

**DISEÑO DE LA PLANTA DE UTILIDADES DE UN PROCESO DE INCINERACIÓN  
DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS – UN CASO DE ESTUDIO: RISARALDA,  
COLOMBIA**

**HERNÁN DARÍO PATIÑO DUQUE**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA  
PEREIRA**

**2017**

**DISEÑO DE LA PLANTA DE UTILIDADES DE UN PROCESO DE INCINERACIÓN  
DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS – UN CASO DE ESTUDIO: RISARALDA,  
COLOMBIA**

**HERNÁN DARÍO PATIÑO DUQUE**

**Director:**

**Ing. ÁNGEL ANDRADE MORALES**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA  
PEREIRA**

**2017**

**DISEÑO DE LA PLANTA DE UTILIDADES DE UN PROCESO DE INCINERACIÓN DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS – UN CASO DE ESTUDIO: RISARALDA, COLOMBIA**

Nota de aceptación

---

---

---

---

---

Msc. Ángel Andrade Morales  
Director

---

Ph.D Juan Esteban Tibaquirá.  
Director                      Programa                      Ingeniería  
Mecánica

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Disposición de los RSU a caracterizar [1].....	9
Figura 2. Esparcimiento de los RSU en la zona de medición [1].....	9
Figura 3. Separación de los RSU por tipo [1].....	10
Figura 4. Caracterización de los residuos orgánicos [1].....	11
Figura 5. Caracterización física de los RSU, vertedero La Glorita .....	11
Figura 6. Diagrama de proceso de la planta WTE .....	17
Figura 7. Diagrama de flujo del ciclo de vapor .....	19
Figura 8. Diagrama de evolución de temperaturas en el condensador.....	21
Figura 9. Diagrama de evolución de temperaturas en el regenerador cerrado .....	24
Figura 10. Resultados del modelo termodinámico.....	30

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Fecha de inicio y clausura de diferentes vasos del vertedero La Glorita.....	6
Tabla 2. Cantidad de RSU y clasificación por tipo.....	12
Tabla 3. Composición elemental en peso (base seca) de los RSU.....	12
Tabla 4. Parámetros de diseño de la planta de vapor.....	20
Tabla 5. Composición elemental en peso (base seca) de los RSU clasificados.....	28
Tabla 6. Condiciones de operación de la planta de utilidades.....	29
Tabla 7. Evaluación de la planta.....	31

## LISTA DE SIMBOLOS

C. E. V	Consumo específico de vapor [kg/kW·h]
v	Volumen específico [m <sup>3</sup> /kg·K]
h	Entalpia específica [kJ /kg]
$\dot{m}$	Flujo másico [kg/s]
$\dot{m}_{\text{vapor.ten}}$	Flujo másico de vapor tentativo [kg/s]
P	Presión [kPa]
PCI	Poder calorífico inferior [kJ /kg]
PCS	Poder calorífico superior [kJ /kg]
$\dot{Q}_{\text{cald}}$	Flujo de calor transmitido por la calderas al fluido [kW]
s	Entropía específica [kJ/kg·K]
T	Temperatura [°C]
$\dot{W}_{\text{cons}}$	Potencia de red o consumo [kW]
$\dot{W}_{\text{neta}}$	Potencia neta [kW]
$\dot{W}_{\text{TV}}$	Potencia de la turbina de vapor [kW]
$\dot{W}_{\text{B}}$	Potencia de bomba [kW]
DTF	Diferencia de temperaturas de los fluidos en regenerador tipo superficie [°C]
X	Calidad [-]
B	Bomba
Cond	Condensador
CV	Colector de vapor
$(\Delta T)_{\text{K-T}}$	Caída de temperatura entre la caldera y la turbina [°C]
$(\Delta P)_{\text{B-T}}$	Caída de presión entre bombas y turbina [kPa]
$\eta_{\text{mec}}$	Eficiencia mecánica
$\eta_{\text{trans}}$	Eficiencia del transformador eléctrico
$\eta_{\text{aux}}$	Eficiencia de equipos auxiliares
$\eta_{\text{gen}}$	Eficiencia del generador eléctrico
$\eta_{\text{cald}}$	Eficiencia térmica de la caldera
$\eta_{\text{b}}$	Eficiencia isentrópica de bombas
$\eta_{\text{TVAP}}$	Eficiencia isentrópica de la turbina de alta presión
$\eta_{\text{TVBP}}$	Eficiencia isentrópica de la turbina de baja presión
Cond	Condensador
IA	Intercambiador de calor tipo abierto
IC	Intercambiador de calor tipo cerrado
EES	<i>Engineering Equation Solver</i>
VT	Trampa de vapor
CV	Colector de vapor
B	Bomba
TVAP	Turbina de vapor de alta presión
TVBP	Turbina de vapor de baja presión
HRSG	Caldera recuperadora de calor
$(\Delta T)_{\text{opt}}$	Diferencia de temperatura óptima

## TABLA DE CONTENIDO

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
1.1. Motivación. ....	1
1.2. Definición del problema .....	2
1.3. Objetivo General .....	2
1.4. Objetivos Específicos .....	2
1.5. Estructura del documento .....	3
<b>2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</b> .....	4
2.1. Aspectos generales .....	4
2.1.1. Conceptos básicos de los residuos sólidos .....	4
2.1.2. Clasificación de los residuos sólidos.....	4
2.1.3. Residuos sólidos urbanos (RSU) .....	5
2.1.4. Revisión de la disposición final de los RSU - Caso de estudio: Relleno Sanitario La Glorita, Risaralda Colombia .....	5
2.1.5. Revisión del sector energético en Colombia .....	6
2.2. Técnicas WASTE-TO-ENERGY .....	7
<b>3. CARACTERIAZACIÓN DE LOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)</b> .....	8
3.1. Caracterización de los RSU según el reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico- Sistemas de aseo urbano .....	8
3.1.1. Disposición de los residuos sólidos en la zona de medición .....	8
3.1.2. Clasificación de los RSU .....	9
3.1.3. Caracterización de residuos orgánicos .....	10
3.1.4. Caracterización de residuos inorgánicos .....	11
3.2. Cálculo del PCI de los RSU.....	13
<b>4. PLANTA DE TRATAMIENTO DE RSU PROPUESTA PARA EL CASO DE ESTUDIO</b> .....	15
4.1. Descripción de la planta de proceso.....	15
4.1.1. Alimentación .....	15
4.1.2. Horno.....	15
4.1.3. Sistema de depuración y evacuación de los gases de combustión .....	16
4.1.4. Sistema de evacuación de cenizas y escorias .....	16
4.1.5. Sistema de recuperación de energía .....	16
4.2. Diseño de la planta de utilidades .....	18

4.2.1.	Metodología de diseño.....	18
4.2.2.	Recalentamiento .....	22
4.2.3.	Regeneradores o calentadores tipo cerrados y abiertos .....	23
4.2.4.	Componentes del ciclo termodinámico .....	25
4.3.	Escenarios técnicos.....	28
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS Y RECOMENDACIONES</b> .....	<b>29</b>
5.1.	Condiciones de operación de la planta.....	29
5.2.	Evaluación de la planta, resultado de los escenarios técnicos .....	31
5.3.	Recomendaciones .....	31
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>32</b>
	<b>REFERENCIAS</b> .....	<b>33</b>





# ***1. INTRODUCCIÓN***

## **1.1. Motivación.**

Según la definición dada por Medina et al [2], los residuos sólidos urbanos (RSU), son los materiales desechados por los domicilios, incluyendo los que se generan en la actividad comercial y de servicios. Según Lin et al [3] los RSU se clasifican en los subgrupos: papel, cartón, plástico, vidrio, metal, textiles, materia orgánica, otros, clasificación necesaria para realizar estudios del aprovechamiento energético de los RSU. Organizaciones gubernamentales como [4], [5], han demostrado intereses para reducir el volumen de los residuos urbanos generados por la actividad doméstica, el comercio y la industrialización, buscando nuevas alternativas para la preservación del medio ambiente.

