644
- FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Última actualización 31 de julio de 2017, consultado en línea, el 7 agosto de 2017 de FAOSTAT; <http://www.fao.org/faostat/es/#data/FO>
- Fernández, J. Energía Renovables para todos. Editado por Haya Comunicación, Madrid 2007. Recuperado en línea, 15 de Febrero de 2017, de Publicaciones y Cuaderno de la fundación de la energía de la comunidad de Madrid: <https://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/cuadernos-energias-renovables-para-todos-biomasa.pdf>
- Fernández, J. y Corrochan, C. 2014, Fundamentos de transmisión de calor (Segunda ed.), Dextra Editorial, Madrid, p172-188
- Fernández, J., Gutierrez, F., del Rio, P., San Miguel, G., Bahillo, A., Sanchez, J., Ballesteros, M., Vázquez, J., Aracil, J., Rodríguez, L. 2015. Tecnologías para el uso y transformación de biomasa energética. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, p107-110.
- Grajales, R. 2003. Transferencia molecular de calor, masa y/o cantidad de movimiento. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Guerra, C. W., Cabrera, A., & Fernández, L. (2003). Criterios para la selección de modelos estadísticos en la investigación científica. Revista Cubana de Ciencia Agrícola, 37(1).
- Jaramillo, O. A. (2007). Intercambiadores de calor. Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.

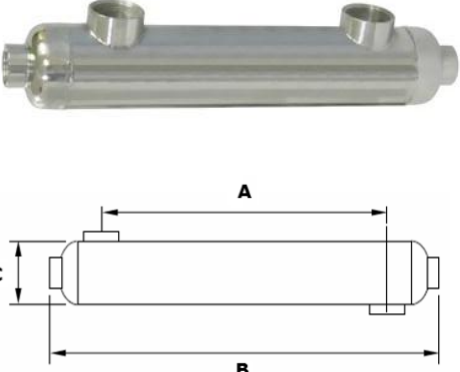

- Nogués, F., García, D., y Rezeau, A. 2010. Energía de la biomasa (Primera ed., Vol. 1). Prensas Universitarias de Zaragoza, Zaragoza – España, p20, p283-293
- Mediavilla I., Fernández M., Esteban L. 2009. Optimization of pelletisation and combustion in a boiler of 17.5 kW_{th} for vine shoots and industrial cork residue. Fuel Processing Technology 90(4):621-628
- Quiceno, D. y Mosquera, M. 2010. Alternativas tecnológicas para el uso de la cascarilla de arroz como combustible, trabajo de grado Ingeniero Mecánico, Universidad Autónoma de Occidente, Santiago de Cali.
- RAE, Real Academia Española, 23^a ed. Versión electrónica, Madrid 2014, Recuperado en línea, 2 de agosto de 2017, de Diccionario de la Lengua Española, Edición del Tricentenario: <http://dle.rae.es/?id=5YtOE4H>
- Sánchez, C. 2011. Teoría de la Combustión (Unidad Didáctica). Universidad Nacional de Educación a Distancia, Madrid, p25
- Soler, J., y Gómez, F. 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 Ingeniero químico, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.
- Thulukkanam, K. 2013, Heat Exchanger Desig Handbook (Segunda ed.), CRC Press Taylor y Francis Group, Boca Ratón-Florida, p1-29
- UPME, Unidad de Planeación Minero Energética, Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia, Bogotá 2015, Recuperado en línea, 7 de Agosto de 2017: http://www.upme.gov.co/Estudios/2015/Integracion_Energias_Renovables/INTEGRACION_ENERGIAS_RENOVANLES_WEB.pdf

ANEXOS




Anexo 1. Propuestas de montajes y criterios previos al diseño y fabricación de la configuración final.


	Ventajas	Desventajas	Ilustración
<p>Propuesta 1</p> <p>Montaje fijo con regulación de flujos por válvulas</p>	<p>Cambio de configuración sin de-sarmar.</p> <p>Poco tiempo para el ensamblaje.</p>	<p>Dificultad media para armar.</p> <p>Elevados costos de accesorios y fabricación debido a las altas exigencia térmicas de los componentes y accesorios.</p> <p>Difícil disponibilidad en el mercado local debido a las temperaturas de operación.</p> <p>Dificulta para el mantenimiento y la limpieza</p>	
<p>Propuesta 2</p> <p>Montaje modular con juntas por acoples tipo clamp</p>	<p>Cambio de configuración modular.</p> <p>Facilidad para armar.</p> <p>Facilidad de mantenimiento y limpieza.</p>	<p>Disponibilidad media en el mercado local.</p> <p>Costos relativamente altos de fabricación debido procesos de manufactura especiales.</p> <p>Pieza no comerciales de compleja fabricación.</p>	
<p>Propuesta 3</p> <p>Montaje con línea principal y precalentamiento</p>	<p>Facilidad para armar.</p> <p>Facilidad de mantenimiento y limpieza.</p> <p>Menor resistencia a los flujos.</p> <p>Poco tiempo para el ensamblaje.</p> <p>Bajos costos de fabricación y alta disponibilidad local.</p>	<p>Mayor probabilidad de fuga (pero fácilmente controlables).</p> <p>Tiempo de ensamblaje relativamente mayor.</p> <p>Mayor cantidad de elementos (de fácil acceso y poca complejidad.</p>	

Anexo 2. Dispositivos e instrumentos utilizados para el montaje final

Equipo e instrumentos	Características	Ilustración
Intercambiadores de calor de tubo y coraza	<p>BT-ST300-B</p> <p>Tasa nominal: 300,000 BTU Conexiones laterales del tubo (Paso directo): 1-1/2" FNPT Conexiones laterales de la carcasa: 2" FNPT Área de transferencia de calor: 0.63 m² Número de tubos: 37 Dimensiones: A = 23 in, B = 30,75 in, C = 3 in</p>	 <p>DO_{tubos}: 10 mm e_{tubos} = 0,7mm e_{coraza} = 1 mm</p> <p>e: espesor DO: diámetro externo Material: AISI 316L</p>
	<p>BT-ST155-B</p> <p>Tasa nominal: 155,000 BTU Conexiones laterales del tubo (Paso directo): 1" FNPT Conexiones laterales de la carcasa: 1-1/2" FNPT Número de tubos: 30 Área de transferencia de calor: 0.33 m² Dimensiones: A = 10 in, B = 17,75 in, C = 3 in</p>	
	<p>BT-ST85-1</p> <p>Tasa nominal: 85,000 BTU Conexiones laterales del tubo (Paso directo): 3/4" FNPT Conexiones laterales de la carcasa: 1" FNPT Número de tubos: 19 Área de transferencia de calor: 0.25 m² Dimensiones: A = 12,75 in, B = 20,45 in, C = 2,35 in</p>	
Combustor Ferroli Sun P7 - P12	<p>Capacidad térmica máxima: 34,1 KW Capacidad térmica mínima: 13,7 KW Caudal máximo de combustible: 7,2 kg/h Caudal mínimo de combustible: 2,9 kg/h Tensión de alimentación/frecuencia: 230 V/50 Hz Potencia eléctrica absorbida: 100 W Tamaño del pellet (diámetro/longitud máx.): 6/35 mm Depresión en cámara de combustión: -0,2 mbar</p>	

Anexo 2 (Continuación). Dispositivos e instrumentos utilizados para el montaje final

<p>Termoanemómetro CFM/CMM HD300 - Extech</p>	<p>Lectura de flujo de aire o velocidad y temperatura ambiente Tasa de muestreo de 1 lectura por segundo Condiciones de operación: Medidor 0 a 50 °C Sensor 0 a 60 °C Escala de velocidad de 0,40 – 30 m/s</p>	
<p>Psicrómetro HD500 - Extech</p>	<p>Lectura de humedad relativa y temperatura Tasa de muestreo de 1 lectura por segundo Condiciones de operación: Medidor 0 a 50 °C; 80 % HR máx Escala de temperatura de -100 a -30 °C y -30 a 1372 °C Conexiones tipo K</p>	
<p>Thermometer 4 Channel Type K - Sper Scientific</p>	<p>Lectura de temperatura a través de cuatro canales tipo K Tasa de muestreo de 1 lectura cada 3 segundos Escala de temperatura de -200 a 200 °C, 200 a 400 °C y 400 a 1370 °C Condiciones de operación: Medidor 0 a 50 °C; 80 % HR máx</p>	

<p>Termocuplas tipo K</p>	<p>Sondas tipo K extensibles fijas Alcance de hasta 2 metros Diámetros de 1/4 in y 3/16 in Longitud de 10 in Temperatura máxima 1200 °C</p>	
---------------------------	---	---

Anexo 3. Tipos de biomasa utilizadas en su estado natural



Recolección de biomasa



Cacota y restos de la planta de algodón



Tusa de maíz



Concha de coco



Espiga de ajonjolí



Cascarilla de arroz

Anexo 4. Trituración y peletización de las biomásas.



Proceso de trituración y resultado final de las biomásas.



Peletización de la biomasa para los diferentes tipos de mezcla

Anexo 5. Datos de regresión para modelo cubico especial

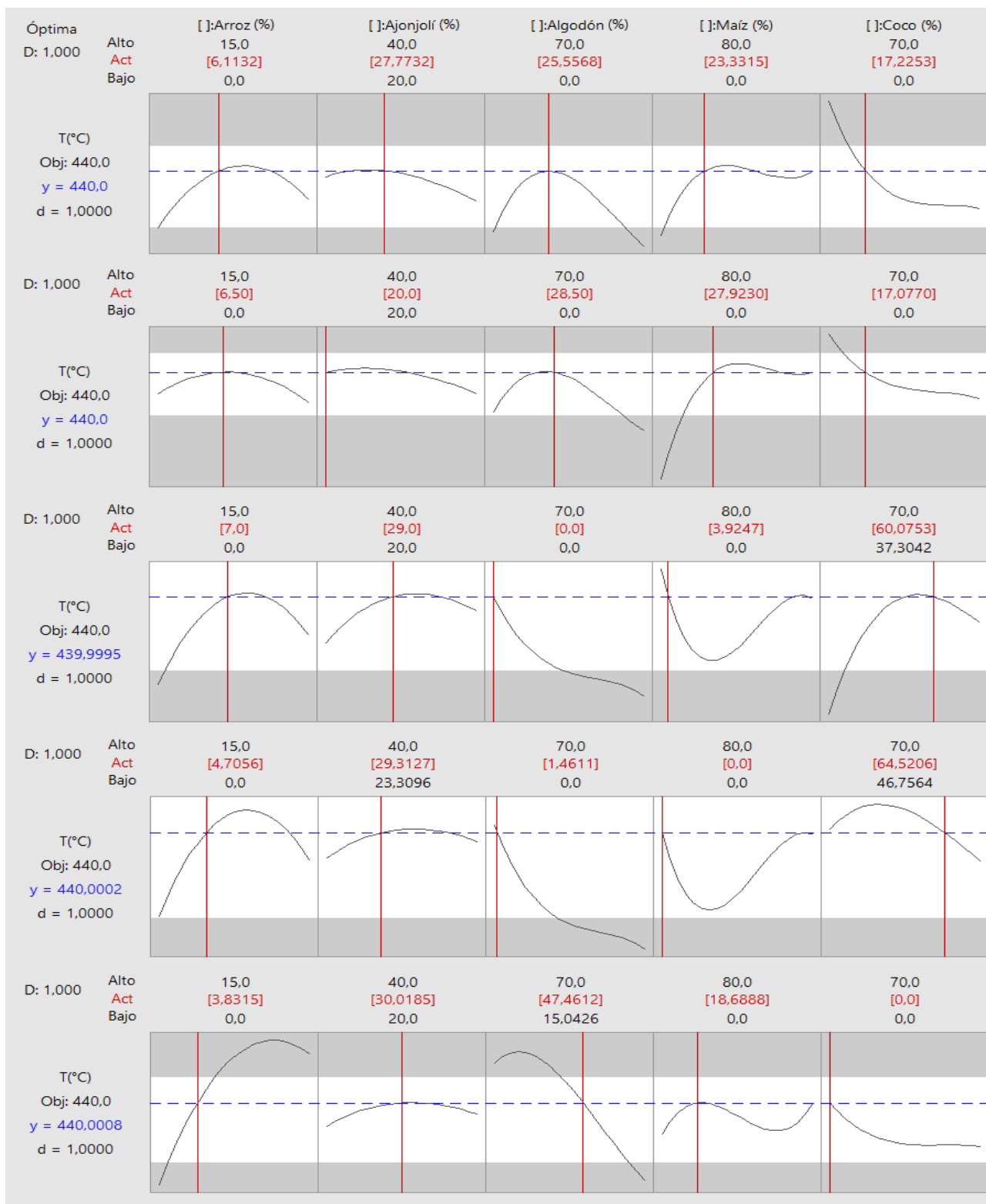
Regresión para mezclas: T(°C) vs. Arroz (%); Ajonjolí (%); ...

Coefficientes de regresión estimados para T(°C) (proporciones del componente) Análisis de varianza para T(°C) (proporciones del componente)

Término	EE del					Fuente	GL	SC Sec.	SC Ajust.	MC Ajust.	F	P
	Coef	coef.	T	P	VIF							
Arroz (%)	-5472	12766	*	*	13156,0	Regresión	24	173358	173358,4	7223,27	2,35	0,062
Ajonjolí (%)	-10	2718	*	*	7316,8	Lineal	4	60573	8708,3	2177,07	0,71	0,601
Algodón (%)	136	652	*	*	643,0	Cuadrático	10	62743	39391,4	3939,14	1,28	0,337
Maíz (%)	652	489	*	*	185,4	Arroz (%)*Ajonjolí	1	278	370,9	370,90	0,12	0,734
Coco (%)	363	652	*	*	643,0	Arroz (%)*Algodón	1	284	20,2	20,22	0,01	0,937
Arroz (%)*Ajonjolí (%)	-18448	53093	-0,35	0,734	20023,2	Arroz (%)*Maíz (%)	1	1541	6,3	6,29	0,00	0,965
Arroz (%)*Algodón (%)	1951	24052	0,08	0,937	4918,2	Arroz (%)*Coco (%)	1	48865	51,9	51,91	0,02	0,899
Arroz (%)*Maíz (%)	-1114	24626	-0,05	0,965	3486,6	Ajonjolí*Algodón	1	326	41,7	41,71	0,01	0,909
Arroz (%)*Coco (%)	-3126	24052	-0,13	0,899	4918,2	Ajonjolí*Maíz (%)	1	9456	24,8	24,79	0,01	0,930
Ajonjolí (%)*Algodón (%)	701	6019	0,12	0,909	3957,8	Ajonjolí*Coco (%)	1	800	5,2	5,20	0,00	0,968
Ajonjolí (%)*Maíz (%)	-513	5705	-0,09	0,930	2020,7	Algodón *Maíz (%)	1	460	585,1	585,07	0,19	0,670
Ajonjolí (%)*Coco (%)	248	6019	0,04	0,968	3957,8	Algodón *Coco (%)	1	463	15,0	15,03	0,00	0,945
Algodón (%)*Maíz (%)	-1817	4164	-0,44	0,670	155,9	Maíz (%)*Coco (%)	1	272	2294,1	2294,07	0,75	0,404
Algodón (%)*Coco (%)	296	4231	0,07	0,945	400,2	Cúbico especial	10	50042	50042,4	5004,24	1,63	0,209
Maíz (%)*Coco (%)	3598	4164	0,86	0,404	155,9	Arroz (%)*Ajonjolí*Algodón	1	19735	906,5	906,50	0,30	0,597
Arroz (%)*Ajonjolí (%)*Algodón (%)	64466	118678	0,54	0,597	8422,2	Arroz (%)*Ajonjolí*Maíz (%)	1	3397	1266,2	1266,23	0,41	0,533
Arroz (%)*Ajonjolí (%)*Maíz (%)	77499	120714	0,64	0,533	6592,8	Arroz (%)*Ajonjolí*Coco (%)	1	2317	1583,8	1583,76	0,52	0,486
Arroz (%)*Ajonjolí (%)*Coco (%)	85211	118678	0,72	0,486	8422,2	Arroz (%)*Algodón *Maíz (%)	1	8044	4142,8	4142,78	1,35	0,268
Arroz (%)*Algodón (%)*Maíz (%)	24138	20786	1,16	0,268	13,4	Arroz (%)*Algodón *Coco (%)	1	9087	4009,5	4009,46	1,31	0,276
Arroz (%)*Algodón (%)*Coco (%)	-21762	19049	-1,14	0,276	26,5	Arroz (%)*Maíz (%) *Coco (%)	1	3915	1324,9	1324,90	0,43	0,524
Arroz (%)*Maíz (%) *Coco (%)	-13650	20786	-0,66	0,524	13,4	Ajonjolí*Algodón *Maíz (%)	1	5	316,4	316,39	0,10	0,754
Ajonjolí (%)*Algodón (%)*Maíz (%)	5286	16470	0,32	0,754	166,5	Ajonjolí*Algodón *Coco (%)	1	151	4,6	4,61	0,00	0,970
Ajonjolí (%)*Algodón (%)*Coco (%)	-591	15257	-0,04	0,970	351,8	Ajonjolí*Maíz (%) *Coco (%)	1	3141	2869,3	2869,30	0,93	0,353
Ajonjolí (%)*Maíz (%) *Coco (%)	-15918	16470	-0,97	0,353	166,5	Algodón *Maíz (%) *Coco (%)	1	251	250,5	250,50	0,08	0,780
Algodón (%)*Maíz (%) *Coco (%)	4632	16221	0,29	0,780	54,5	Error residual	12	36865	36865,4	3072,11		
						Total	36	210224				

S = 55,4267 PRESS = 592478
R-cuad. = 82,46% R-cuad.(pred.) = 0,00% R-cuad.(ajustado) = 47,39%

Anexo 6. Gráficas de optimización de mezclas para una temperatura de respuesta de 440 °C



Anexo 7. Informe del análisis elemental de algunas biomásas



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA-SEDE MEDELLIN
LABORATORIO DE CIENCIAS DE LA ENERGIA

Medellín Noviembre 7 de 2014

ING. MARLÉN LÓPEZ MSc.
Centro Integrado de Materiales y Manufactura
Departamento de Ingeniería Mecánica
Universidad del Norte
Km 5 Antigua Vía Puerto Colombia
Tel: (5) 3509238

Envío a continuación el resultado de la corrección del análisis de la muestra correspondiente

ITEM	MUESTRA	%C	%H	%N
1	Ajonjolí	33,67	3,81	0,98
2	Coco	39,40	4,27	0,70
3	Algodón	39,30	4,70	1,21
4	Arroz	39,27	4,91	0,59
5	Maíz	39,95	4,97	0,60
6	Carbón	60,29	4,61	1,47
7	Bioag-C	4,37	1,09	0,03
8	Bioag-A	2,78	0,76	0,07
9	Bioag-M	3,00	0,73	0,01

Los resultados se presentan en % peso/peso tal como se recibe la muestra.
Los resultados corresponden al promedio de dos análisis realizados a cada muestra.