Existen diferentes técnicas que permiten recuperar el recurso energético de los residuos, a estas se les conoce como Waste-to-Energy, por sus siglas en inglés (WTE, Recuperación de energía de los residuos) que simultáneamente minimizan el volumen de desechos y los vertederos [6].

Una de las técnicas WTE es la incineración: una tecnología de combustión directa en la que el material de alimentación se transforma directamente en energía [7], Donde los principales compuestos emitidos son: CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono), N<sub>2</sub>O (óxido nitroso), NO<sub>x</sub> (óxidos de nitrógeno), NH<sub>3</sub> (amoníaco) y C (carbono) [8].

Por otro lado, la energía eléctrica es un elemento esencial para el progreso económico-social de una nación, ya que es la forma de energía más utilizada en procesos industriales y que es utilizada a diario por la población [9]. Las plantas generadoras de electricidad que utilizan la recuperación energética de los residuos sólidos urbanos se han establecido en todo el mundo como un método sostenible para la eliminación de los desechos [10]. Autores como Michele Bianchi, et al [11], muestran en sus estudios el aprovechamiento de los RSU a través de la integración de una planta de energía WTE en ciclos termodinámicos avanzados. En el siguiente trabajo de grado se propone una planta de incineración con recuperación energética para la región de Risaralda, se muestra la planta de utilidades, la cual opera bajo un ciclo Rankine y se estiman sus condiciones de operación según los criterios de diseño vistos en el curso de plantas térmicas, además se estima la cantidad de combustible para satisfacer una demanda energética dependiendo de los RSU recolectados en

el departamento. Finalmente se realizarán recomendaciones a posibles mejoras sobre las presentadas en la generación de energía eléctrica.

## 1.2. Definición del problema

Los residuos sólidos urbanos pueden generar problemas ambientales importantes como la reducción de espacio, y en el caso de la fracción orgánica los malos olores y la posible aparición de insectos y otros organismos vivos [12]. Considerando lo anterior, se han planteado propuestas para reducir el volumen y problemas de los RSU, como se muestra en [13]; una técnica para lograr esto es la incineración. De acuerdo con [14], [15] la incineración de residuos sólidos puede atender a tres objetivos: estabilización de los residuos para reducir la generación de biogás y lixiviados, reducción de volumen y para el aprovechamiento energético de los mismos en forma de energía eléctrica y calor. Se propone mediante este proyecto de grado realizar un estudio técnico que permita generar una propuesta de estudio de una planta de incineración para el departamento de Risaralda con el fin de reducir la problemática ambiental generada por los RSU, además disminuir la cantidad de vertidos en el relleno sanitario La Glorita y para generación de energía eléctrica mediante la implementación de un ciclo termodinámico.

## 1.3. Objetivo General

Realizar el análisis energético a una planta térmica que opera bajo el ciclo Rankine, mediante la quema directa de residuos sólidos urbanos.

## 1.4. Objetivos Específicos

- 1.4.1. Caracterizar los residuos sólidos urbanos del relleno sanitario La Glorita;
- 1.4.2. Proponer el ciclo termodinámico e implementar una metodología de diseño para determinar las condiciones de operación de la planta, el modelo termodinámico será realizado en el software EES;
- 1.4.3. Analizar dos escenarios técnicos de aprovechamiento energético y evaluar la cantidad de RSU para satisfacer la necesidad energética determinada en el objetivo específico anterior;
- 1.4.4. Realizar análisis de resultados y proponer recomendaciones.

## 1.5. Estructura del documento

El documento se divide en cinco capítulos. El capítulo inicial corresponde a la introducción; en ésta se define el problema y el por qué se realiza el caso de estudio. En este capítulo también se muestran los objetivos propuestos y alcanzados para la elaboración del documento.

En el capítulo dos se muestra la fundamentación teórica correspondiente a las generalidades de los residuos sólidos urbanos, como su clasificación dependiendo del país en los cuales son tratados.

En el capítulo tres se realiza la caracterización de los residuos sólidos urbanos del relleno sanitario La Glorita, vertedero correspondiente para los departamentos de Risaralda, norte del Valle, Caldas y cierta región del departamento del Quindío. En este capítulo se muestra la clasificación de los residuos realizada por la empresa ATESA DE OCCIDENTE ESP, además se exponen las diferentes correlaciones y la respectiva estimación del poder calorífico inferior de los RSU.

En el capítulo cuatro se propone la planta de tratamiento de RSU, se describe el proceso de incineración y las diferentes sub-partes que componen la planta: sistema recepción y alimentación del residuo, sistema de combustión, sistema de recuperación de energía, y el sistema de depuración de gases, se sustenta la disposición de los dispositivos que conforman la planta de utilidades y se expone la metodología de diseño para determinar las condiciones de operación de la misma.

Por último en el capítulo cinco se presentan los resultados, los análisis, los aportes y conclusiones más importantes del tema de investigación abordado.

## 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Aspectos generales

#### 2.1.1. Conceptos básicos de los residuos sólidos

En Colombia el término residuo sólido hace referencia a cualquier material, sustancia o elemento sólido resultante del consumo o uso de un bien en actividades domésticas, industriales, comerciales, de servicios, que el generador abandona, rechaza o entrega y que es susceptible de transformación en un nuevo bien, con un valor económico o de disposición final [16]. Para Tchobanoglous, los residuos sólidos son todos los desechos que proceden de actividades humanas y de animales y que se abandonan como inútiles o indeseados [17].

#### 2.1.2. Clasificación de los residuos sólidos

Hay diferentes criterios para categorizar los RSU y cada país los clasifica en diversas formas, pero estructuralmente conservan algunas características desde su generación en la fuente hasta la disposición final. Entre las clasificaciones se tienen:

##### ✓ Según su estructura química

**Residuos orgánicos:** Son los residuos que en algún momento tuvieron vida, estos formaron parte de un ser vivo o derivan de los procesos de transformación de combustibles fósiles, tienen la característica de ser biodegradables, es decir, se pueden descomponer naturalmente.

**Residuos inertes:** Son los residuos que no experimentan transformación química o biológicas significativas, es decir no son biodegradables, estos generalmente provienen de la extracción, procesamiento o utilización de los recursos naturales.

##### ✓ De acuerdo a la fuente generadora

La fuente de generación es un parámetro importante para clasificar los residuos sólidos, debido a que sus propiedades se determinan por la forma y el espacio donde se originan. Teniendo en cuenta su fuente los residuos sólidos pueden ser: residuos sólidos urbanos, residuos hospitalarios o sanitarios, residuos industriales, residuos agropecuarios, residuos radioactivos, residuos de construcción y demolición.