Cordialmente

CARLOS FRANCISCO VALDÉS RENTERÍA
Coordinación de laboratorio

Laboratorio Ciencias de la Energía
Calle 75 No. 79A - 51 Bloque M18
Tel: 4255399 Ext. 44100

Facultad de Minas
Universidad Nacional de Colombia

Anexo 8. Código de modelación EES 2004 (Datos de la prueba M6-1).

"Se realiza el análisis elemental C, H, O, N para la mezcla evaluada"

"Se define p como la fracción en peso de la biomasa y lo subíndices aj, al, ar, co y ma para identificar ajonjolí, algodón, arroz, maíz y coco. Además, C, H, O, N, representa el porcentaje de Carbono, Hidrogeno, Oxígeno y Nitrógeno"

$C_m=(p_ar*C_ar)+(p_aj*C_aj)+(p_al*C_al)+(p_ma*C_ma)+(p_co*C_co)$
"cantidad de carbono en la mezcla"

$H_m=(p_ar*H_ar)+(p_aj*H_aj)+(p_al*H_al)+(p_ma*H_ma)+(p_co*H_co)$
"cantidad de hidrogeno en la mezcla"

$O_m=(p_ar*O_ar)+(p_aj*O_aj)+(p_al*O_al)+(p_ma*O_ma)+(p_co*O_co)$
"cantidad de oxígeno en la mezcla"

$N_m=(p_ar*N_ar)+(p_aj*N_aj)+(p_al*N_al)+(p_ma*N_ma)+(p_co*N_co)$
"cantidad de nitrógeno en la mezcla"

"Las fracciones se definen en la interfaz a excepción del oxígeno que se calcula por diferencia"

$O_ar=1 - C_ar - H_ar - N_ar$
 $O_aj=1 - C_aj - H_aj - N_aj$
 $O_al=1 - C_al - H_al - N_al$
 $O_ma=1 - C_ma - H_ma - N_ma$
 $O_co=1 - C_co - H_co - N_co$

"Luego se calcula la cantidad de moles implicadas en la combustión"

$n_C=(m_pellets*C_m)/(12)$ "Kmol"
 $n_H=(m_pellets*H_m)/(1)$ "Kmol"
 $n_O=(m_pellets*O_m)/(16)$ "Kmol"
 $n_N=(m_pellets*N_m)/(14)$ "Kmol"

"Para ello se define el gasto de combustible que fue de 180 g cada 4 min, es decir, $m_pellets = 0,00075$ kg/s (Ingresada en la interfaz)"

"Ahora se desarrolla el balance estequiométrico para la combustión"
"[(n_C)Carbono + (n_H)Hidrógeno + (n_O)Oxígeno + (n_N)Nitrógeno] + $a_t(O_2+3,76N_2)$ -----> (x)CO₂ + (y)H₂O + (z)O₂ + (w)N₂ "

$n_C = x$ "balance de Carbono (C)"
 $n_H = y/2$ "balance de Hidrógeno (H)"
 $0,5*n_O + a_t = x + 0,5*y + z$ "balance de Oxígeno (O₂)"
 $0,5*n_N + (a_t*3,76) = w$ "balance de Nitrógeno (N₂)"

"a_t son los Kmol de aire utilizados en la combustión"
 $m_aire = 4,76*a_t*MassMolar_aire$ "masa de aire utilizados en la combustión"

$MassMolar_aire = 29$ "Kg/KMol"
 $R_ac = m_aire/m_pellets$ "La relación aire combustible se tuvo en cuenta el gasto de aire y de biomasa"

$m_aire = rho_aire*A_aire*vel_aire$
 $A_aire = 3,1416*((1,5/2)*0,0254)^2$ "Área transversal de entrada de aire"

$rho_aire = DENSITY(Air;T=29;P=101,3)$ "Densidad del aire a condiciones normales"
"vel_aire (definida en la interfaz)"

Anexo 8 (Continuación). Código de modelación EES 2004 (Datos de la prueba M6-1).

"A partir de lo planteado se hallan las fracciones molares de los productos de la combustión"

n_totales = x + y + w + z "Moles Totales"
 y_CO2 = x/n_totales "Fracción molar de CO2"
 y_H2O = y/n_totales "Fracción molar de H2O"
 y_O2 = z/n_totales "Fracción molar de O2"
 y_N2 = w/n_totales "Fracción molar de N2"

"A partir de aquí se calcula la densidad y el Cp de los gases de combustión"

"Para precalentamiento"

"Densidad Kg/m3"

rho_gas_pre=y_CO2*DENSITY(CO2;T=T_pre;P=101,3)+y_H2O*DENSITY(H2O;T=T_pre;P=101,3)+y_O2*DENSITY(O2;T=T_pre;P=101,3)+y_N2*DENSITY(N2;T=T_pre;P=101,3)

"Calor especifico KJ/Kg °C"

Cp_gas_pre=y_CO2*CP(CO2;T=T_pre)+y_H2O*CP(H2O;T=T_pre)+y_O2*CP(O2;T=T_pre)+y_N2*CP(N2;T=T_pre)

T_pre = (T_3 + T_4)/2 "Temperatura promedio de los gases en el precalentador (T_3 y T_4 definidas en la interfaz)"

"Para Calentamiento"

"Densidad Kg/m3"

rho_gas_cal=y_CO2*DENSITY(CO2;T=T_cal;P=101,3)+y_H2O*DENSITY(H2O;T=T_cal;P=101,3)+y_O2*DENSITY(O2;T=T_cal;P=101,3)+y_N2*DENSITY(N2;T=T_cal;P=101,3)

"Calor especifico KJ/Kg °C"

Cp_gas_cal=y_CO2*CP(CO2;T=T_cal)+y_H2O*CP(H2O;T=T_cal)+y_O2*CP(O2;T=T_cal)+ y_N2*CP(N2;T=T_cal)

T_cal = (T_6 + T_7)/2 "Temperatura promedio de los gases en el calentamiento (T_6 y T_7 definidas en la interfaz)"

"Análisis de Transferencia"

"Condición de entrada de los gases Precalentador"

C_gas_pre = m_gases_pre*Cp_gas_pre "Capacidad calorífica del gas en precalentamiento"

m_gases_pre = A_pre*vel_pre*rho_gas_pre "vel_pre (definida en la interfaz)"
 A_pre=3,1416*(((phi_pre/2)*0,0254)^2) "Área transversal del anemómetro"

"phi_pre = diámetro del anemómetro en pulgadas"

"Efectividad"

epsilon_pre =(C_agua*(T_2 - T_1))/(C_gas_pre*(T_3 - T_1))

epsilon_pre = (1 - EXP(-NTU_p*(1-c_pre)))/(1-c_pre*EXP(-NTU_p*(1-c_pre)))

NTU_p = (U_global_pre*A_trans_pre)/C_gas_pre

c_pre = C_gas_pre/C_agua

Anexo 8 (Continuación). Código de modelación EES 2004 (Datos de la prueba M6-1).

"Condición de entrada de los gases Calentador"

$C_{gas_cal} = m_{gases_cal} * C_{p_gas_cal}$ "Capacidad calorífica del gas en calentamiento"
 $m_{gases_cal} = A_{cal} * vel_cal * rho_{gas_cal}$ "vel_cal (definida en la interfaz)"
 $A_{cal} = 3,1416 * ((phi_cal/2) * 0,0254)^2$ "Área transversal del anemómetro"
 "phi_cal = diámetro del anemómetro en pulgadas"

"Efectividad"

$epsilon_{cal} = (C_{agua} * (T_5 - T_2)) / (C_{gas_cal} * (T_6 - T_2))$
 $epsilon_{cal} = (1 - EXP(-NTU_c * (1 - c_{cal}))) / (1 - c_{cal} * EXP(-NTU_c * (1 - c_{cal})))$
 $NTU_c = (U_{global_cal} * A_{trans_cal}) / C_{gas_cal}$
 $c_{cal} = C_{gas_cal} / C_{agua}$

"Condiciones del agua"

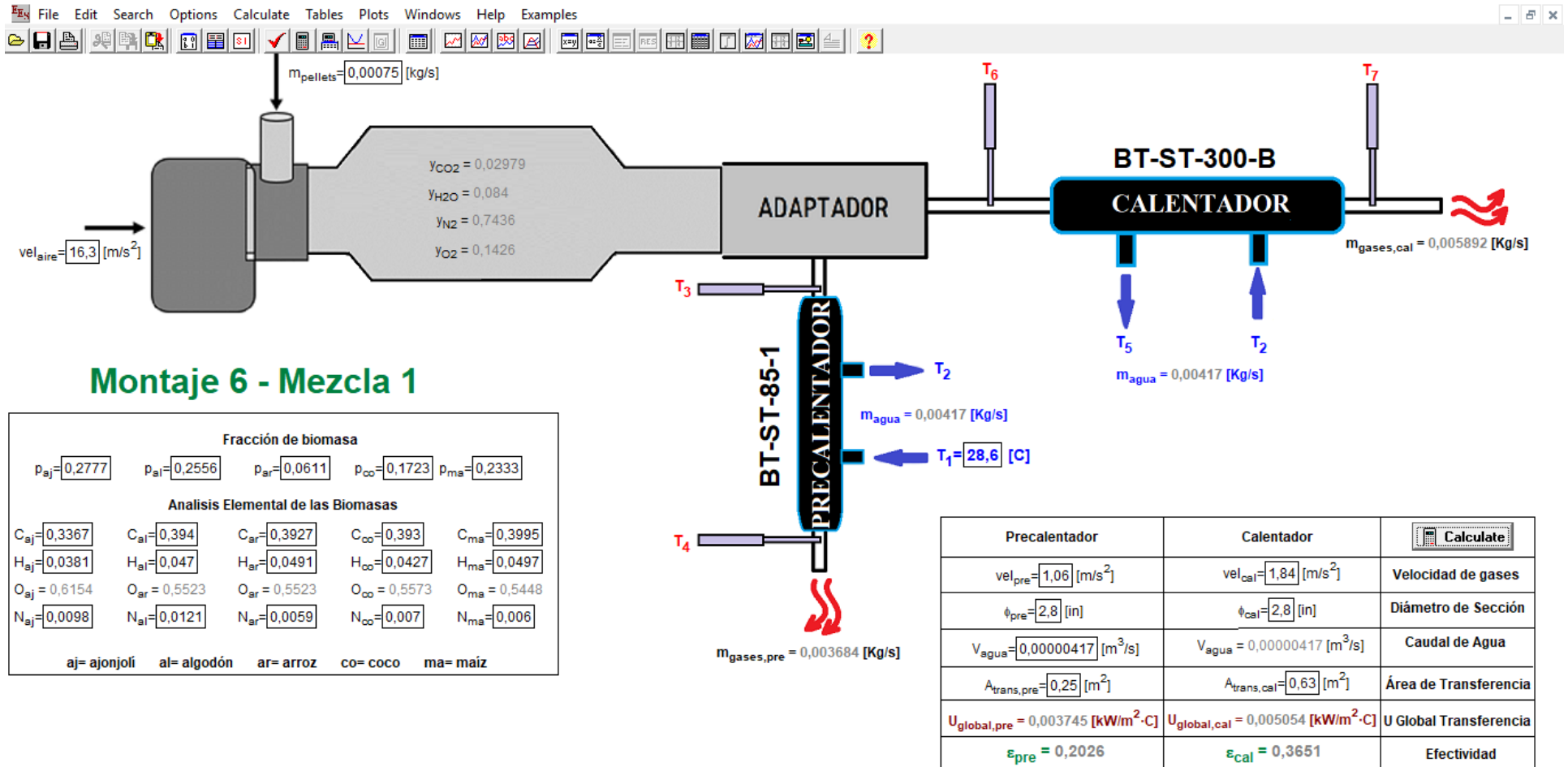
$C_{agua} = C_{p_agua} * m_{agua}$
 $C_{p_agua} = 4,18$ "Calor específico del agua a condiciones normales (KJ/Kg C)"
 $m_{agua} = V_{agua} * 1000$ "flujo másico del agua = flujo volumétrico * densidad"
 (densidad agua = 1000 kg/m3)"

$t = t_1$ "El tiempo se iguala a una variable cualquiera para permitir que código la lea en la parte de tabulación del software y así establecer las relaciones entre las temperaturas respecto al tiempo, al igual que las efectividades vs t"

$Q_{real_pre} = C_{agua} * (T_2 - T_1)$ "Calor real en el Precaentamiento"

$Q_{real_cal} = C_{agua} * (T_5 - T_2)$ "Calor real en el Calentamiento"

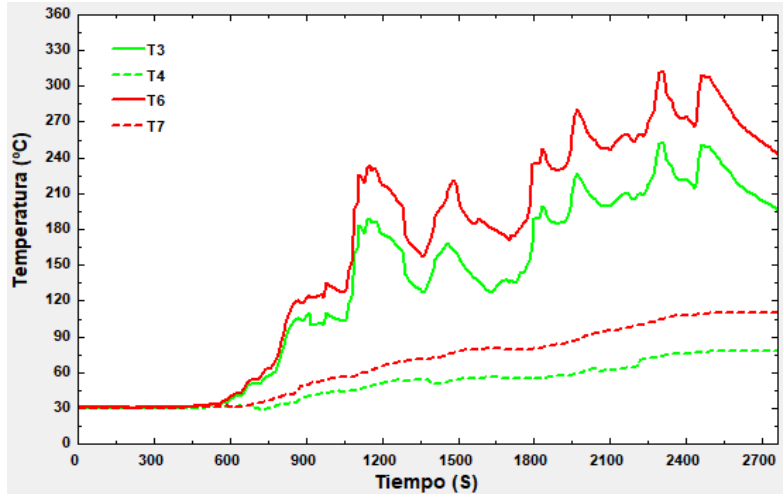
Anexo 9. Interfaz de modelación EES 2004 (Datos de la prueba M6-1).



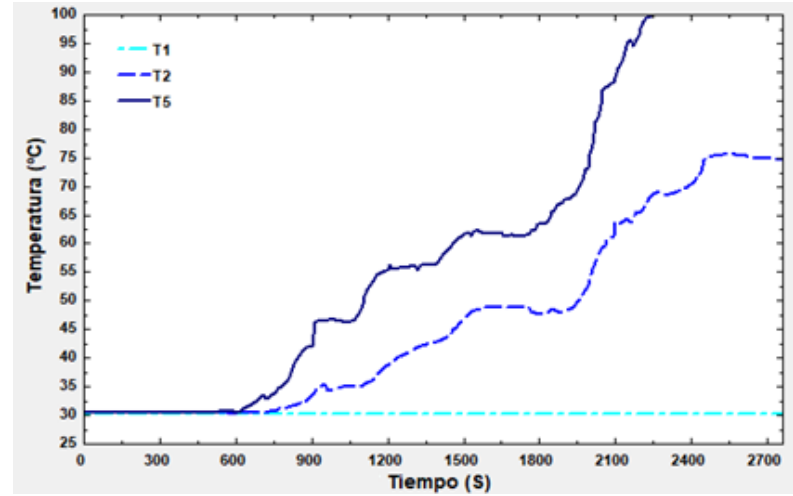
Anexo 10. Tabla de temperaturas ingresadas y propiedades arrojada por EES 2004 (Datos de la prueba M6-1 hasta la corrida 26)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1..181	t [s]	T ₂ [C]	T ₃ [C]	T ₄ [C]	T ₅ [C]	T ₆ [C]	T ₇ [C]	ε _{pre}	ε _{cal}	P _{gas,pre} [kg/m ³]	P _{gas,cal} [kg/m ³]	C _{p,pre} [kJ/kg-C]	C _{p,cal} [kJ/kg-C]	C _{gas,pre} [kW/C]	C _{gas,cal} [kW/C]	C _{agua} [kW/C]	U _{global,pre} [kW/m ² -C]	U _{global,cal} [kW/m ² -C]	Q _{real,pre} [kW]	Q _{real,cal} [kW]
Run 1	600	28,7	33,9	26,1	29,2	35,1	29,1	0,0633	0,1519	1,1341	1,1263	1,0886	1,0887	0,0052	0,0090	0,0174	0,0014	0,0024	0,0017	0,0087
Run 2	610	28,8	34,2	25,4	29,4	35,4	28,9	0,1197	0,1768	1,1349	1,1261	1,0885	1,0887	0,0052	0,0090	0,0174	0,0027	0,0029	0,0035	0,0105
Run 3	620	28,8	34,2	25,4	29,4	35,4	28,9	0,1197	0,1768	1,1349	1,1261	1,0885	1,0887	0,0052	0,0090	0,0174	0,0027	0,0029	0,0035	0,0105
Run 4	630	28,9	34,4	25,4	29,4	35,7	28,7	0,1734	0,1430	1,1345	1,1259	1,0885	1,0887	0,0052	0,0090	0,0174	0,0041	0,0023	0,0052	0,0087
Run 5	640	28,9	34,9	27,4	29,4	36,1	29,1	0,1603	0,1353	1,1298	1,1245	1,0886	1,0888	0,0052	0,0089	0,0174	0,0037	0,0021	0,0052	0,0087
Run 6	650	28,9	35,7	25,3	29,6	37,1	29,0	0,1419	0,1665	1,1322	1,1228	1,0886	1,0888	0,0052	0,0089	0,0174	0,0032	0,0027	0,0052	0,0122
Run 7	660	29,0	36,6	25,4	29,8	38,1	29,0	0,1682	0,1718	1,1304	1,1210	1,0886	1,0888	0,0052	0,0089	0,0174	0,0039	0,0028	0,0070	0,0139
Run 8	670	29,1	37,8	27,4	29,9	40,2	29,1	0,1838	0,1413	1,1245	1,1170	1,0888	1,0889	0,0052	0,0089	0,0174	0,0043	0,0022	0,0087	0,0139
Run 9	680	29,1	38,6	27,4	29,9	40,2	29,3	0,1693	0,1413	1,1230	1,1166	1,0888	1,0889	0,0051	0,0089	0,0174	0,0039	0,0022	0,0087	0,0139
Run 10	690	29,3	40,0	25,5	30,1	41,7	29,2	0,2077	0,1268	1,1239	1,1141	1,0888	1,0890	0,0052	0,0089	0,0174	0,0050	0,0020	0,0122	0,0139
Run 11	700	29,3	40,1	25,2	30,1	42,3	29,0	0,2058	0,1210	1,1243	1,1134	1,0888	1,0890	0,0052	0,0089	0,0174	0,0049	0,0019	0,0122	0,0139
Run 12	710	29,2	40,1	25,2	30,1	42,3	28,9	0,1764	0,1351	1,1243	1,1135	1,0888	1,0890	0,0052	0,0089	0,0174	0,0041	0,0021	0,0105	0,0157
Run 13	720	29,3	39,8	27,6	30,1	42,0	29,3	0,2121	0,1239	1,1204	1,1134	1,0888	1,0890	0,0051	0,0089	0,0174	0,0051	0,0019	0,0122	0,0139
Run 14	730	29,4	42,3	25,6	30,1	43,8	29,5	0,1983	0,0959	1,1195	1,1098	1,0889	1,0890	0,0051	0,0088	0,0174	0,0047	0,0015	0,0139	0,0122
Run 15	740	29,5	46,3	26,2	30,3	47,5	29,1	0,1739	0,0882	1,1112	1,1039	1,0890	1,0891	0,0051	0,0088	0,0174	0,0040	0,0013	0,0157	0,0139
Run 16	750	29,4	48,8	26,1	30,5	49,5	29,0	0,1360	0,1089	1,1069	1,1005	1,0891	1,0892	0,0051	0,0088	0,0174	0,0030	0,0016	0,0139	0,0192
Run 17	760	29,6	50,3	27,2	30,8	49,9	29,3	0,1589	0,1177	1,1023	1,0993	1,0892	1,0892	0,0051	0,0088	0,0174	0,0036	0,0018	0,0174	0,0209
Run 18	770	29,7	52,0	27,2	31,3	49,9	29,4	0,1625	0,1578	1,0993	1,0991	1,0892	1,0892	0,0050	0,0088	0,0174	0,0037	0,0025	0,0192	0,0279
Run 19	780	29,7	54,3	26,2	31,4	51,1	29,8	0,1483	0,1586	1,0970	1,0963	1,0893	1,0893	0,0050	0,0087	0,0174	0,0033	0,0025	0,0192	0,0296
Run 20	790	29,8	63,6	26,8	31,7	53,8	30,5	0,1206	0,1589	1,0800	1,0904	1,0895	1,0894	0,0050	0,0087	0,0174	0,0026	0,0025	0,0209	0,0331
Run 21	800	29,9	63,6	29,8	32,1	57,6	30,5	0,1313	0,1604	1,0749	1,0839	1,0896	1,0895	0,0049	0,0086	0,0174	0,0028	0,0025	0,0227	0,0383
Run 22	810	30,0	74,5	30,4	33,0	68,0	30,8	0,1097	0,1621	1,0559	1,0659	1,0899	1,0897	0,0048	0,0085	0,0174	0,0023	0,0025	0,0244	0,0523
Run 23	820	30,1	86,4	29,0	34,8	77,7	31,0	0,0948	0,2058	1,0392	1,0498	1,0901	1,0900	0,0048	0,0084	0,0174	0,0019	0,0032	0,0261	0,0819
Run 24	830	30,3	92,4	29,9	35,5	90,3	31,7	0,0984	0,1842	1,0284	1,0289	1,0903	1,0903	0,0047	0,0082	0,0174	0,0020	0,0028	0,0296	0,0906
Run 25	840	30,8	104,0	32,2	36,2	112,2	32,5	0,1099	0,1457	1,0075	0,9951	1,0906	1,0909	0,0046	0,0079	0,0174	0,0022	0,0021	0,0383	0,0941
Run 26	850	31,2	122,1	34,5	36,9	129,9	33,6	0,1078	0,1302	0,9782	0,9687	1,0912	1,0915	0,0045	0,0077	0,0174	0,0021	0,0018	0,0453	0,0994

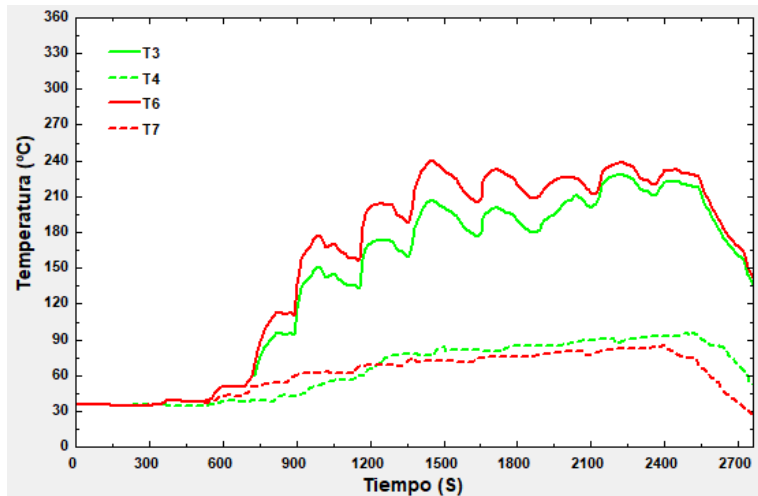
Anexo 11. Gráficas de temperaturas por pruebas



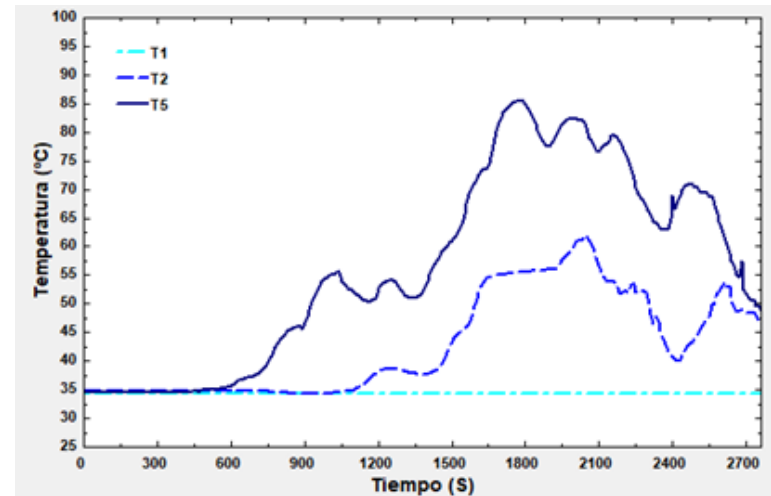
Temperatura de gases vs tiempo, Montaje 1 – Mezcla 1



Temperaturas del agua vs tiempo, Montaje 1 – Mezcla 1

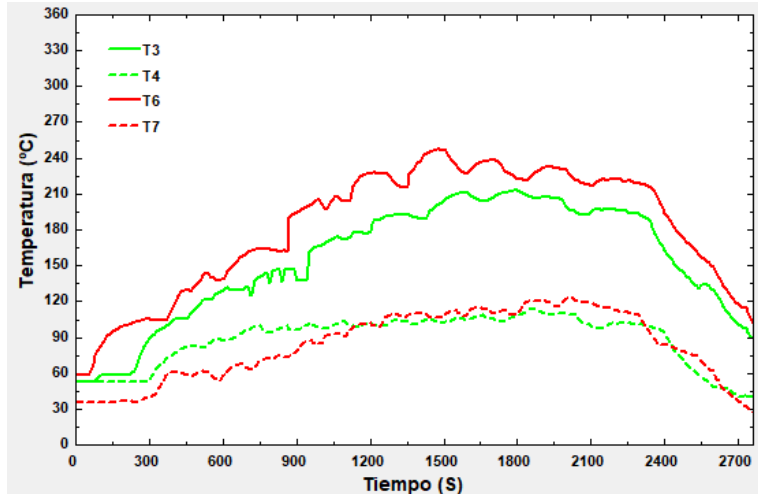


Temperatura de gases vs tiempo, Montaje 1 – Mezcla 2

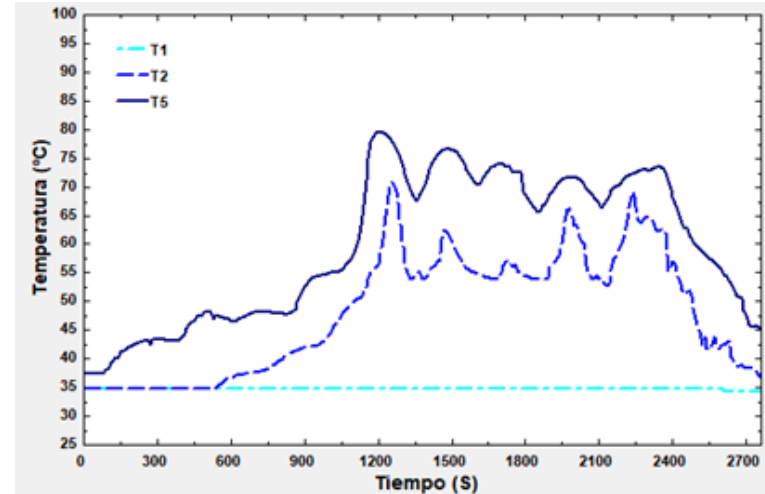


Temperaturas del agua vs tiempo, Montaje 1 – Mezcla 2

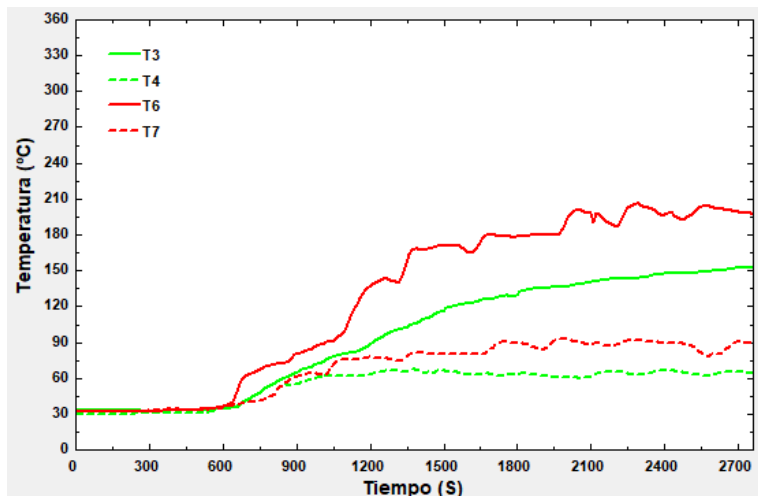
Anexo 11 (Continuación). Gráficas de temperaturas por pruebas



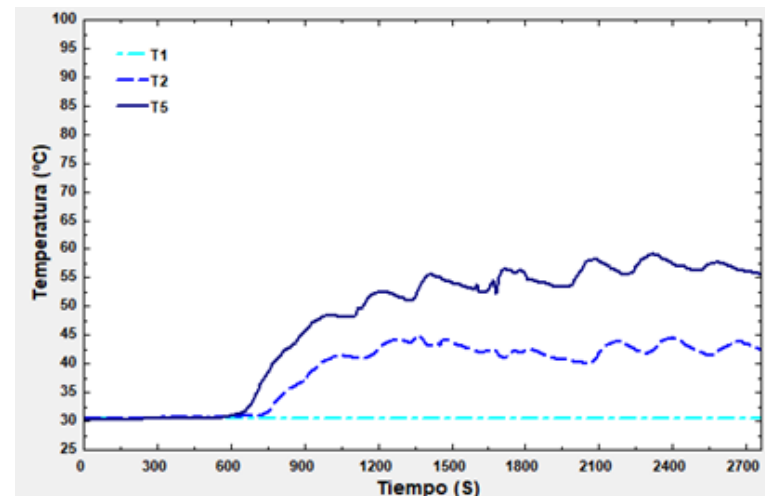
Temperatura de gases vs tiempo, Montaje 1 – Mezcla 3



Temperaturas del agua vs tiempo, Montaje 1 – Mezcla 3

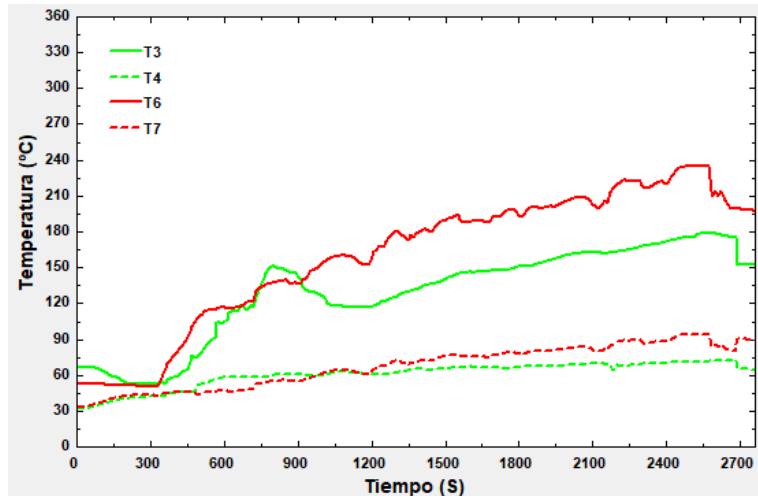


Temperatura de gases vs tiempo, Montaje 1 – Mezcla 4

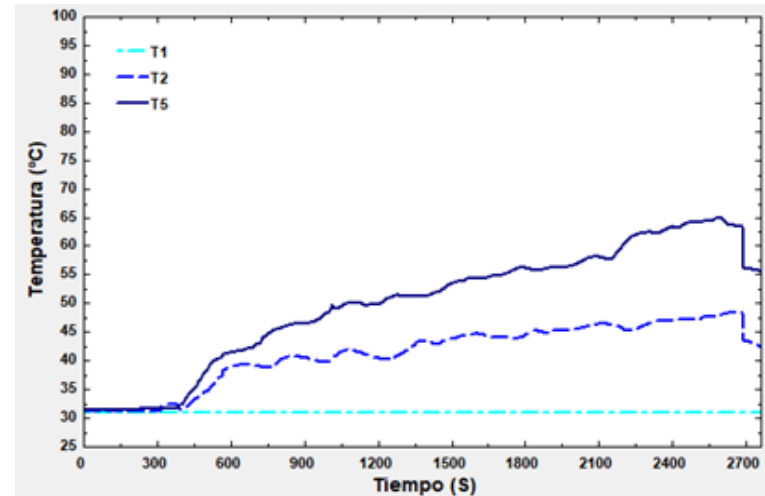


Temperaturas del agua vs tiempo, Montaje 1 – Mezcla 4

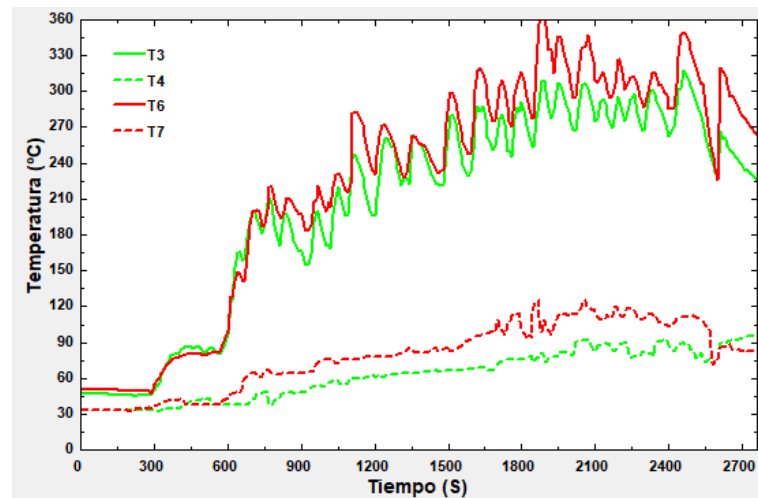
Anexo 11 (Continuación). Gráficas de temperaturas por pruebas



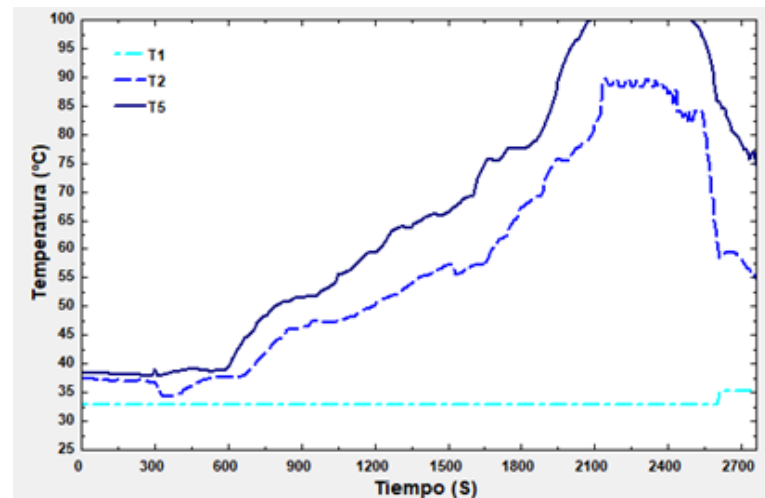
Temperatura de gases vs tiempo, Montaje 1 – Mezcla 5