Este trabajo de grado se centrará en los residuos sólidos urbanos, donde se muestran sus características y propiedades para el aprovechamiento energético de los mismos.

### 2.1.3. Residuos sólidos urbanos (RSU)

La población colombiana entiende por RSU a todos los desechos que se generan en los espacios urbanizados, resultado de las actividades de consumo y gestión de actividades domésticas y de servicio consecuencia de los mercados, oficinas, hostelería, entre otros. Los residuos sólidos urbanos son una compleja mezcla de desechos alimenticios, plásticos, papel, material inerte y algunos otros componentes. Por tal razón, resulta difícil realizar estudios y obtener resultados repetibles debido a las diferentes mezclas y variación de RSU de una región a otra. Los residuos sólidos urbanos generados en las zonas rurales tienen una composición distinta a los generados en las ciudades. Así, por ejemplo, en las zonas rurales el contenido de materia orgánica es menor, debido al aprovechamiento de ésta en la alimentación de animales [18], no solo los constituyentes varían, también lo hacen los porcentajes de humedad.

Los RSU son heterogéneos, de características y composición variable, y dependen entre otros factores de la condición socioeconómica de la región. Los RSU se clasifican según [18] en:

- Inertes: cenizas y tierras, cristal, envases metálicos, huesos, entre otros.
- Fermentables: residuos orgánicos, restos vegetales, podas, biomasa, etc.
- Combustibles: plásticos, papel, cartón, madera, telas, cueros, gomas, entre otros.

### 2.1.4. Revisión de la disposición final de los RSU - Caso de estudio: Relleno Sanitario La Glorita, Risaralda Colombia

El crecimiento poblacional ha causado un incremento exponencial en la generación de RSU y estos deben ser dispuestos en espacios adecuados para su manejo y su posible aprovechamiento, este es un caso de estudio: el relleno sanitario La Glorita, ubicado en el corregimiento de Combia Baja, a 14 Km del casco urbano de la ciudad de Pereira. En éste un total de 30 municipios de 4 departamentos (Risaralda, Quindío, Valle del Cauca, Caldas) descargan sus residuos, y la ciudad capital de Risaralda aporta alrededor de 420,56 ton/día, de las 768,4 ton/día que se disponen en el Relleno. Estadísticas suministradas por [19].

El relleno sanitario La Glorita, está ubicado a una altura de 1423 m sobre el nivel del mar, con una temperatura media de 21°C y una precipitación promedio de 2750 mm/año. El Municipio de Pereira Reservó un área de 326,7 Hectáreas, localizada en la vertiente norte del río Otún para este vertedero [20]. Actualmente La Glorita cuenta con 7 celdas también llamadas vasos para la disposición de residuos con un total de 40 chimeneas para la evacuación de los gases generados en el proceso de descomposición de los residuos sólidos. En la Tabla 1 se muestra el histórico de operación de los vasos [1].

Tabla 1. Fecha de inicio y clausura de diferentes vasos del vertedero La Glorita [1]

<b>VASO</b>	<b>FECHA INICIO OPERACIONES</b>	<b>FECHA DE CLAUSURA</b>
1	Abril 1997	Junio 1999
2	Junio 1999	Diciembre 2002
3	Diciembre 2002	Agosto 2003
4	Agosto 2003	Octubre 2004
5	Octubre 2004	Diciembre 2009
6	Diciembre 2009	Operativo
7	En construcción proyectado 2017	Proyectado 2025
8	En planos	Proyectado 2033

En los últimos años, se han presentado varias problemáticas e inconformidades asociadas a la disposición final de los residuos sólidos urbanos, una de estas es presentada por la vereda La Suecia de Combia ya que por la ubicación del relleno se ha incrementado la desvalorización del terreno y las corrientes de aire están contaminadas presentando malos olores por las emisiones de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>. Según la información proporcionada por los directivos del relleno sanitario con la construcción de las últimas celdas, las problemáticas ambientales podrían reducirse por los nuevos controles para los lixiviados y el sistema de captación de metano.

#### 2.1.5. Revisión del sector energético en Colombia

Colombia es un país ubicado en la región noroccidental de América del Sur, Colombia ocupa un área total de 1.141.748 km<sup>2</sup> y está dividido en 32 departamentos. El país tiene una población de aproximadamente 49 millones y una densidad poblacional de 42,69 per/ km<sup>2</sup> [21].

La mayor parte de energía generada en Colombia proviene de las centrales hidroeléctricas y de las plantas termoeléctricas. Las centrales hidroeléctricas corresponden a casi el 70% de la capacidad instalada; durante la última década energías alternativas de otras fuentes como el sol, la biomasa, el viento han surgido como nuevos recursos energéticos limpios y no convencionales y ahora se están considerando como una alternativa para la generación en Colombia [22]. Acorde con la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) [23], la capacidad instalada en Colombia para septiembre de 2015 fue de 15740 MW, consistía principalmente de plantas hidroeléctricas, con una participación del 69,7%, seguida por las centrales térmicas (gas, carbón, líquidos) con 29,6% y las tecnologías alternativas con una representación de alrededor del 0,6% del total de la capacidad instalada del sistema, donde según [24] aproximadamente 26,9 MW corresponde a generación eléctrica con residuos de biomasa y 19,5 MW a generación eólica. Como la mayor parte de energía generada en el país, es debida a la tecnología hidroeléctrica, el sistema de energía colombiano es vulnerable a los cambios climáticos tales como las sequías prolongadas e intensas causadas por el fenómeno macro-climático “El Niño South Oscillation” (ENSO) [25].

Como se dijo con anterioridad en la actualidad el país está apostando a los recursos energéticos limpios y no convencionales, uno de estos es la energía termo renovable, aquí, la electricidad se obtiene como en otras centrales térmicas de combustión, solo que el combustible que se quema, a diferencia del gas, petróleo o carbón, es renovable y suele ser biomasa, o residuos sólidos. El estado colombiano ha construido plantas de aprovechamiento energético de las basuras y están aportando para la conservación de medio ambiente y para la demanda de energía en el país.

## 2.2. Técnicas waste-to-energy

Mediciones poblacionales de los últimos años realizadas en Colombia revelan que el crecimiento poblacional presentó un incremento de más de 370%. Este aumento es un resultado directamente proporcional a la cantidad de residuos sólidos urbanos generados por las actividades domésticas y de servicio; en promedio la generación de RSU en Colombia es de 1 kg/persona al día y esto ha hecho que se implementen nuevas tecnologías para la reducción de los residuos y el cuidado del medio ambiente. Tecnologías que aprovechan el potencial energético de los RSU. Según [26] hay dos formas para recuperación energética de los residuos: la ruta termoquímica y la ruta bioquímica

(fermentación y digestión anaeróbica). la conversión termoquímica de los RSU involucra tres procesos: La incineración que es tratada en este trabajo, gasificación y pirolisis [27].

La incineración es una tecnología de combustión directa en la cual la materia prima se transforma directamente en energía [7]. De forma simplificada el proceso convierte los residuos en calor, gases y cenizas, exigiendo un control en el tratamiento de éstos antes de su emisión a la atmósfera [15]. Mediante la incineración se elimina el 80% de los residuos, y el 20% restante es escoria que se puede enviar a un vertedero [28].

Si bien la incineración de residuos urbanos es una actividad establecida en muchos países Europeos, su aplicación está aún en revisión y desarrollo en otras partes del mundo, como es el caso de Colombia, por esta razón en este trabajo se abordan estudios para el aprovechamiento energético de los RSU y se realiza el diseño del ciclo para la generación de potencia de una planta térmica WTE operando bajo las condiciones de vertido de Risaralda, Colombia.

### **3. CARACTERIAZACIÓN DE LOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)**

#### **3.1. Caracterización de los RSU según el reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico- Sistemas de aseo urbano**

De acuerdo al Reglamento Técnico de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS (2012) la caracterización de residuos sólidos corresponde a la determinación de las características cualitativas y cuantitativas de los residuos, identificando sus contenidos y propiedades de interés con una finalidad específica [1]. Se tienen diversas metodologías para la caracterización de los residuos sólidos [29], pero continuación, se presenta la metodología de los diferentes componentes y subcomponentes del sistema de aseo urbano que se desarrolla en la República de Colombia [30], serie de procedimientos seguida y suministrada por [1].

##### **3.1.1. Disposición de los residuos sólidos en la zona de medición**

Para determinar las características de los RSU, se realizó lo siguiente: maquinaria a servicio del relleno sanitario, tomó una cantidad de residuos del frente de trabajo y estos fueron depositados en la zona de caracterización, que corresponde con un área de  $100\text{ m}^2$  como se ilustra en la Figura 1.





Figura 1. Disposición de los RSU a caracterizar [1].

Posteriormente los residuos sólidos urbanos fueron esparcidos sobre la superficie de trabajo en la que se realizó su clasificación, como se muestra en la Figura 2.



Figura 2. Esparcimiento de los RSU en la zona de medición [1].

### 3.1.2. Clasificación de los RSU

Se seleccionaron los residuos y se clasificaron según: residuos orgánicos e inorgánicos y a su vez los residuos inorgánicos separándolos según sean: vidrios, plásticos, metales, papel o cartón, inertes, entre otros, posteriormente se pesaron los diferentes grupos de residuos como se muestra en la siguiente Figura.

El proceso de clasificación de los residuos se realizó de acuerdo al numeral F1.4.2. (Composición de los residuos) del RAS 2012, el cual dice que para todos los sistemas, independientemente de su nivel de complejidad, se deben determinar la composición cuantitativa, cualitativa y la estructura

porcentual de sus residuos sólidos. En este trabajo se realizó la clasificación según la composición física:

- Plásticos
- Metales ferrosos, compuestos de aluminio y otros metales no ferrosos
- Vidrio
- Textiles
- Productos de papel y productos de cartón
- Madera, caucho, ceniza, ricas, escombros, otros
- Residuos orgánicos



Figura 3. Separación de los RSU por tipo [1].

### 3.1.3. Caracterización de residuos orgánicos

Los residuos orgánicos que ingresan al relleno sanitario presentan alto grado de mezcla con el resto de residuos, se hace complicada la separación de los residuos orgánicos una vez dispuestos en el frente de trabajo, esto conllevando a gastos en mano de obra. Por lo tanto, se realizó una caracterización de orgánicos durante tres días consecutivos dentro de la jornada de muestreo, que permitiera definir de una manera aproximada la fracción orgánica de los residuos sólidos que se disponen en el relleno sanitario. Como muestra la Figura 4, los residuos orgánicos se separaron de la misma pila de residuos de la cual se clasificó el resto de residuos por tipo de material; se procedió a pesar en un recipiente plástico de 55 galones previamente lavado, y se registró el peso para posterior análisis de la información.



Figura 4. Caracterización de los residuos orgánicos [1].

El periodo de caracterización se realizó durante 7 días consecutivos cubriendo el ciclo completo de generación que corresponde a 24 horas iniciando el lunes 9 de marzo a las 12 pm a lunes 16 de marzo 11 am.

#### 3.1.4. Caracterización de residuos inorgánicos

Se caracterizaron 13429,32 kg de residuos sólidos urbanos como se muestra en la Tabla 2. En la Figura 5 se muestra el resumen de la caracterización de los residuos. En promedio los residuos que ingresan al relleno sanitario La Glorita tienen una humedad de 76%, relacionado con la fracción orgánica. La densidad promedio de los RSU medidos se estableció en 335,25 kg/m<sup>3</sup> y el peso específico en 5341 N/m<sup>3</sup>.

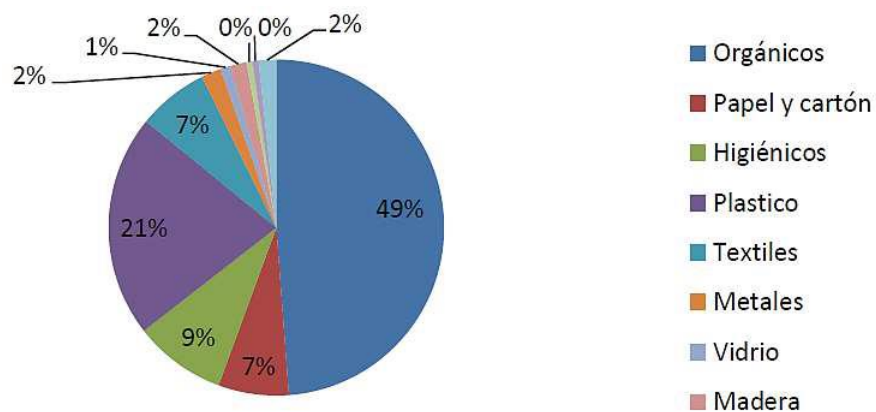


Figura 5. Caracterización física de los RSU, vertedero La Glorita.

Según el RAS 2012, los residuos sólidos urbanos en vehículos compactadores tienen una humedad entre 15-40, pero teniendo en cuenta que aproximadamente el 50% de la muestra tenía contenido de residuos orgánicos (residuos de comida húmedos) que tienen una humedad típica del 70% los resultados arrojaron una humedad de la muestra del 76%, lo cual indica que se encuentra dentro del comportamiento típico del tipo de residuos que se disponen en un relleno sanitario.

Tabla 2. Cantidad de RSU y clasificación por tipo.

TIPO RESIDUOS	MASA (kg)	TOTAL
Orgánicos	4199,8	
papel y cartón	1293,6	
higiénicos	1440,5	
plástico	3765,91	
textiles	1380,81	
metales	164,6	
vidrio	219,7	
madera	329,7	
Otros	145,9	
tetrapack/ icopor	134,6	
caucho/cuero	354,2	
<b>TOTAL</b>	<b>13429,32</b>	

A continuación, en la Tabla 3. Se muestra el análisis elemental de los componentes de los RSU, Porcentaje (%) en peso (base seca); esto quiere decir que 1kg de RSU contiene 50,48% de C y así con los demás elementos.

Tabla 3. Composición elemental en peso (base seca) de los RSU.