Temperaturas del agua vs tiempo, Montaje 1 – Mezcla 5

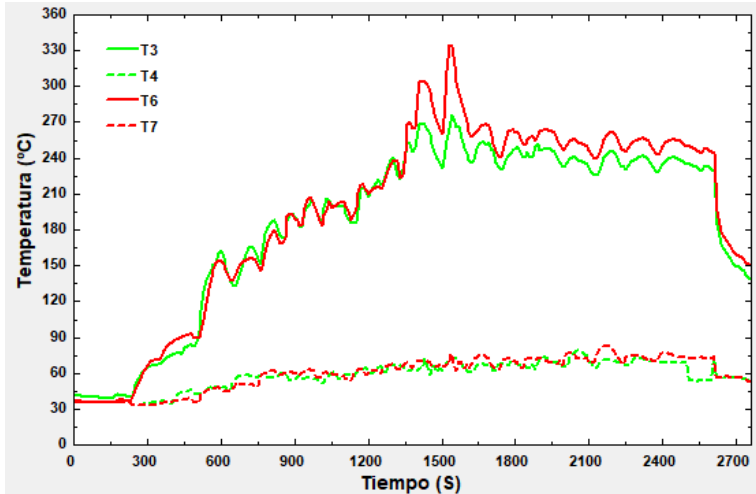


Temperatura de gases vs tiempo, Montaje 2 – Mezcla 1

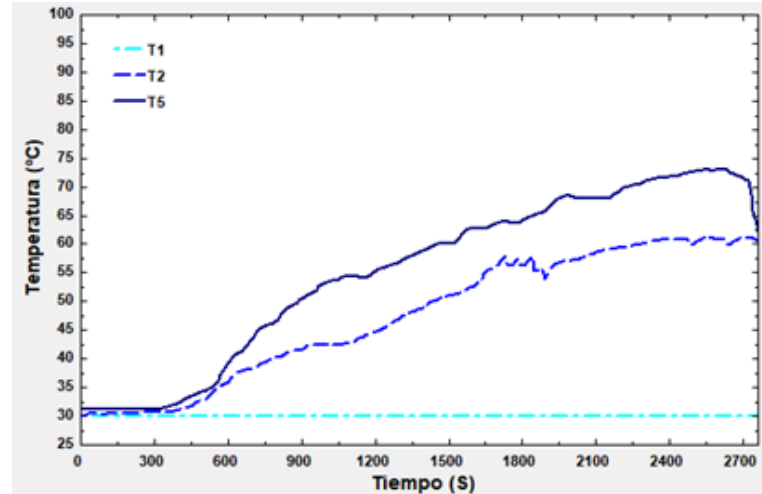


Temperaturas del agua vs tiempo, Montaje 2 – Mezcla 1

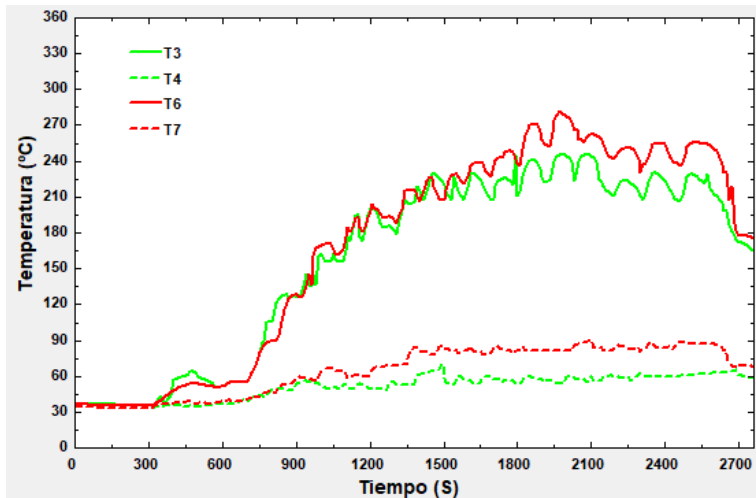
Anexo 9 (Continuación). Gráficas de temperaturas por pruebas



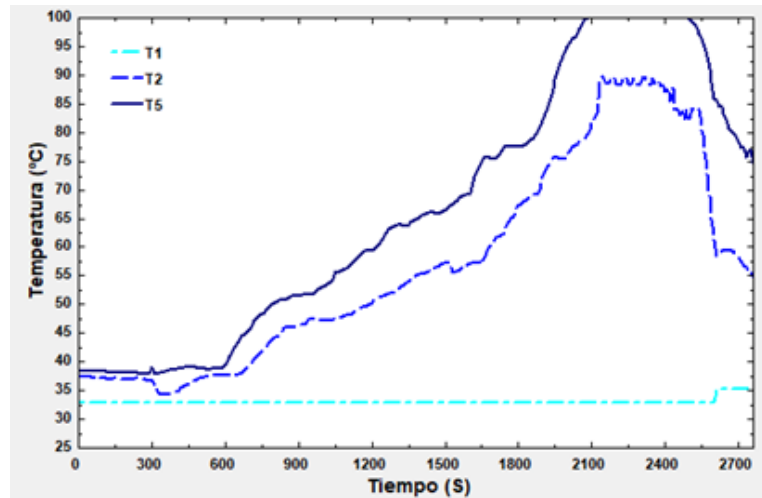
Temperatura de gases vs tiempo, Montaje 2 – Mezcla 2



Temperaturas del agua vs tiempo, Montaje 2 – Mezcla 2

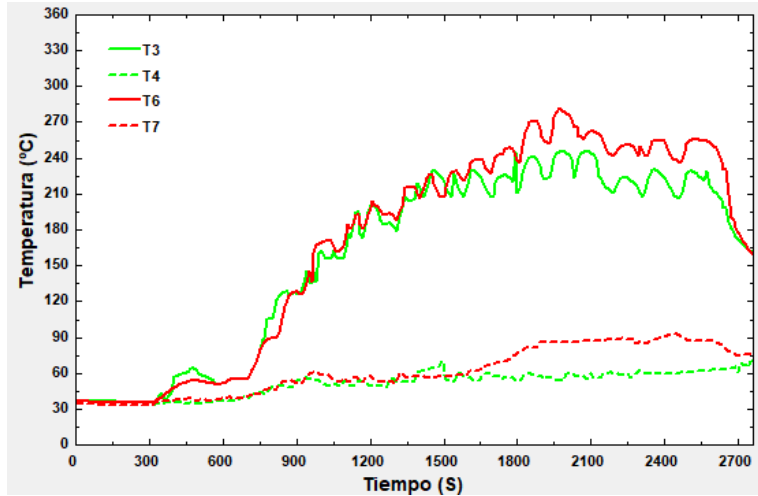


Temperatura de gases vs tiempo, Montaje 2 – Mezcla 3

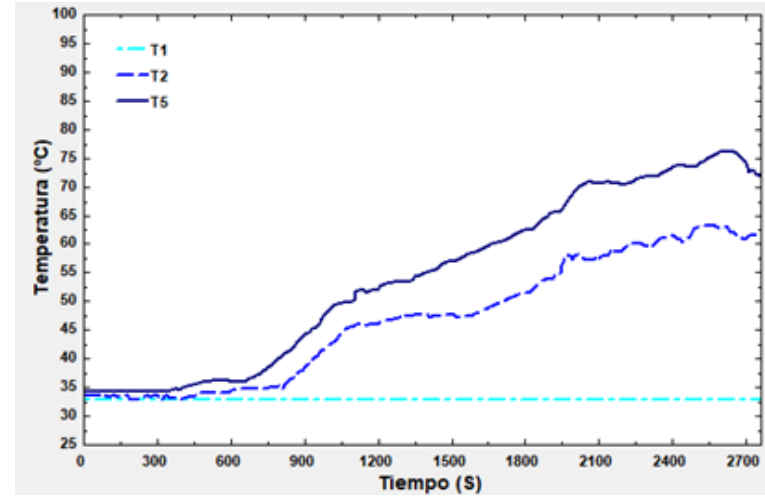


Temperaturas del agua vs tiempo, Montaje 2 – Mezcla 3

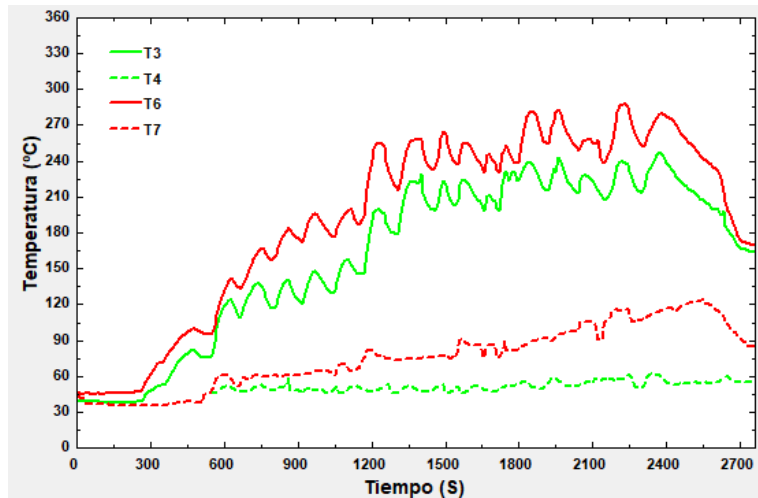
Anexo 11 (Continuación). Gráficas de temperaturas por pruebas



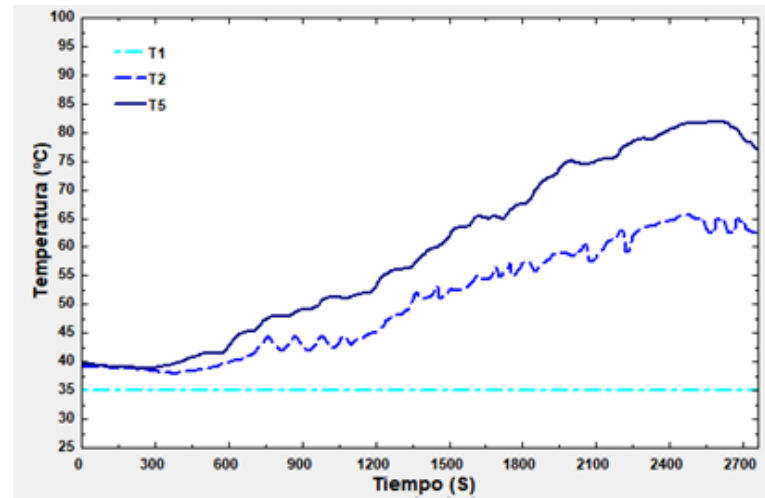
Temperatura de gases vs tiempo, Montaje 2 – Mezcla 4



Temperaturas del agua vs tiempo, Montaje 2 – Mezcla 4

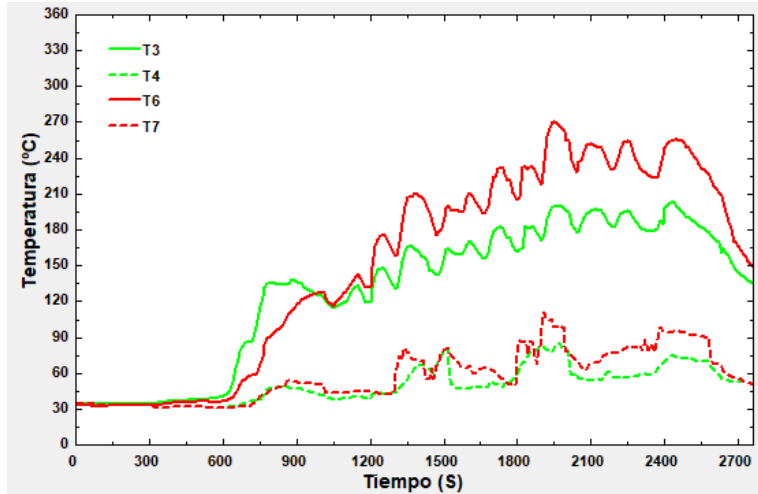


Temperatura de gases vs tiempo, Montaje 2 – Mezcla 5

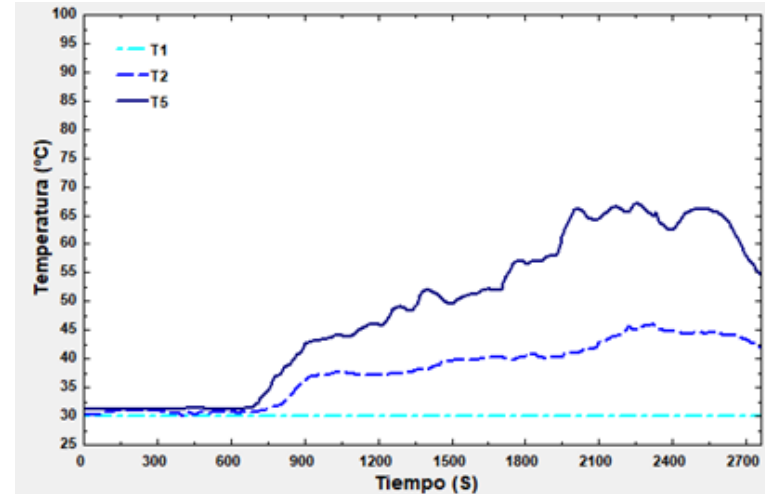


Temperaturas del agua vs tiempo, Montaje 2 – Mezcla 5

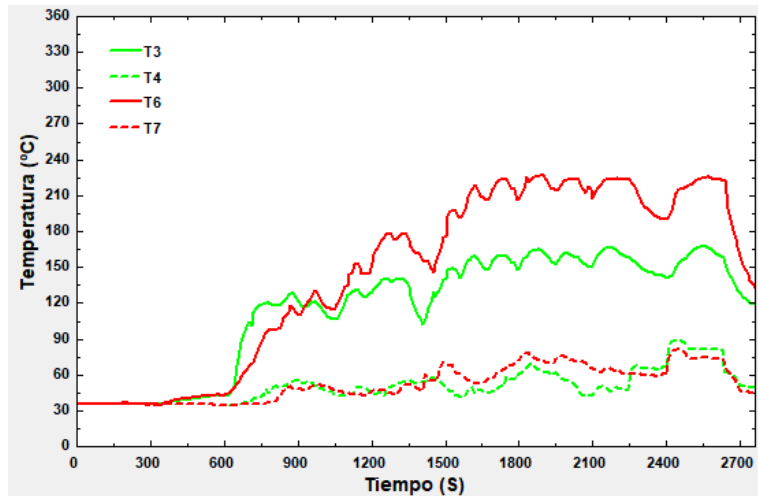
Anexo 11 (Continuación). Gráficas de temperaturas por pruebas



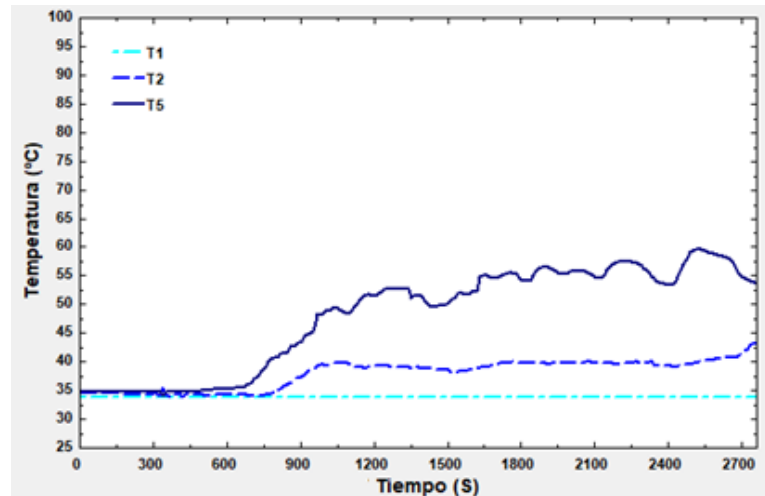
Temperatura de gases vs tiempo, Montaje 3 – Mezcla 1



Temperaturas del agua vs tiempo, Montaje 3 – Mezcla 1

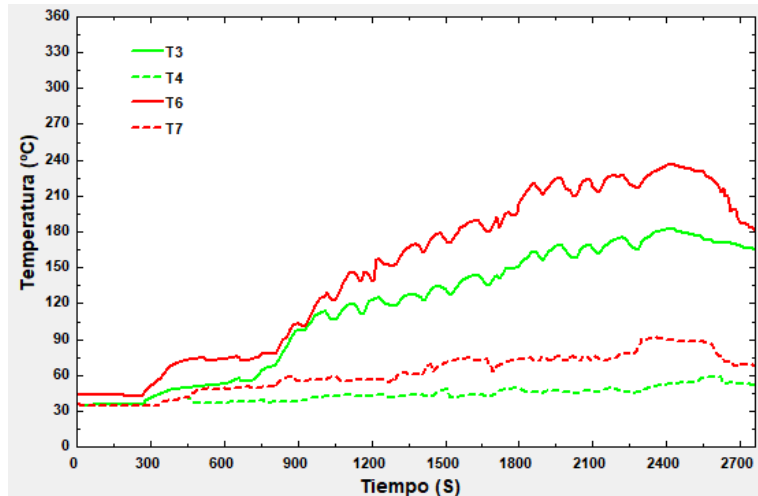


Temperatura de gases vs tiempo, Montaje 3 – Mezcla 2

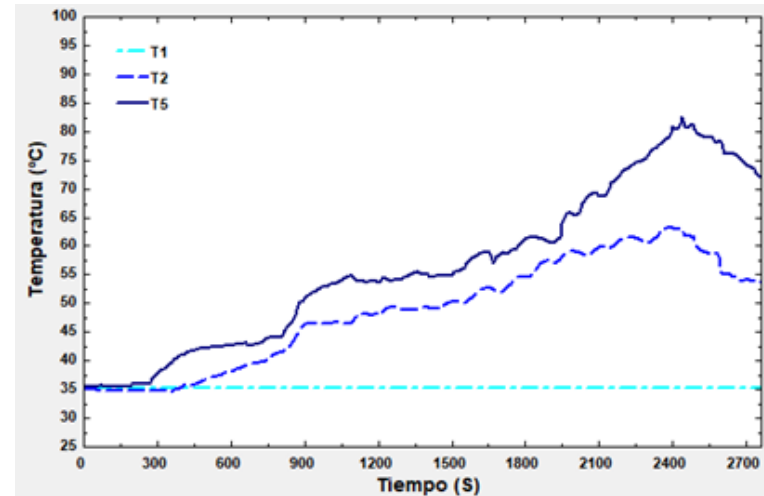


Temperaturas del agua vs tiempo, Montaje 3 – Mezcla 2

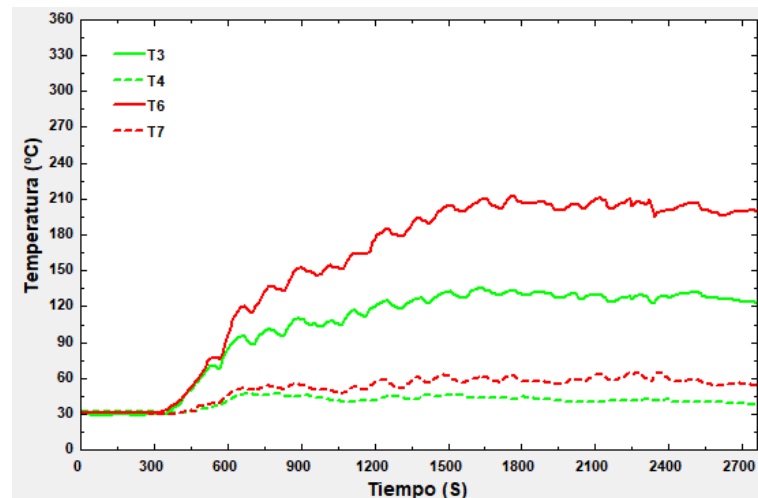
Anexo 11 (Continuación). Gráficas de temperaturas por pruebas