Elemento	% base seca
Carbono	50,85
Hidrogeno	6,45
Azufre	0,19
Oxigeno	31,57
Nitrógeno	1,58
Cenizas	9,51
Humedad	45,02

### 3.2.Cálculo del PCI de los RSU

En el análisis y diseño de sistemas de incineración hay pocos parámetros que son importantes como el calor de combustión [31]; el calor de combustión o también denominado poder calorífico es la cantidad de calor liberado cuando se quema por completo una unidad de combustible y los productos de la combustión se enfrían a temperatura ambiente. El poder calorífico será diferente dependiendo de si el agua en los productos de la combustión se halla en forma líquida o vapor. Se le denomina poder calorífico inferior (PCI) cuando el agua sale en forma de vapor y poder calorífico superior (PCS) cuando el agua en los gases de combustión se condensa por completo [32].

Para [30], el contenido energético de los residuos sólidos se puede determinar mediante dos métodos:

- a) Con una bomba calorimétrica de laboratorio (PCS)
- b) Por cálculo, si se conoce la composición elemental de los residuos.

Los textos de termodinámica, física y química brindan las herramientas necesarias para el cálculo del poder calorífico de las sustancias puras [33]. Sin embargo, estas correlaciones no son apropiadas para calcular el poder calorífico de mezclas complejas. Con una bomba calorimétrica por medio de mediciones directas se puede obtener el PCS, y mediante fórmulas de conversión se puede encontrar el PCI.

El poder calorífico superior de los RSU, puede ser estimado a través de una combinación lineal de la composición elemental en peso de los componentes en base seca. Laura Meraz [34] encontró una ecuación basada en el concepto termoquímico para estimar la entalpía de combustión (PCS) de los RSU, esta correlación se muestra en la ecuación 1.

$$\text{PCS} = \left(1 - \frac{\%H_2O}{100}\right) (-0.3708(\%C) - 1.1124(\%H) + 0.1391(\%O) - 0.3178(\%N) - 0.1391(\%S))(-1000) \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right] \quad (1)$$

Lloyd y Davenport realizaron un análisis por regresión lineal, un ajuste por mínimos cuadrados para encontrar la entalpia de combustión en función de la composición elemental del combustible. La ecuación resultante fue [35]:

$$PCS = \left(1 - \frac{\%H_2O}{100}\right) (-0.3578(\%C) - 1.1357(\%H) + 0.0845(\%O) - 0.0594(\%N) - 0.1119(\%S))(-1000) \left[\frac{kJ}{kg}\right] \quad (2)$$

Otra correlación matemática que puede ser usada en los procesos de combustión de los RSU, fue desarrollada por Boie y se muestra en la ecuación 3.

$$PCS = \left(1 - \frac{\%H_2O}{100}\right) (-0.3517(\%C) - 1.1625(\%H) + 0.1109(\%O) - 0.0628(\%N) - 0.1109(\%S))(-1000) \left[\frac{kJ}{kg}\right] \quad (3)$$

Por último, Wilson [36] obtuvo una formula basada en conceptos termoquímicos para predecir el poder calorífico superior de desechos orgánicos, ésta correlación se muestra a continuación:

$$PCS = \left(1 - \frac{\%H_2O}{100}\right) (-0.3279(\%C) - 1.5330(\%H) + 0.1668(\%O) - 0.0242(\%N) - 0.0928(\%S))(-1000) \left[\frac{kJ}{kg}\right] \quad (4)$$

La correlación utilizada en este trabajo para predecir el poder calorífico superior de los RSU es la propuesta por Laura Meraz (ecuación 1), esto a que fue desarrollada lo más recientemente.

La relación entre los poderes caloríficos puede ser expresada según [31] con la ecuación 5.

$$PCI = PCS - 52,397 * (H) * 4,184 \quad (5)$$

Dónde:  $PCI \left[\frac{kJ}{kg}\right]$ , H es el porcentaje de hidrogeno contenido en el combustible y la constante 4,184 es un factor de conversión de unidades.

## **4. PLANTA DE TRATAMIENTO DE RSU PROPUESTA PARA EL CASO DE ESTUDIO**

### 4.1. Descripción de la planta de proceso

#### 4.1.1. Alimentación

El proceso comienza con la recepción de los residuos que se descargan en un foso con una capacidad de 2291 m<sup>3</sup>. De este foso y con la utilización de un puente grúa equipada de un pulpo, se llevan los residuos sólidos a una tolva. La alimentación de residuos al horno se hace por medio de una banda transportadora la cual es movida por un motor trifásico. El caudal de alimentación puede controlarse con el variador de frecuencia de dicho motor.

#### 4.1.2. Horno

La planta propuesta para el vertedero La Glorita, contará con dos líneas de incineración, Se utilizará un horno de parrilla con alimentación hacia delante tipo rodillos; éste horno se caracteriza por tener tres zonas. En la primera zona se da el presecado de los residuos, en la parte central se tienen las parrillas principales de combustión, donde buena parte de la carga piroliza y gasifica y en la última zona se da, propiamente las reacciones de combustión. La entrada de aire para este tipo de horno se realiza por la parte inferior, este aire debe ser succionado con el fin de mantenerlo en estado de depresión para reducir la posibilidad de emisiones de olores o partículas a la atmosfera, para esto se cuenta con bocas de aspiración o captadores de gases, que llevan parte del aire primario al horno de post-combustión [37], [38]. (Ver Figura 6). Este horno está compuesto por la cámara de combustión y post-combustión, para garantizar la completa incineración de los residuos. En la cámara de combustión los gases pueden alcanzar temperaturas de hasta 1200 °C, y la cámara de post-combustión por normatividad (RED 653/2003) debe de tener una temperatura mínima de 850 °C con un tiempo de residencia de los gases de 2 segundos para la eliminación de dioxinas y furanos.

#### 4.1.3. Sistema de depuración y evacuación de los gases de combustión

Los gases que salen de la cámara de post-combustión, llevan contaminantes que deben ser reducidos o eliminados, esto puede solucionarse con el sistema de depuración de gases. Hay un electrofiltro con dos campos eléctricos que hacen que las partículas sólidas contenidas en los gases se depositen en la parte inferior del dispositivo; los gases una vez depurados de partículas sólidas por el electrofiltro son emitidos a la torre de acondicionamiento por medio de un ventilador de tiro forzado, ésta torre se encarga en enfriar los gases calientes y que estos presenten una temperatura aceptable para los filtros de mangas, los gases se enfrían por inyección de gotas de agua extremadamente finas. Posteriormente los gases son emitidos a la atmosfera por medio de una chimenea.

#### 4.1.4. Sistema de evacuación de cenizas y escorias

Las primeras escorias son obtenidas en la tercera zona del horno de combustión, aquí, éstas se conducen a través de una cinta transportadora a un deposito donde, posteriormente son llevadas al relleno sanitario. Las escorias y cenizas recogidas del electrofiltro, torre de acondicionamiento y filtro de mangas son llevadas a un silo de ceniza, donde posteriormente éstas pueden ser utilizadas como un subproducto o pueden ser llevadas al relleno sanitario. En la Figura 6, se muestra el diagrama de proceso.