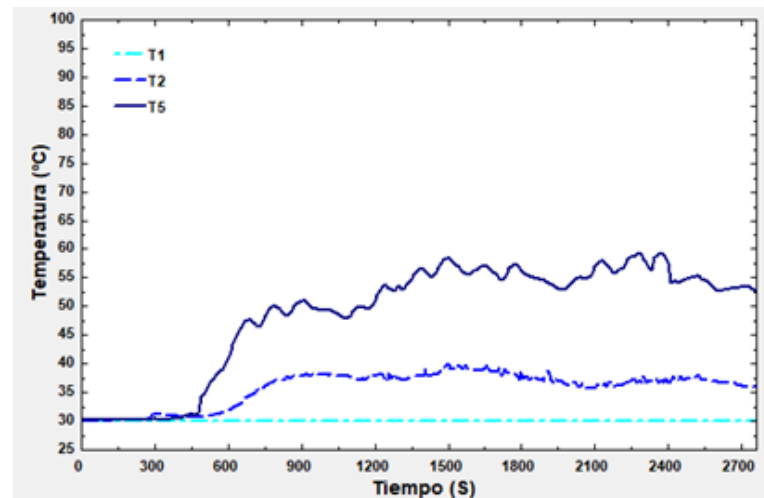
Temperatura de gases vs tiempo, Montaje 3 – Mezcla 3



Temperaturas del agua vs tiempo, Montaje 3 – Mezcla 3

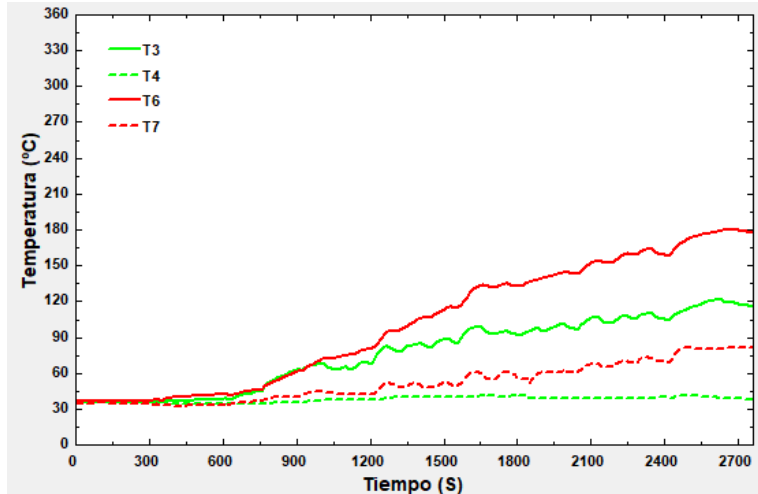


Temperatura de gases vs tiempo, Montaje 3 – Mezcla 4

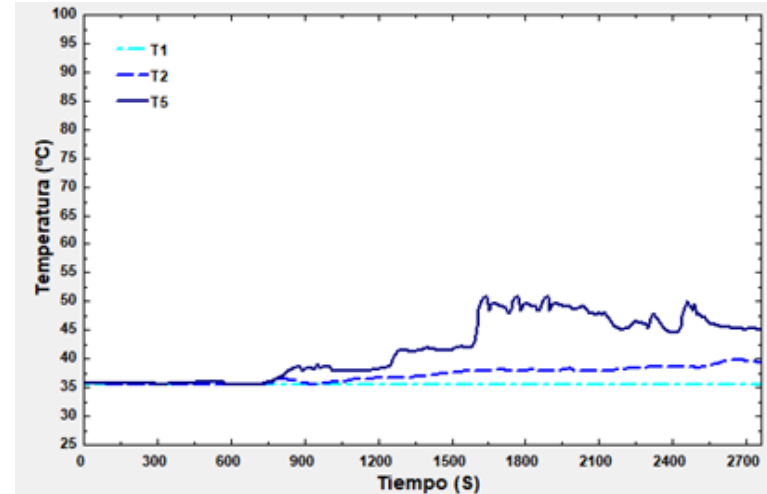


Temperaturas del agua vs tiempo, Montaje 3 – Mezcla 4

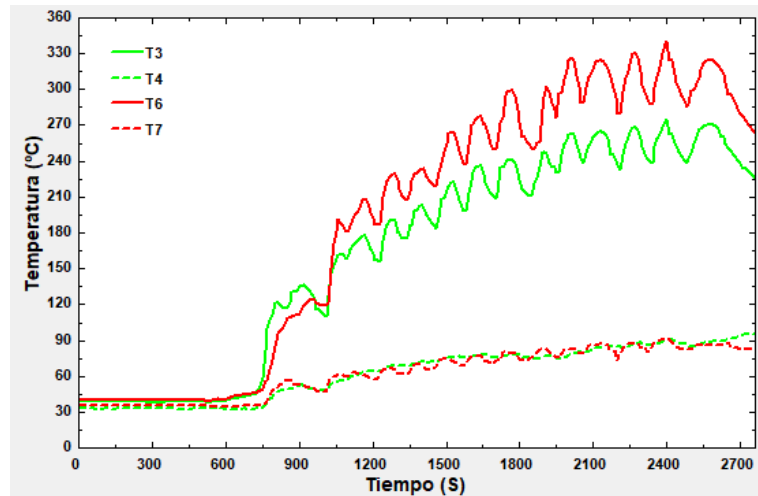
Anexo 11 (Continuación). Gráficas de temperaturas por pruebas



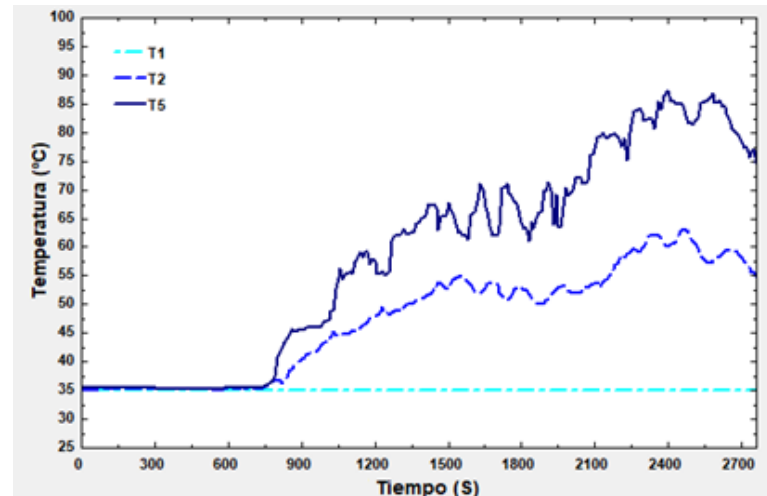
Temperatura de gases vs tiempo, Montaje 3 – Mezcla 5



Temperaturas del agua vs tiempo, Montaje 3 – Mezcla 5

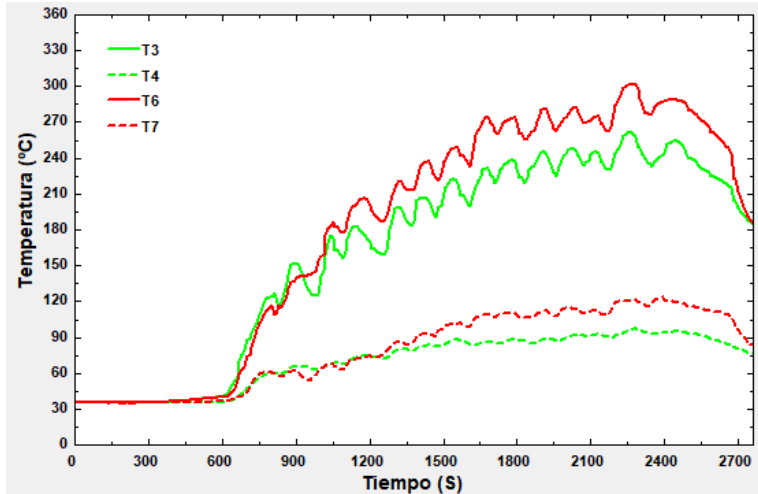


Temperatura de gases vs tiempo, Montaje 4 – Mezcla 1

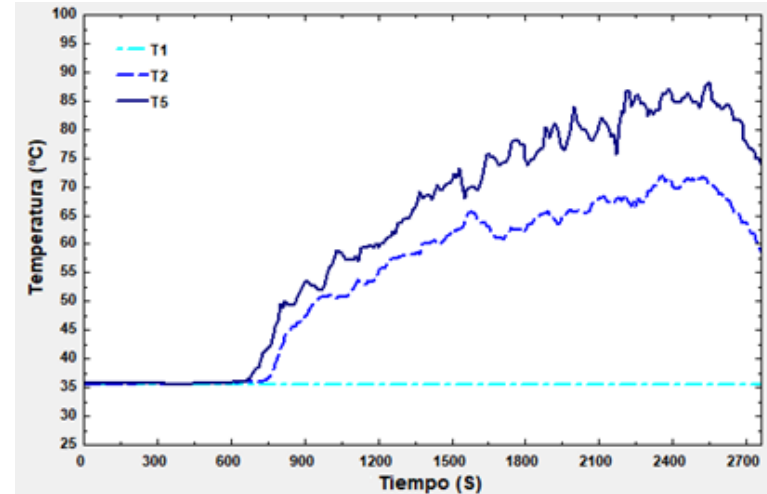


Temperaturas del agua vs tiempo, Montaje 4 – Mezcla 1

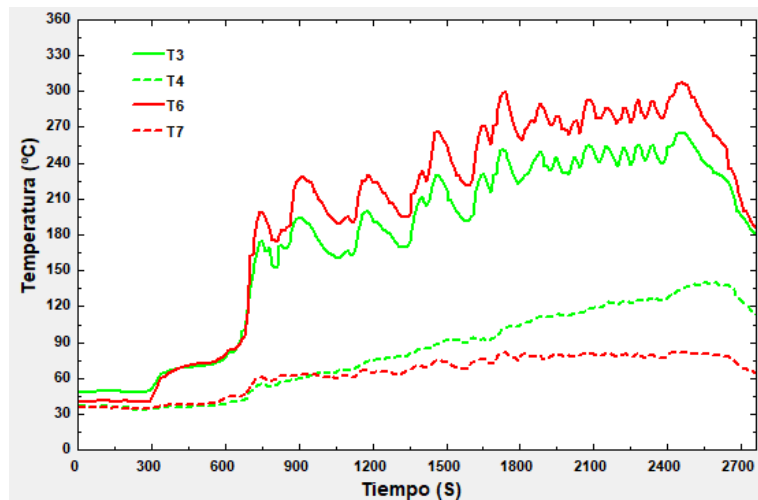
Anexo 11 (Continuación). Gráficas de temperaturas por pruebas



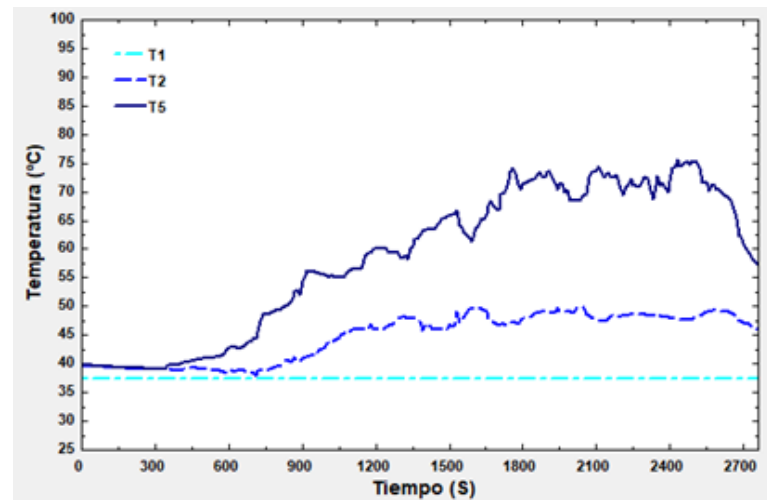
Temperatura de gases vs tiempo, Montaje 4 – Mezcla 2



Temperaturas del agua vs tiempo, Montaje 4 – Mezcla 2

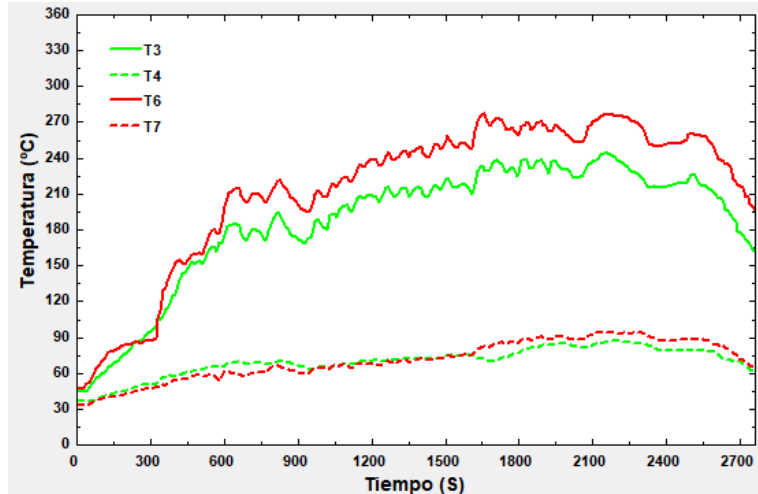


Temperatura de gases vs tiempo, Montaje 4 – Mezcla 3

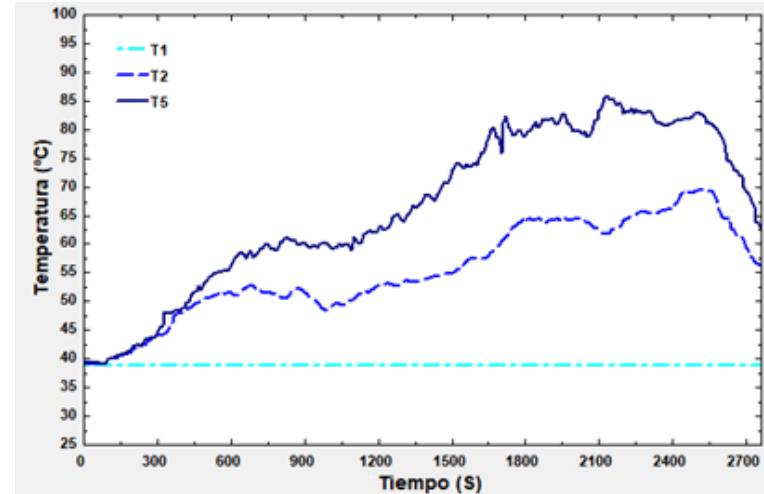


Temperaturas del agua vs tiempo, Montaje 4 – Mezcla 3

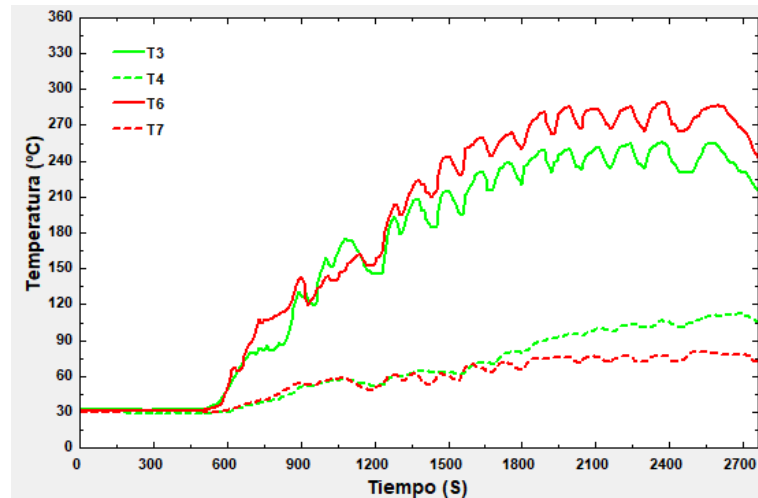
Anexo 11 (Continuación). Gráficas de temperaturas por pruebas



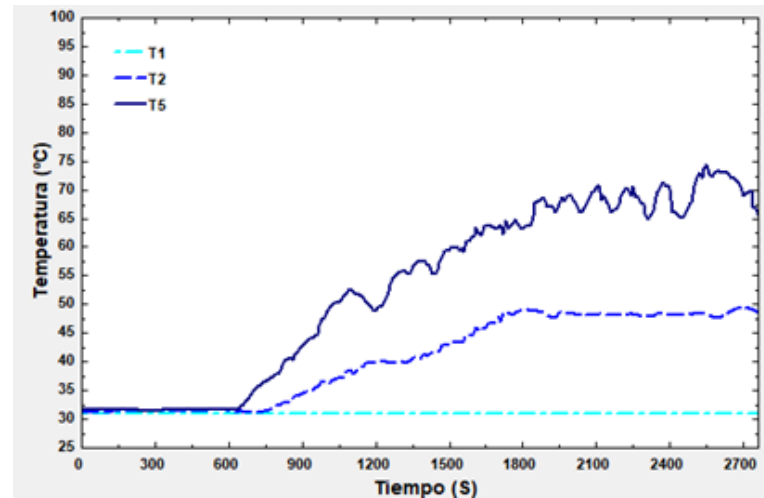
Temperatura de gases vs tiempo, Montaje 4 – Mezcla 4



Temperaturas del agua vs tiempo, Montaje 4 – Mezcla 4

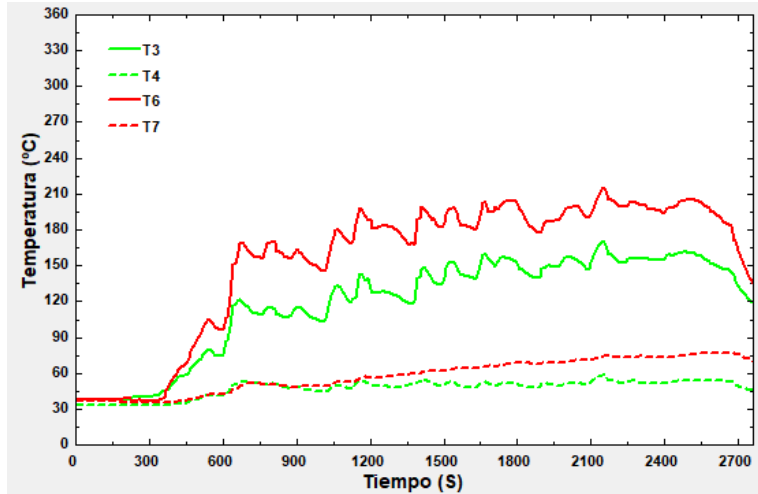


Temperatura de gases vs tiempo, Montaje 4 – Mezcla 5

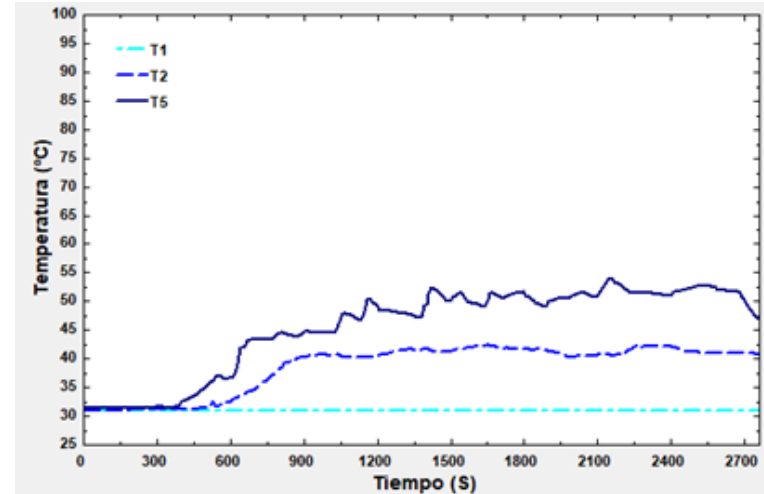


Temperaturas del agua vs tiempo, Montaje 4 – Mezcla 5

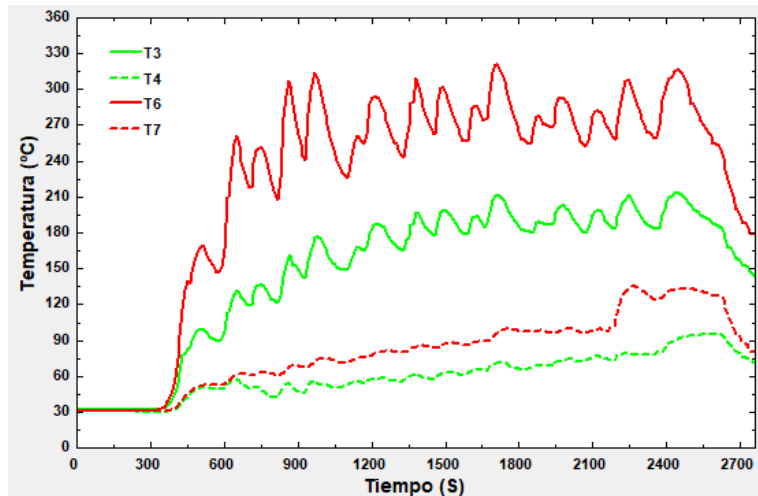
Anexo 11 (Continuación). Gráficas de temperaturas por pruebas



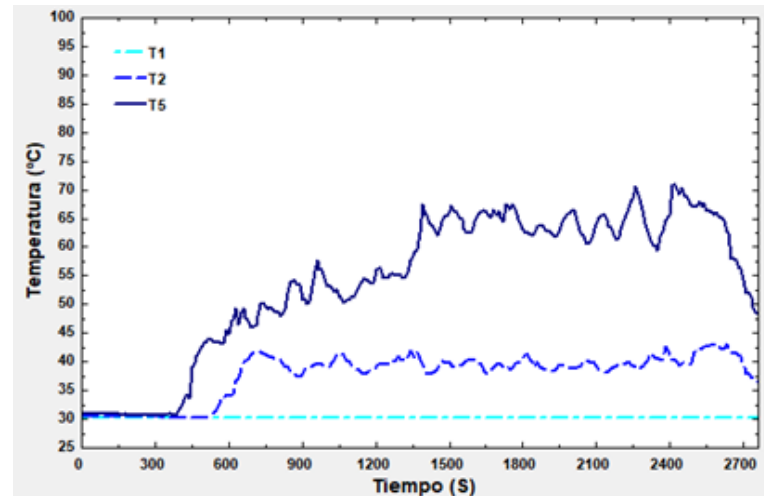
Temperatura de gases vs tiempo, Montaje 5 – Mezcla 1



Temperaturas del agua vs tiempo, Montaje 5 – Mezcla 1

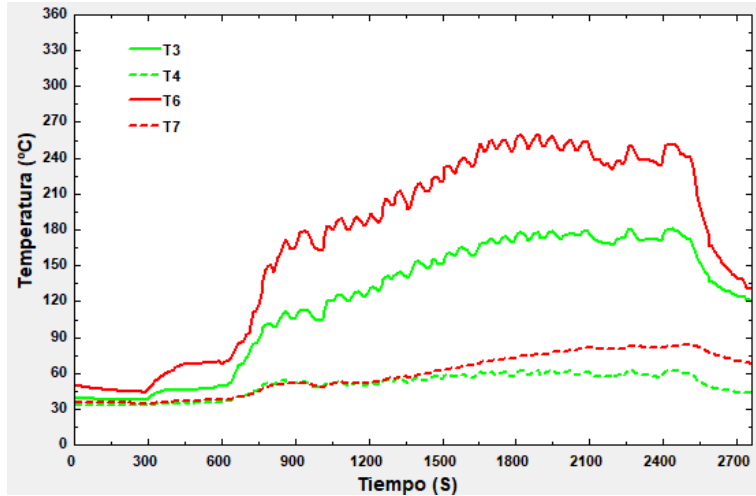


Temperatura de gases vs tiempo, Montaje 5 – Mezcla 2

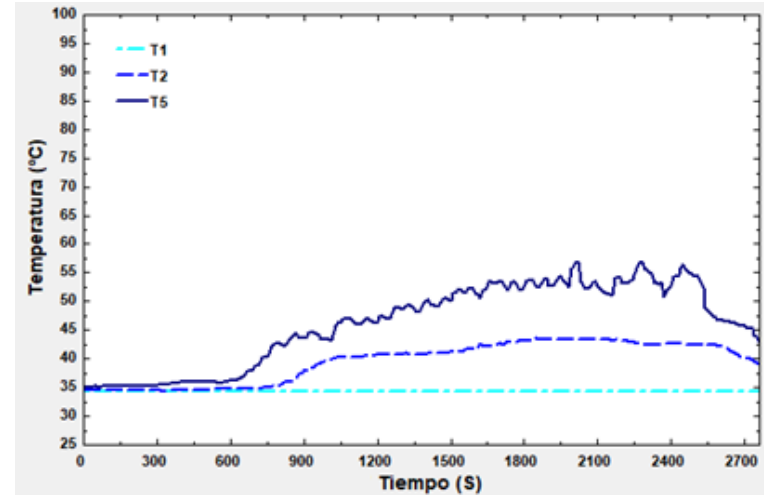


Temperaturas del agua vs tiempo, Montaje 5 – Mezcla 2

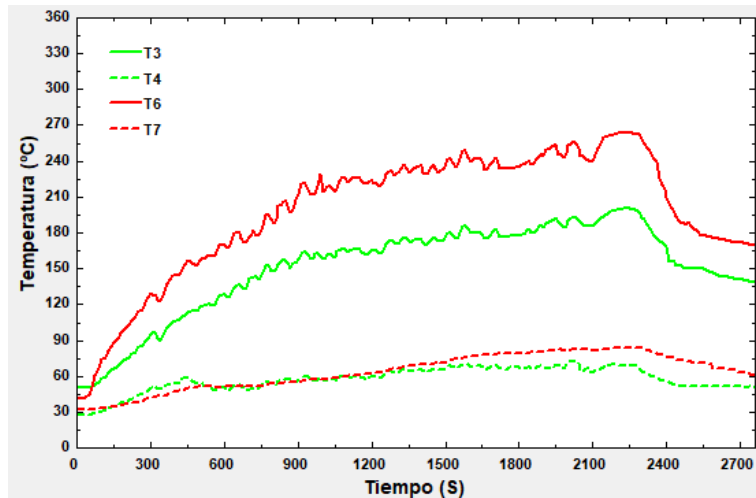
Anexo 11 (Continuación). Gráficas de temperaturas por pruebas



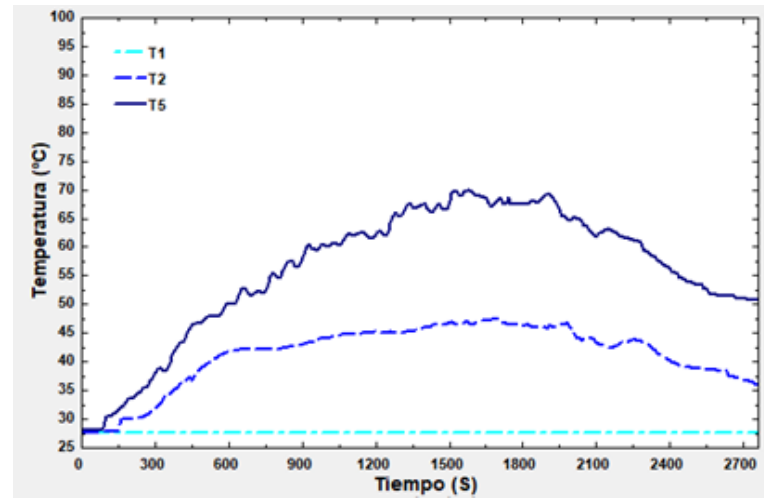
Temperatura de gases vs tiempo Montaje 5 – Mezcla 3



Temperaturas del agua vs tiempo, Montaje 5 – Mezcla 3

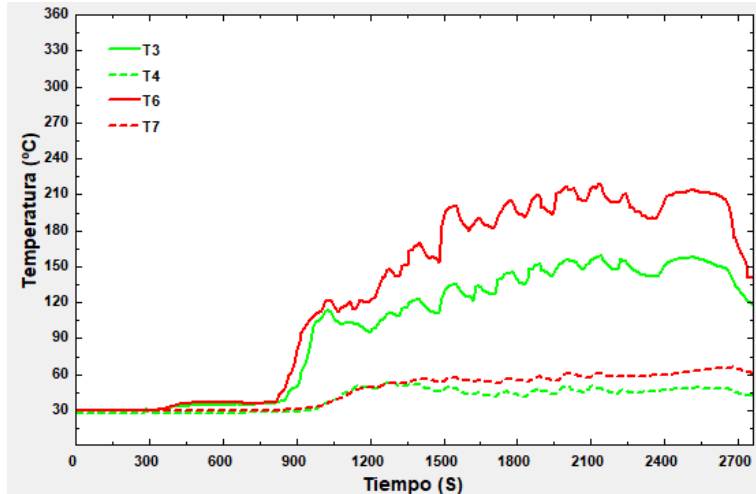


Temperatura de gases vs tiempo, Montaje 5 – Mezcla 4

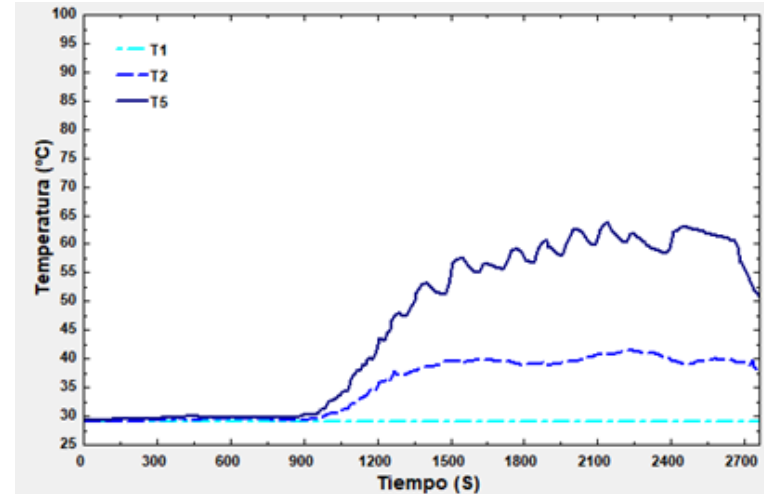


Temperaturas del agua vs tiempo, Montaje 5 – Mezcla 4

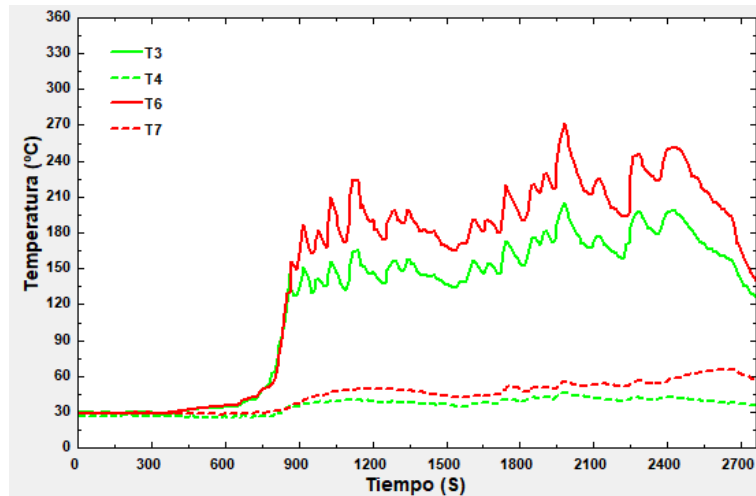
Anexo 11 (Continuación). Gráficas de temperaturas por pruebas



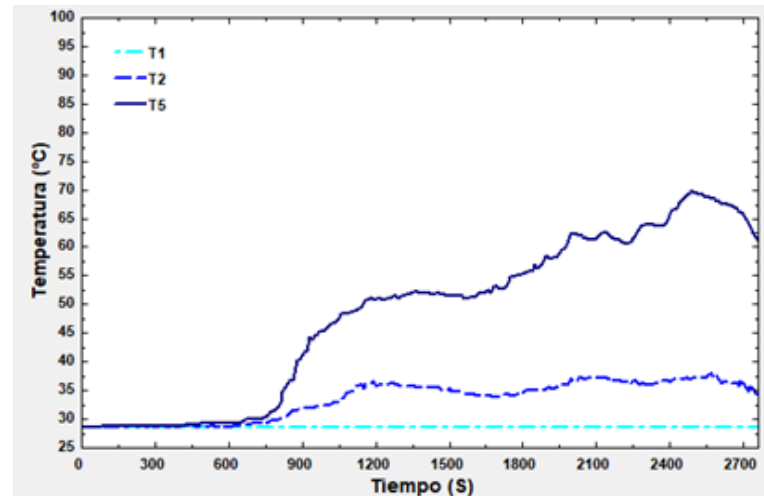
Temperatura de gases vs tiempo, Montaje 5 – Mezcla 5



Temperaturas del agua vs tiempo, Montaje 5 – Mezcla 5

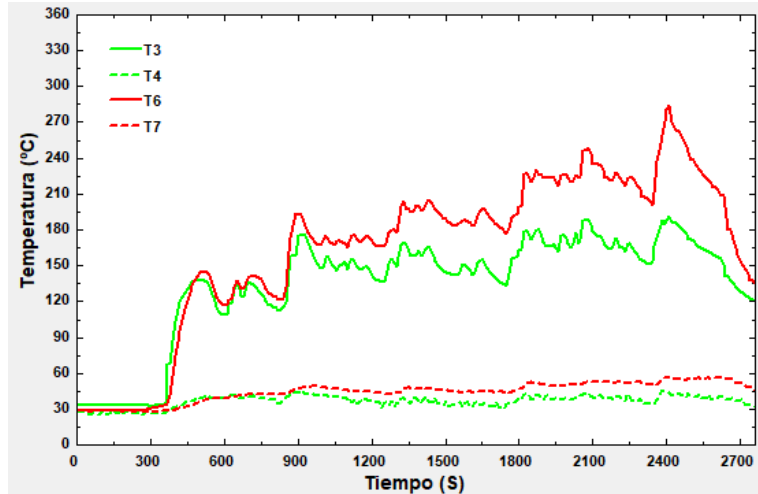


Temperatura de gases vs tiempo, Montaje 6 – Mezcla 1

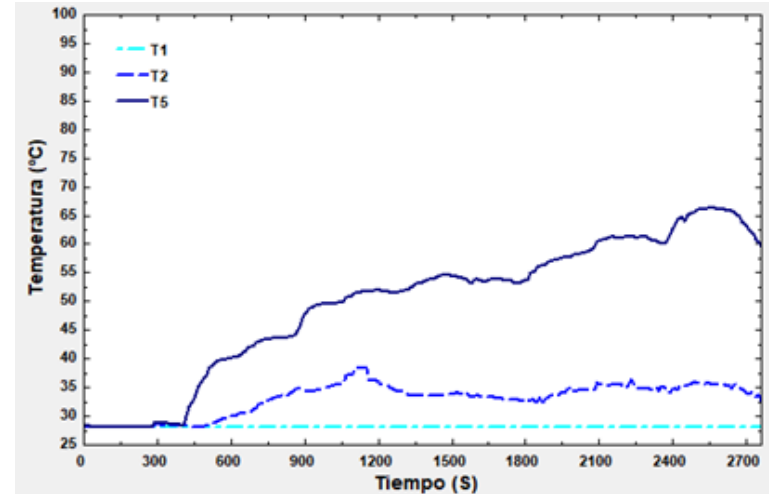


Temperaturas del agua vs tiempo, Montaje 6 – Mezcla 1

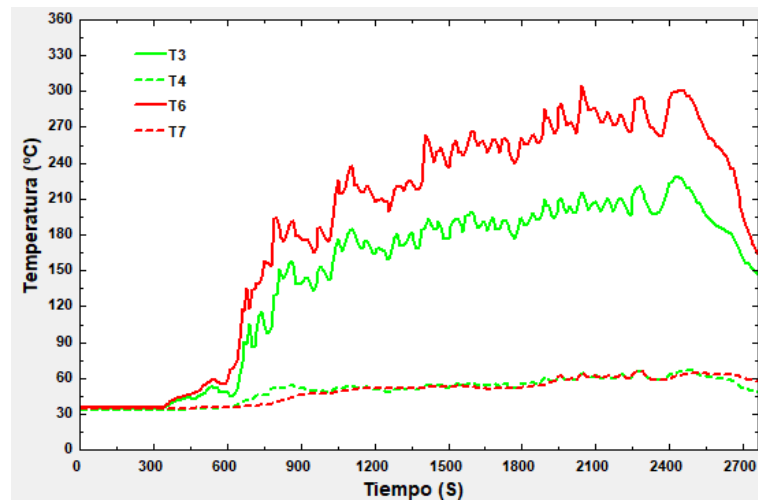
Anexo 11 (Continuación). Gráficas de temperaturas por pruebas



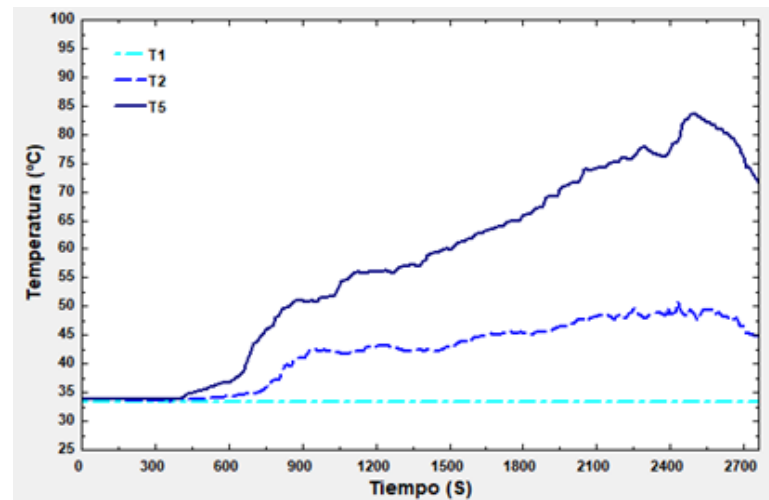
Temperatura de gases vs tiempo, Montaje 6 – Mezcla 2