#### 4.1.5. Sistema de recuperación de energía

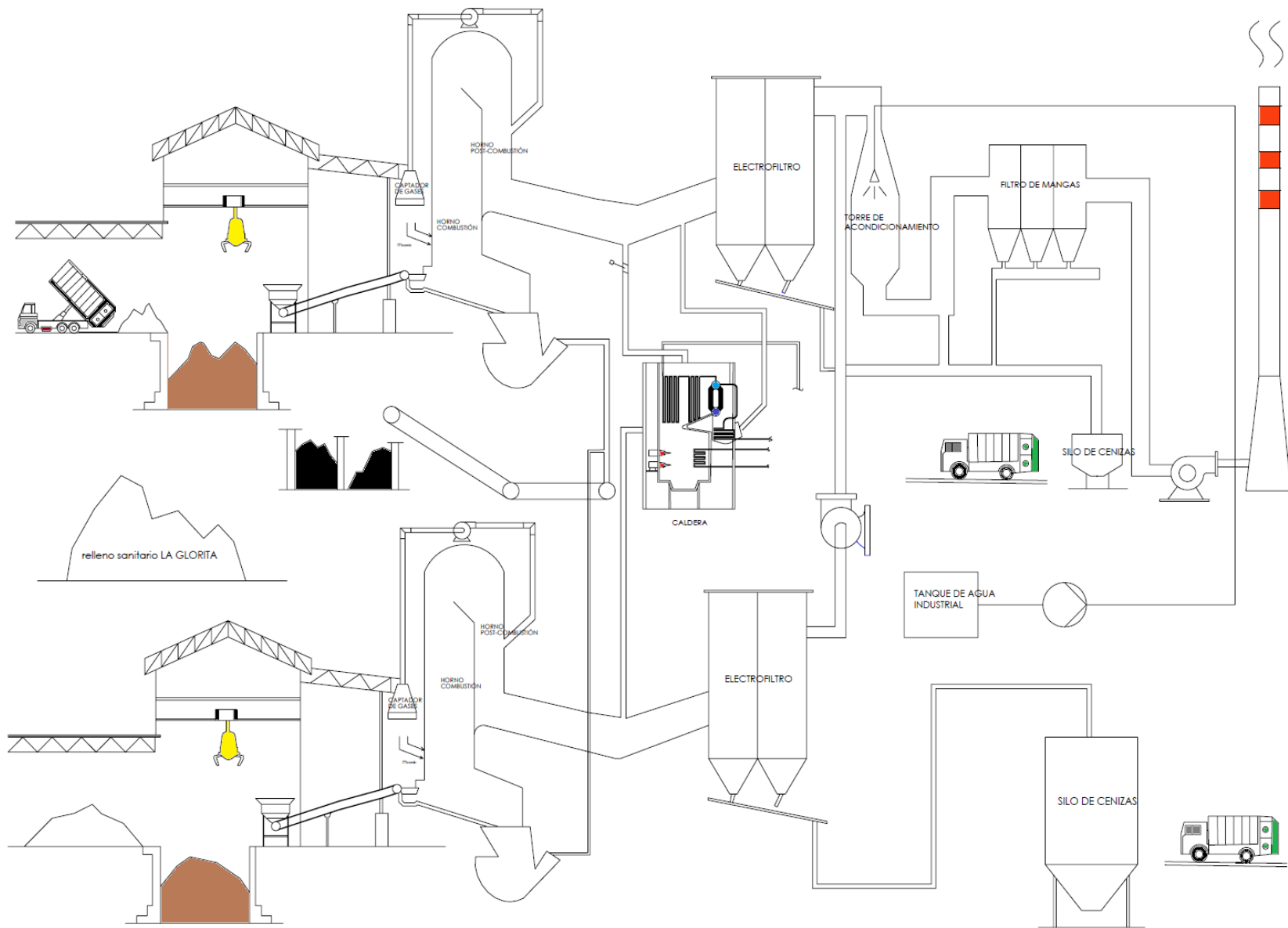
Los gases calientes que vienen de la cámara de post-combustión, se hacen pasar por una caldera recuperadora de calor tipo acuotubular, para así, generar vapor sobrecalentado, llevarlo a una turbina y Generar potencia eléctrica. El ciclo térmico se cierra mediante un conjunto de motobombas, un desaerador, y un regenerador tipo cerrado.

En una planta térmica las condiciones ambientales dependen de la ubicación geográfica. Las condiciones de referencia ambientales consideradas en este trabajo son 25°C y 101,325 kPa, las cuales son acordes a las condiciones de Risaralda Colombia.

La configuración de la planta de utilidades se expondrá más a fondo en la siguiente sección.



Figura 6. Diagrama de proceso de la planta WTE



## 4.2. Diseño de la planta de utilidades

El tamaño de la planta de utilidades depende de varios factores como: la disponibilidad de combustible que se tiene para producir vapor, la presión y temperatura del vapor a la entrada del turbo generador, flujos de masa a través de las tuberías, entre otros. En este trabajo se determinan las condiciones de operación (presión, temperatura, flujos máscicos) de la planta propuesta para el aprovechamiento energético de los RSU del relleno sanitario La Glorita (Ver Figura 7) con base a la metodología enseñada en [39].

### 4.2.1. Metodología de diseño

Para definir los estados termodinámicos es necesario partir de información que es suministrada por normas técnicas o que son parámetros de diseño y deben ser tenidos en cuenta para un buen funcionamiento de la planta. A continuación, se enuncian estos parámetros:

$(\Delta T)_{f,e}$ : incremento de la Temperatura del fluido de enfriamiento = 15°C (por norma).

$(\Delta T)_{min}$ : diferencia mínima de temperatura entre el fluido frio y el vapor.

Potencia de la red o consumo:  $\dot{W}_{con} = \dot{W}_{neta} * \eta_{mec} * \eta_{trans} * \eta_{aux} * \eta_{gen}$

X: Calidad real en la salida de la turbina .

C. E. V ó SR (steam rate): Es un índice que relaciona la cantidad de vapor necesario para generar potencia eléctrica en las turbinas, nos relaciona el flujo máscico del vapor con la potencia de la red; valor que depende del criterio del diseñador y está comprendido entre 5 – 7  $\left[ \frac{kg}{kW-h} \right]$  .

$(\Delta T)_{k-T}$ : = caída de temperatura entre la caldera y la turbina.

$(\Delta P)_{B-T}$ : caída de presión entre la última bomba y el ingreso a la turbina.

DTF: diferencia de temperaturas de los fluidos en regeneradores de tipo superficie.

$\eta_{mec}$ : eficiencia mecanica,  $\eta_{trans}$ : eficiencia del transformador,  $\eta_{gen}$ : eficiencia del generador,  $\eta_{aux}$ : eficiencia de equipos auxiliares.

Para el caso de estudio el diseño de la planta de utilidades tendrá la siguiente disposición (propuesta).

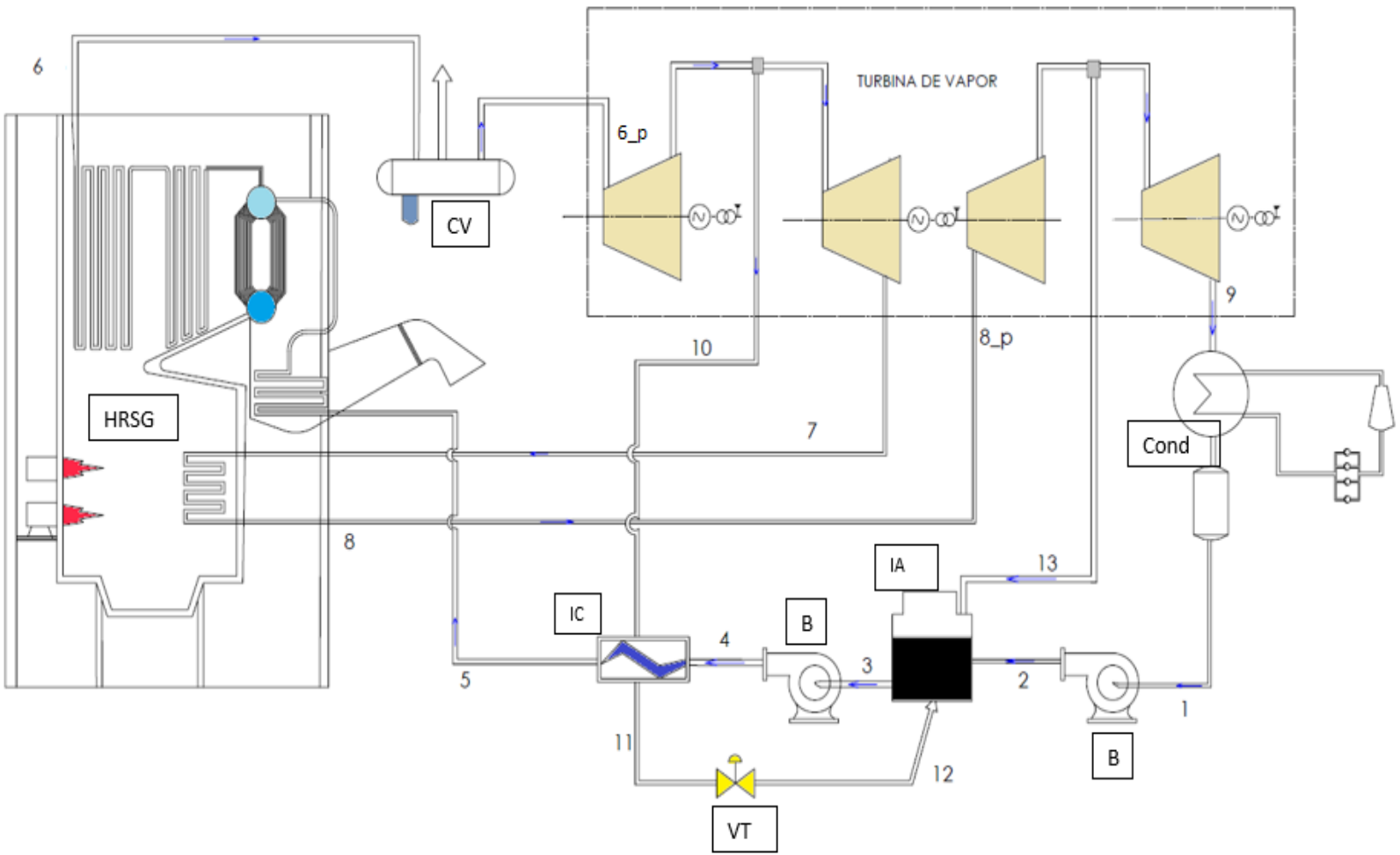


Figura 7. Diagrama de flujo del ciclo de vapor

El sistema de conversión de energía está compuesto por una caldera recuperadora de calor (HRSG) donde se genera vapor sobrecalentado. Este flujo a alta presión es llevado a un colector de vapor tipo cilindro (CV), donde el vapor puede ser almacenado, puede ser utilizado para una necesidad de un proceso industrial ó para la generación de potencia al hacerlo pasar por la turbina de vapor. Ésta planta tiene un proceso de recalentamiento, con el fin de asegurar un valor alto de la calidad en la salida de la turbina, dos regeneradores (uno tipo abierto IA y otro cerrado), dos bombas tipo turbina (B) y una trampa de vapor (VT) para garantizar vapor saturado en la salida del regenerador cerrado (IC).

En la Tabla 4 se muestran las condiciones de diseño que se emplearon

Tabla 4. Parámetros de diseño de la planta de vapor

<b>PARÁMETRO DE DISEÑO</b>	<b>VALOR</b>
$\dot{w}_{\text{cons}}$	20000 kW
C. E. V	6 kg/kW·h
X	0,89
DTF	2 °C
$(\Delta P)_{B-T}$	200 kPa
$(\Delta T)_{k-T}$	70 °C
$(\Delta T)_{\text{min}}$	10 °C
$(\Delta T)_{f,e}$	15 °C
$\eta_{\text{mec}}$	0,96
$\eta_{\text{trans}}$	0,97
$\eta_{\text{aux}}$	0,98
$\eta_{\text{gen}}$	0,99
$\eta_{\text{cald}}$	0,86
$\eta_b$	0,73
$\eta_{\text{TVAP}}$	0,85
$\eta_{\text{TVBP}}$	0,85
$T_0$	25 °C

Se empieza definiendo la presión de condensación, esto se logra realizando el diagrama de evolución de temperatura en el condensador, tal como muestra la Figura 8. De este diagrama se tiene que  $T_9 = T_1 = T_0 + (\Delta T)_{f,e} + (\Delta T)_{min}$ , sub índices de acuerdo a la numeración de los estados termodinámicos de la Figura 7. La presión de condensación es entonces la presión de saturación a la temperatura del condensador.

El proceso de condensación se asume como un proceso isobárico, donde el fluido de enfriamiento es agua y la curva de temperatura del mismo es creciente de forma parabólica, esto a que su cantidad es diferente al flujo de vapor. El estado 9 queda entonces definido con la presión de condensación y la calidad real en la salida de la turbina.

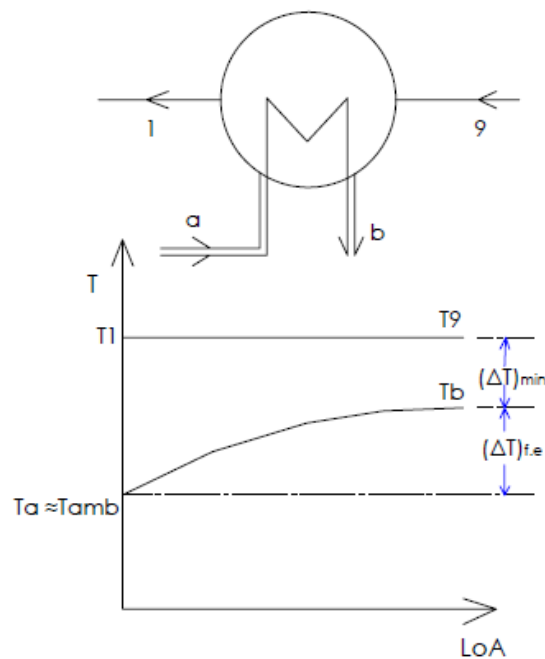


Figura 8. Diagrama de evolución de temperaturas en el condensador

El consumo específico de vapor o steam rate, según [40], se define como:

$$C. E. V = \frac{\dot{m}_{vapor.ten}}{\dot{W}_{cons}} \quad (6)$$

De esta expresión, se determina el flujo de vapor total del ciclo que es tentativo y sirve para determinar los demás estados termodinámicos.