Temperaturas del agua vs tiempo, Montaje 6 – Mezcla 2

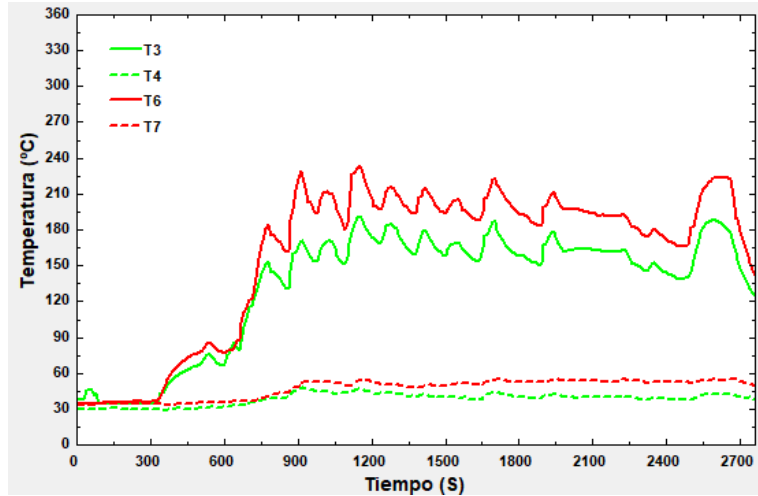


Temperatura de gases vs tiempo, Montaje 6 – Mezcla 3

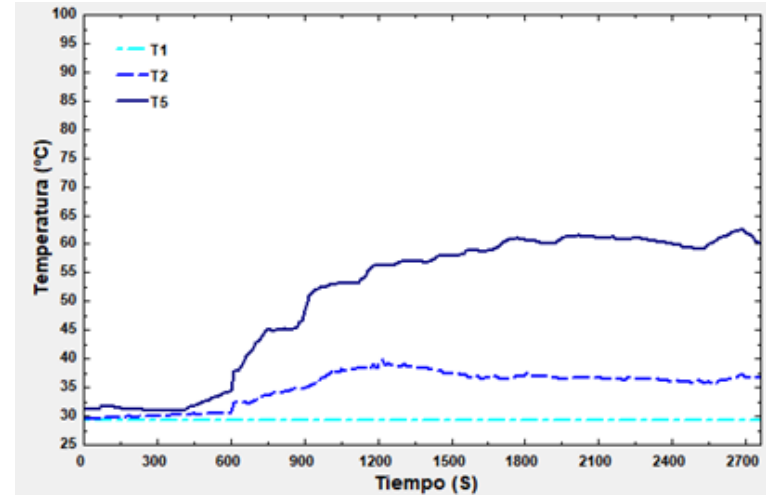


Temperaturas del agua vs tiempo, Montaje 6 – Mezcla 3

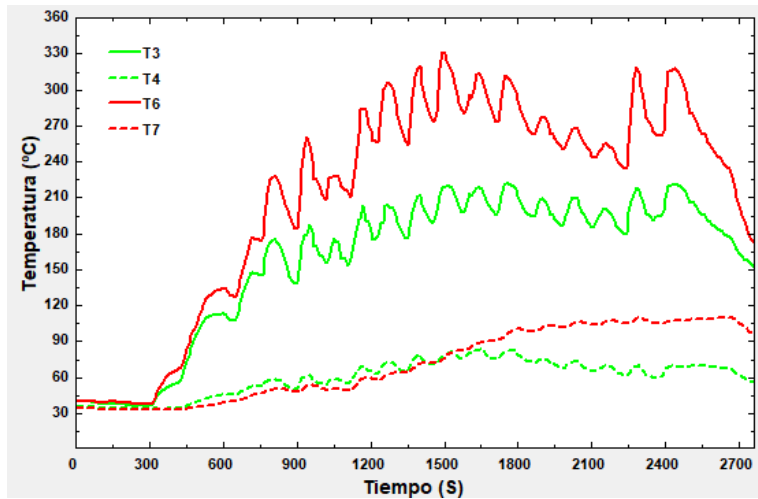
Anexo 11 (Continuación). Gráficas de temperaturas por pruebas



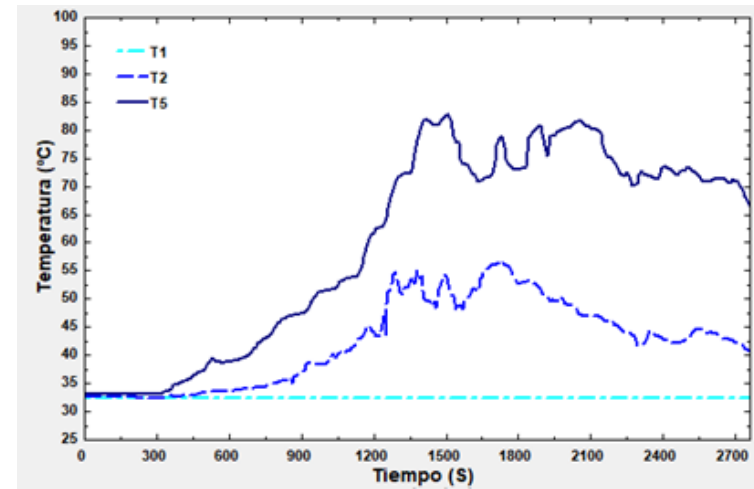
Temperatura de gases vs tiempo, Montaje 6 – Mezcla 4



Temperaturas del agua vs tiempo, Montaje 6 – Mezcla 4

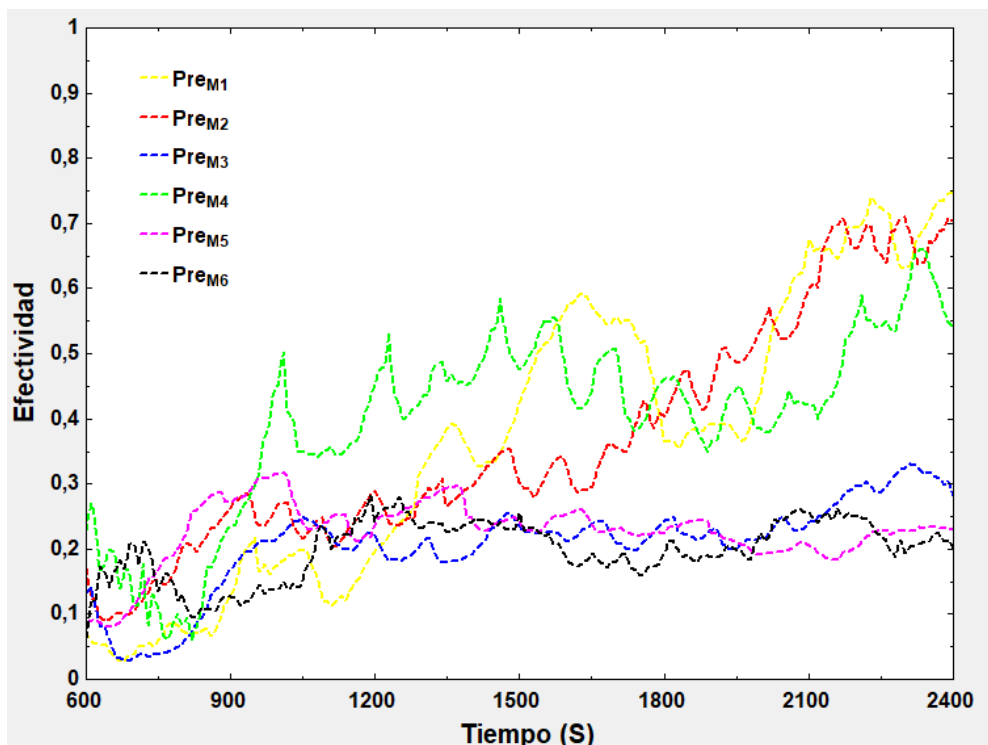


Temperatura de gases vs tiempo, Montaje 6 – Mezcla 5

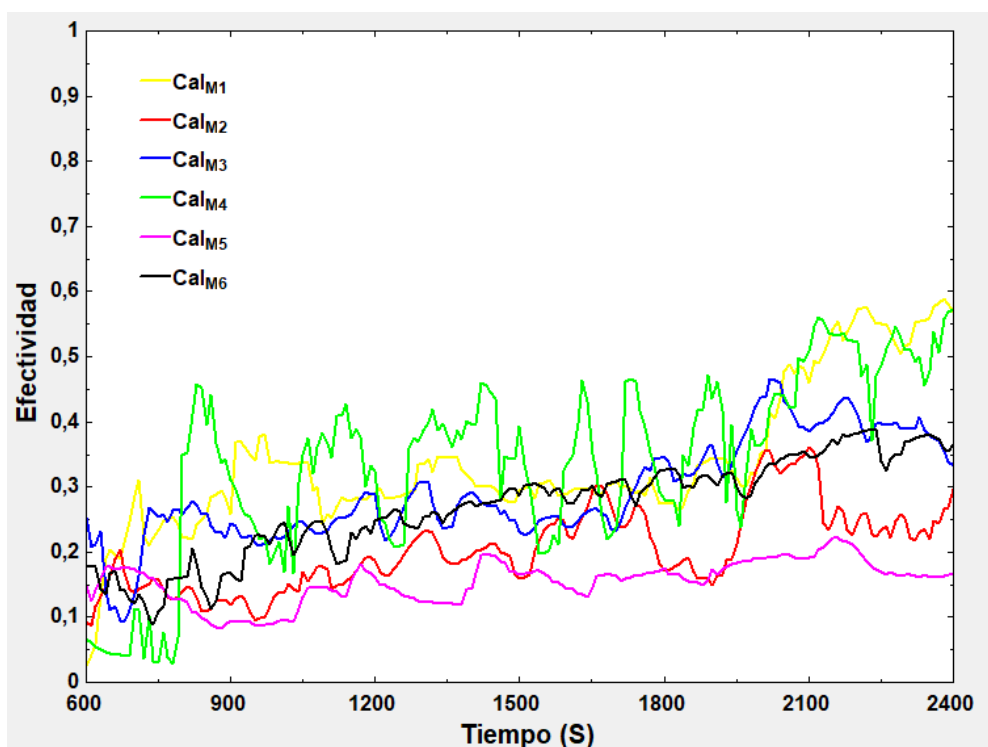


Temperaturas del agua vs tiempo, Montaje 6 – Mezcla 5

Anexo 12. Efectividad por mezclas para los 6 montajes disponibles

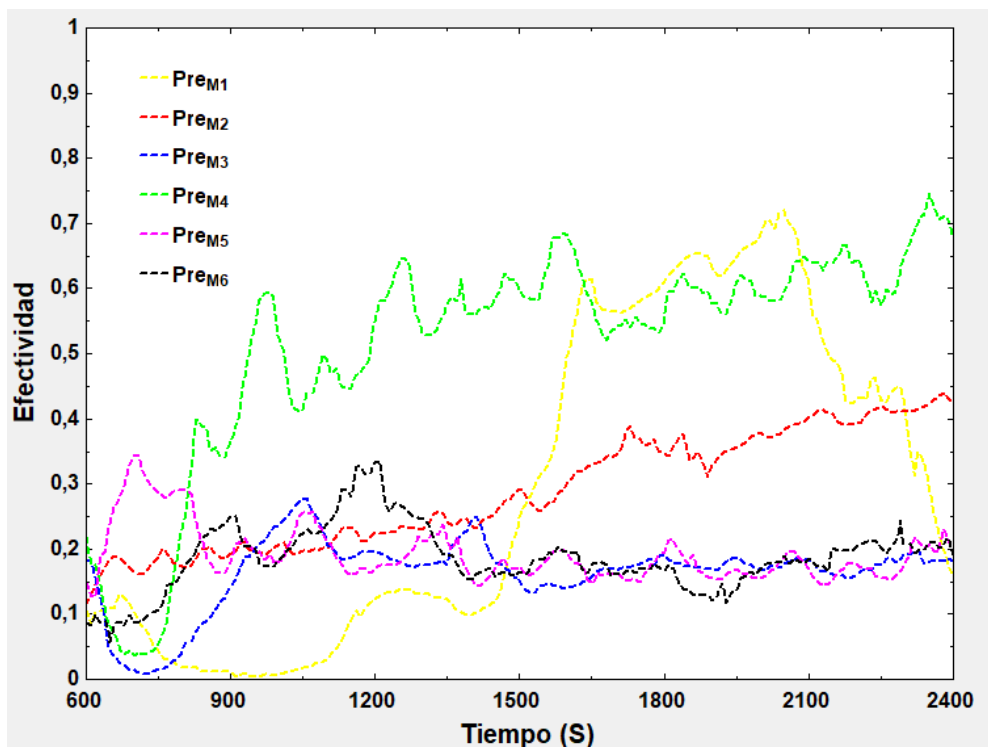


Efectividad vs tiempo - Pre calentamiento Mezcla 1

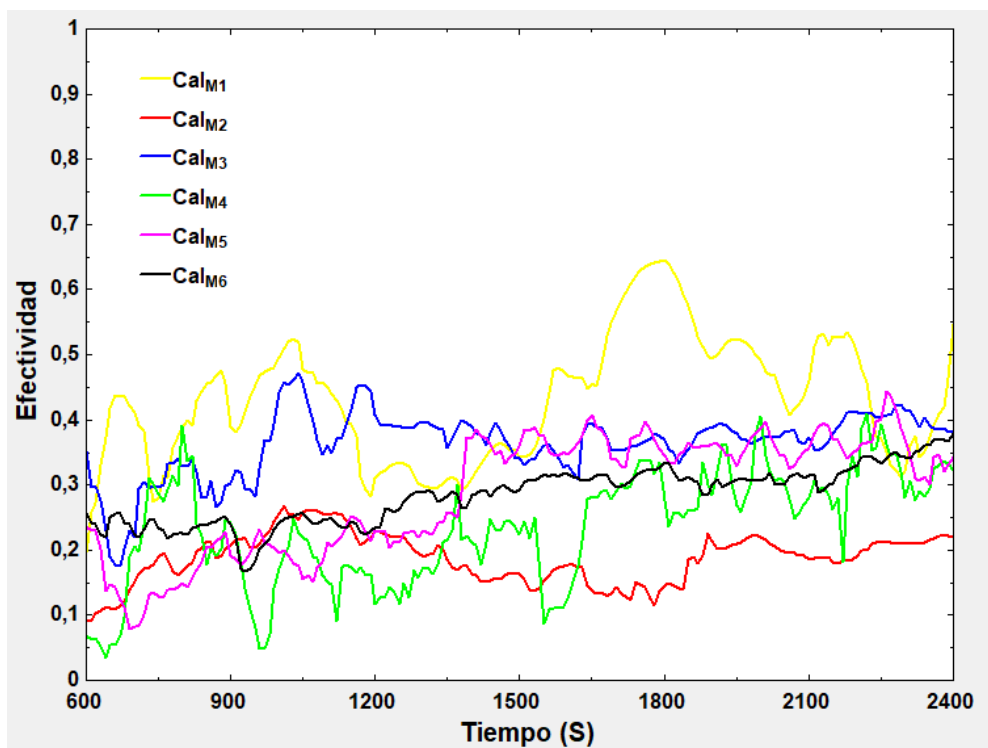


Efectividad vs tiempo - Calentamiento Mezcla 1

Anexo 12 (Continuación). Efectividad por mezclas para los 6 montajes disponibles

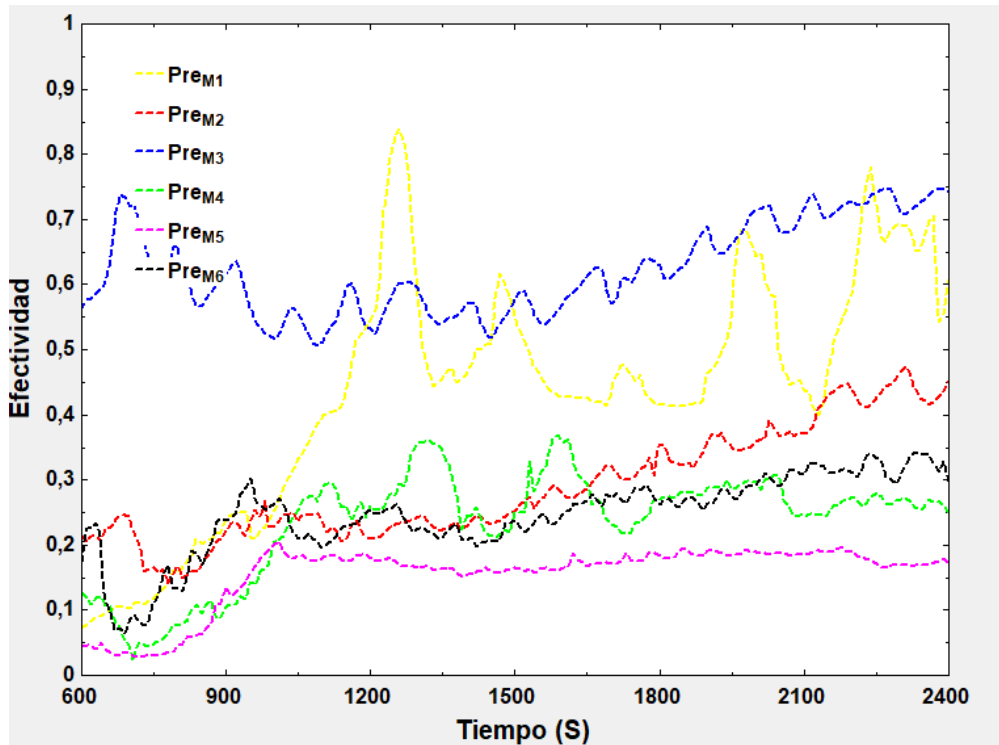


Efectividad vs tiempo - Pre calentamiento Mezcla 2

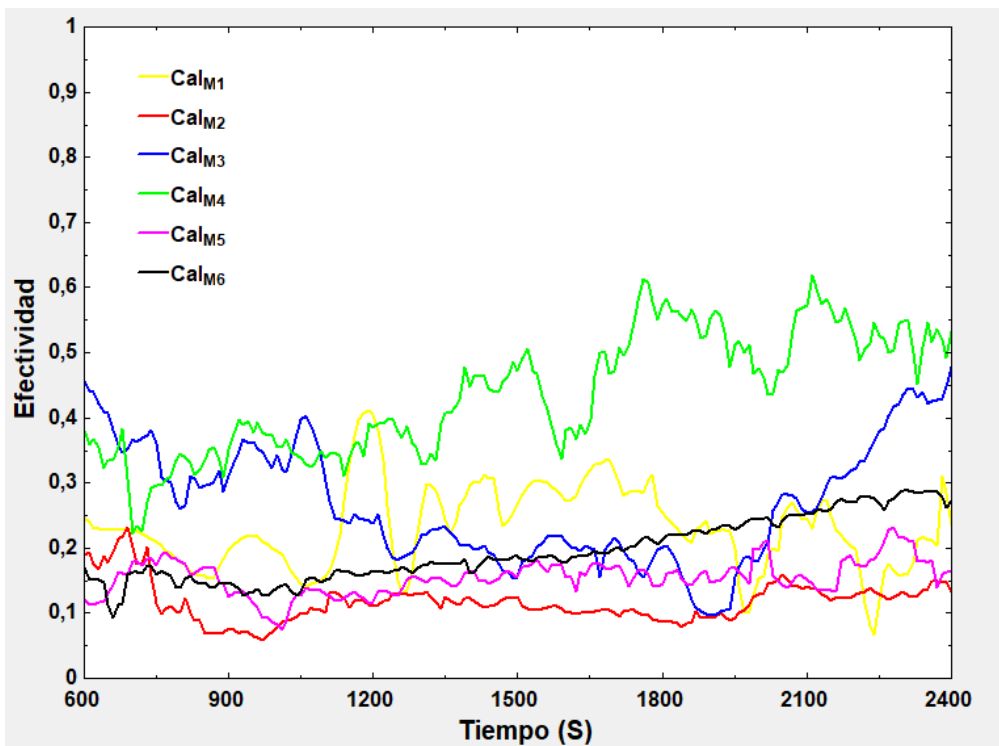


Efectividad vs tiempo - Calentamiento Mezcla 2

Anexo 12 (Continuación). Efectividad por mezclas para los 6 montajes disponibles

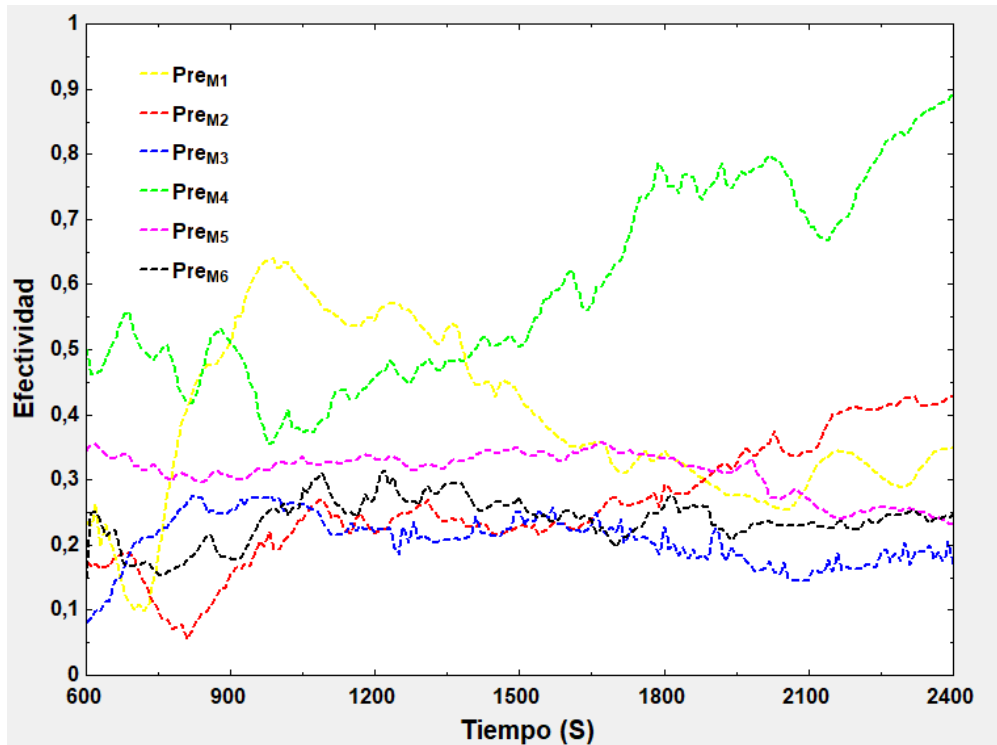


Efectividad vs tiempo - Precalentamiento Mezcla 3

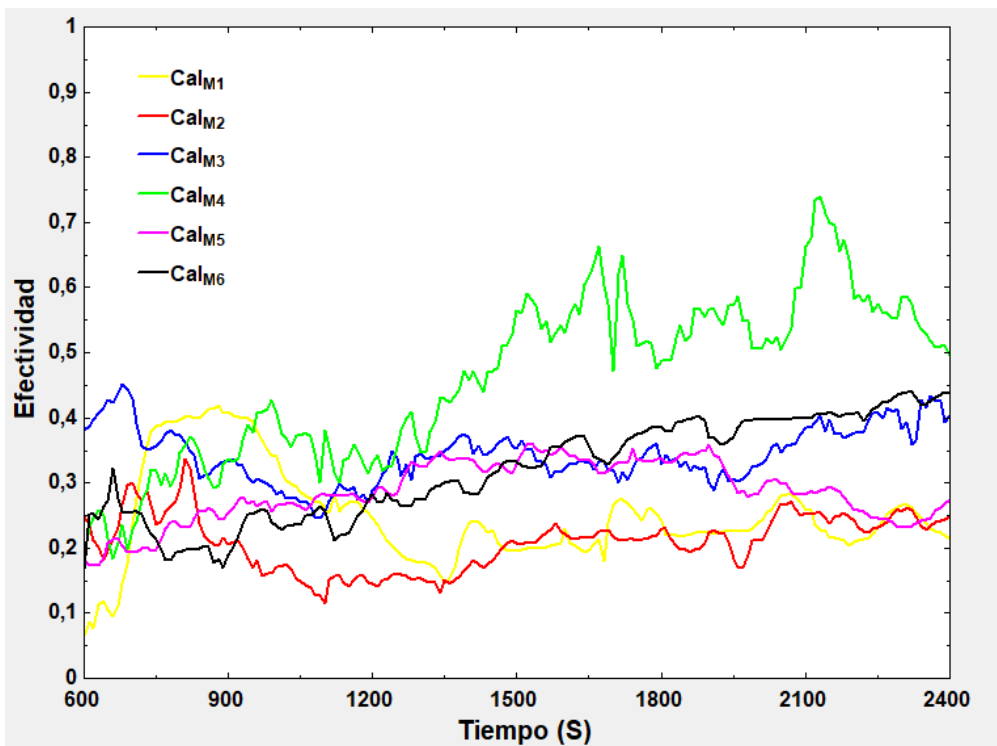


Efectividad vs tiempo - Calentamiento Mezcla 3

Anexo 12 (Continuación). Efectividad por mezclas para los 6 montajes disponibles

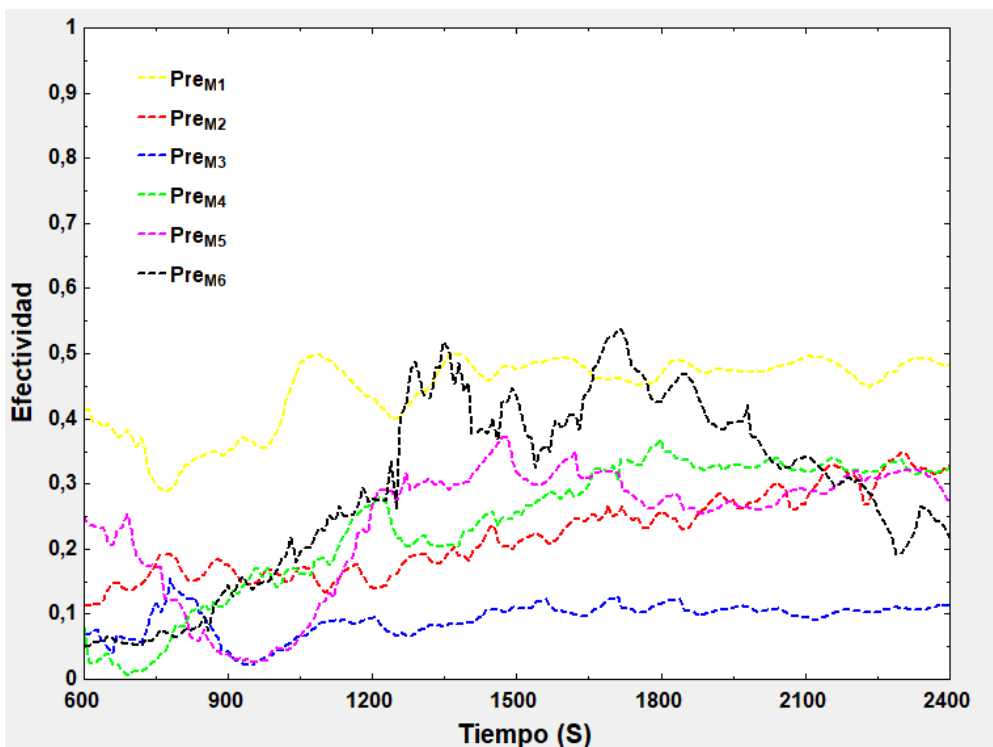


Efectividad vs tiempo - Pre calentamiento Mezcla 4

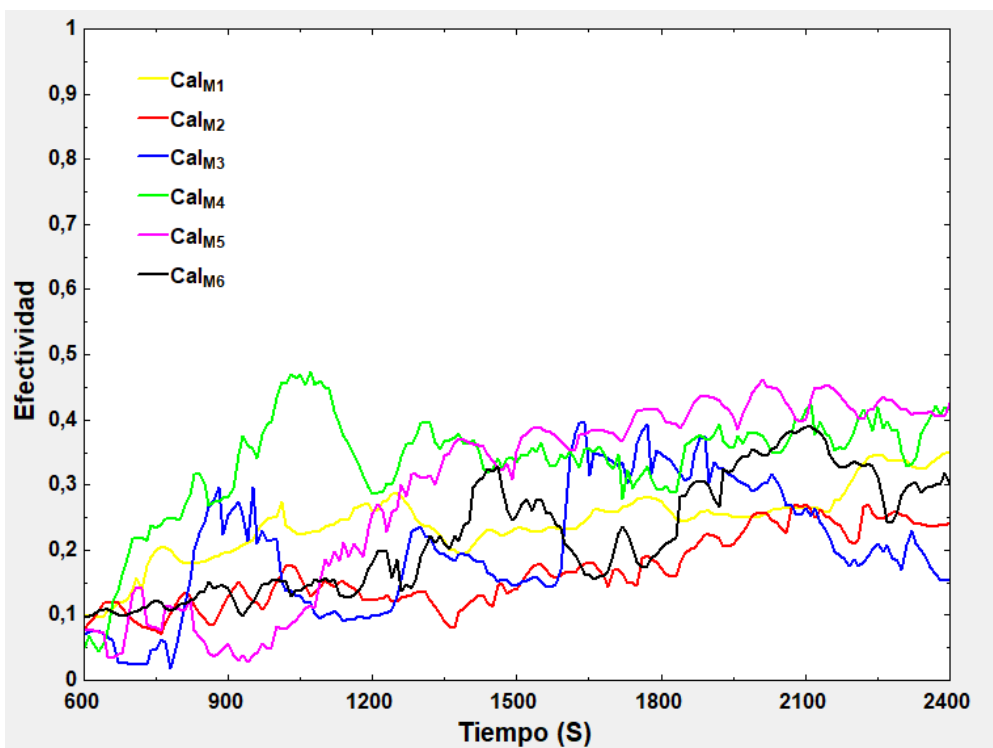


Efectividad vs tiempo - Calentamiento Mezcla 4

Anexo 12 (Continuación). Efectividad por mezclas para los 6 montajes disponibles



Efectividad vs tiempo - Precalentamiento Mezcla 5



Efectividad vs tiempo - Calentamiento Mezcla 5

Anexo 13. Resultados obtenidos de la modelación, propiedades y parámetros de transferencia de calor

	ρ (kg/m ³)		$C_{p \text{ gases}}$ (kJ/Kg °C)		m_{gases} (kg/s)		C_{gas} (kW/°C)		m_{agua} (kg/s)	C_{agua} (kW/°C)	U_{global} (kW/m ² °C)		Q_{real} (kW)	
	Pre	Cal	Pre	Cal	Pre	Cal	Pre	Cal	---	---	Pre	Cal	Pre	Cal
M1-1	0,9220	0,8618	1,0962	1,1005	0,0063	0,0066	0,0083	0,0093	0,0052	0,0218	0,0294	0,0098	0,8776	0,7688
M1-2	0,8820	0,8597	1,1000	1,0009	0,0054	0,0066	0,0072	0,0089	0,0060	0,0249	0,0233	0,0126	0,6914	0,7456
M1-3	0,8293	0,8028	1,0968	1,0994	0,0050	0,0061	0,0060	0,0077	0,0048	0,0199	0,0359	0,0151	0,7203	0,4636
M1-4	0,9707	0,9035	1,0892	1,0923	0,0059	0,0069	0,0074	0,0092	0,0042	0,0174	0,0244	0,0205	0,2527	0,3103
M1-5	0,9124	0,8652	1,0963	1,0992	0,0055	0,0066	0,0064	0,0081	0,0060	0,0249	0,0142	0,0049	0,3979	0,4129
M2-1	0,8085	0,7702	1,1017	1,1062	0,0056	0,0041	0,0076	0,0057	0,0042	0,0174	0,0134	0,0059	0,9883	0,3591
M2-2	0,8282	0,8170	1,1007	1,1020	0,0057	0,0043	0,0071	0,0054	0,0042	0,0174	0,0062	0,0050	0,5362	0,2107
M2-3	0,8794	0,8511	1,0924	1,0950	0,0060	0,0045	0,0081	0,0062	0,0039	0,0161	0,0072	0,0052	0,5384	0,1410
M2-4	0,8797	0,8574	1,0918	1,0939	0,0060	0,0045	0,0081	0,0062	0,0043	0,0180	0,0061	0,0077	0,5131	0,2440
M2-5	0,8749	0,8073	1,0968	1,1024	0,0060	0,0043	0,0073	0,0054	0,0033	0,0139	0,0048	0,0044	0,4142	0,2621
M3-1	0,9182	0,8833	1,0913	1,0942	0,0047	0,0042	0,0062	0,0058	0,0037	0,0155	0,0033	0,0114	0,2459	0,3867
M3-2	0,9397	0,8980	1,0915	1,0941	0,0049	0,0043	0,0062	0,0057	0,0044	0,0184	0,0030	0,0139	0,1140	0,3292
M3-3	0,9603	0,8908	1,0858	1,0892	0,0050	0,0042	0,0061	0,0053	0,0046	0,0193	0,0150	0,0140	0,5453	0,3411
M3-4	0,9724	0,8811	1,0847	1,0884	0,0050	0,0042	0,0057	0,0052	0,0033	0,0139	0,0031	0,0132	0,1378	0,3118
M3-5	1,0326	0,9781	1,0886	1,0900	0,0053	0,0047	0,0062	0,0057	0,0033	0,0139	0,0017	0,0105	0,0459	0,1823
M4-1	0,8663	0,8392	1,0989	1,1020	0,0033	0,0030	0,0046	0,0043	0,0039	0,0163	0,0117	0,0100	0,4446	0,4462
M4-2	0,8494	0,8190	1,1010	1,1047	0,0032	0,0029	0,0045	0,0043	0,0032	0,0133	0,0154	0,0077	0,4836	0,2597
M4-3	0,8273	0,8146	1,0971	1,0980	0,0031	0,0029	0,0043	0,0039	0,0038	0,0158	0,0051	0,0123	0,1975	0,4282
M4-4	0,8281	0,7965	1,0954	1,0984	0,0031	0,0028	0,0036	0,0033	0,0046	0,0193	0,0260	0,0170	0,5388	0,4635
M4-5	0,8628	0,8502	1,0997	1,1007	0,0033	0,0030	0,0045	0,0042	0,0031	0,0130	0,0050	0,0098	0,2374	0,3000
M5-1	0,9375	0,8707	1,0974	1,1008	0,0049	0,0044	0,0059	0,0056	0,0032	0,0133	0,0092	0,0037	0,1524	0,1789
M5-2	0,8766	0,7606	1,1020	1,1125	0,0046	0,0039	0,0056	0,0050	0,0035	0,0146	0,0099	0,0076	0,1814	0,4608

Anexo 13 (Continuación). Resultados obtenidos de la modelación, propiedades y parámetros de transferencia de calor

	ρ (kg/m ³)		C_p gases (kJ/Kg °C)		m_{gases} (kg/s)		C_{gas} (kW/°C)		m_{agua} (kg/s)	C_{agua} (kW/°C)	U_{global} (kW/m ² °C)		Q_{real} (kW)	
	Pre	Cal	Pre	Cal	Pre	Cal	Pre	Cal	---	---	Pre	Cal	Pre	Cal
M5-3	0,9272	0,8481	1,0939	1,0988	0,0048	0,0043	0,0062	0,0059	0,0035	0,0146	0,0054	0,0037	0,1346	0,2092
M5-4	0,8814	0,8155	1,0950	1,1001	0,0046	0,0041	0,0054	0,0050	0,0032	0,0134	0,0103	0,0065	0,2643	0,3153
M5-5	0,9832	0,9291	1,0970	1,0994	0,0051	0,0047	0,0064	0,0062	0,0039	0,0164	0,0111	0,0095	0,2032	0,3785
M6-1	0,9491	0,8994	1,0925	1,0950	0,0040	0,0066	0,0052	0,0090	0,0042	0,0174	0,0060	0,0059	0,1534	0,5055
M6-2	0,9340	0,8846	1,0940	1,0964	0,0039	0,0065	0,0046	0,0078	0,0040	0,0167	0,0074	0,0057	0,1739	0,4448
M6-3	0,8939	0,8370	1,0906	1,0949	0,0038	0,0061	0,0050	0,0085	0,0034	0,0143	0,0070	0,0037	0,2338	0,4276
M6-4	0,9267	0,8786	1,0882	1,0907	0,0039	0,0064	0,0049	0,0083	0,0043	0,0178	0,0066	0,0073	0,1852	0,4416
M6-5	0,8627	0,7877	1,0969	1,0969	0,0036	0,0058	0,0045	0,0077	0,0034	0,0143	0,0131	0,0054	0,3478	0,4903