Para definir las propiedades del fluido en la entrada de la turbina el diseñador debe plantear 1ra ley de la termodinámica en este dispositivo y realizar las siguientes dos aproximaciones:

1. La potencia neta es aproximadamente igual a la potencia de la turbina de baja presión debido a que las bombas requieren de muy poca demanda de energía comparada con la generada por el turbogenerador.
2. Las turbinas tanto de baja como de alta solo tiene una entrada y una salida.

De este modo se tiene el valor de la entalpia del punto 8p:

$$\dot{W}_{neta} \cong \dot{W}_{TV} \cong \dot{m}_{vapor.ten} * (h_{8p} - h_9) \quad (7)$$

Para definir por completo los estados termodinámicos, es necesario conocer dos propiedades intensivas independientes, para el caso del estado 8p, solo se conoce la entalpia y sería necesario determinar la entropía de este punto; para esto se plantea la fórmula de eficiencia isentrópica de la turbina de baja, se determina la entalpia ideal en 9 (h<sub>9s</sub>), posteriormente la entropía ideal de 9 (s<sub>9s</sub>) y entonces  $s_{8p} = s_{9s}$

La eficiencia isentrópica de la turbina de baja presión se define con la ecuación 8:

$$\eta_{TVBP} = \frac{h_{8p} - h_9}{h_{8p} - h_{9s}} \quad (8)$$

El estado 8, se determina con las siguientes dos propiedades:

$$P_8 = P_{8p} + (\Delta P)_{B-T} = P_{recalentamiento} \quad (9)$$

$$T_8 = T_{8p} + (\Delta T)_{k-T} \quad (10)$$

#### 4.2.2. Recalentamiento

Este proceso consiste en una vez que el vapor pasa por la turbina de alta presión, éste se hace regresar hacia la caldera para calentarlo (alcanzando la temperatura de salida de caldera) y expandirlo nuevamente en una turbina de baja presión, un objetivo de este proceso es aumentar la temperatura media de suministro de calor siempre y cuando la presión de recalentamiento no sea demasiada baja, por consiguiente, debe haber una presión óptima de recalentamiento en algún punto comprendido entre la presión de caldera y presión de condensación para la cual la eficiencia del ciclo sea máxima. Según [41], para ciclos irreversibles no regenerativos, esta presión óptima de recalentamiento es alrededor de la cuarta parte de la presión inicial de caldera.

Por lo tanto, la presión de caldera será  $P_{caldera} = P_6 = 4 * P_{recalentamiento}$ ;  $T_6 = T_8$  ∴ Queda definido el estado termodinámico en la salida de la caldera recuperadora de calor.

El estado 6, se determina con las siguientes dos propiedades:

$$P_{6p} = P_6 - (\Delta P)_{B-T} \quad (11)$$

$$T_{6p} = T_6 - (\Delta T)_{k-T} \quad (12)$$

Para el estado 7 ideal (7s), se conoce la presión, que es la de recalentamiento y la entropía (s7s) que es la misma de 6, con estas dos propiedades se encuentra la entalpía ideal en 7 (h7s) y se utiliza la expresión de la eficiencia isentrópica de la turbina de alta (13) para determinar el estado 7 real.

$$\eta_{TVAP} = \frac{h_{6p} - h_7}{h_{6p} - h_{7s}} \quad (13)$$

#### 4.2.3. Regeneradores o calentadores tipo cerrados y abiertos

El ciclo Rankine, aunque siempre es reversible, es afectado por la baja temperatura a la que entra a la caldera el agua de alimentación de retorno, dicho problema puede remediarse utilizando vapor para precalentar el agua de alimentación internamente dentro del ciclo por medio de regeneradores tipo cerrados o también llamados de superficie y regeneradores tipo abierto también denominados de contacto directo. Según [41], la eficiencia del ciclo de una planta de potencia incrementa con el calentamiento del agua de alimentación.

Los regeneradores de contacto son también llamados deaeradores, debido a que en éstos se condensa el vapor que viene de la turbina por contacto directo con agua de alimentación que se rocía en el recipiente del calentador, y aquí se da el proceso de eliminación de los gases no condensables. Los regeneradores tipo cerrado consisten en un calentador tubular de superficie, donde dos corrientes de fluido no se mezclan. Al momento de diseñar plantas si lo que se desea es obtener una reversibilidad completa el vapor debe de salir en forma condensada, o agua purgada, de este calentador y ésta tendría que ser llevada en cascada hacia atrás al calentador de contacto, que se encontrará a presión más baja en el tren de calentadores [41]. Por esta razón la configuración de la planta en estudio.

Para encontrar la temperatura óptima final de la alimentación, se siguen las recomendaciones de [41], se tiene que el delta de temperatura óptimo es:

$$(\Delta T)_{\text{opt}} = \frac{T_k - T_{\text{min}}}{n + 1} \quad (14)$$

Dónde:  $T_k$  es la temperatura de saturación a presión de caldera,  $T_{\text{min}}$  es la temperatura mínima del ciclo y  $n$  es el número de regeneradores.

Ésta diferencia de temperatura óptimas puede expresarse también con las ecuaciones 15 y 16 [39]:

$$(\Delta T)_{\text{opt}} = T_k - T_5 \quad (15)$$

$$(\Delta T)_{\text{opt}} = T_5 - T_3 \quad (16)$$

Para determinar la presión de la extracción 1 de la turbina de alta, se procede a realizar el diagrama de evolución de temperatura en el regenerador cerrado, como muestra la Figura 9.

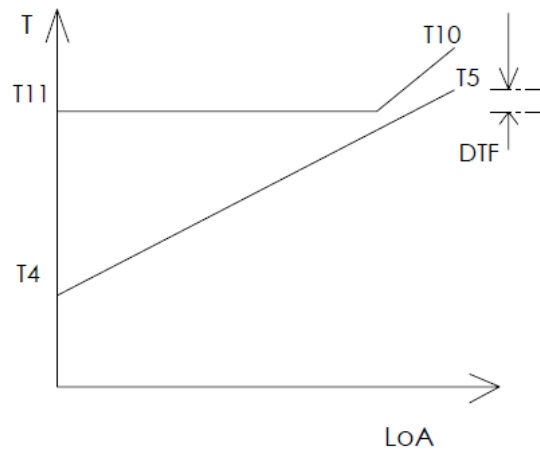


Figura 9. Diagrama de evolución de temperaturas en el regenerador cerrado

Donde  $DTF = T_5 - T_{11}$ , como  $T_5$  es conocido y  $DTF$  es un criterio de diseño, se puede determinar  $T_{11}$  y la Presión de 11 será la presión de saturación a  $T_{11}$ , debido a que la calidad en ese estado es cero. La entalpía ideal del estado 10 ( $h_{10s}$ ) se puede determinar ya que se conoce la presión de 10 y la entropía del estado 6\_p. El estado 10 real se define con la ecuación de la eficiencia isentrópica de la turbina de alta presión.



$$\eta_{TVAP} = \frac{h_{6p} - h_{10}}{h_{6p} - h_{10s}} \quad (17)$$

Según [39], el estado termodinámico 12 se puede determinar con las ecuaciones 18 y 19:

$$T_{12} = T_3 + (\Delta T)_{\min} \quad (18)$$

$$P_{12} = P_{\text{sat}@T_{12}} = P_3 = P_{13} = P_2 \quad (19)$$

Para finalizar con las propiedades de los estados solo basta con definir el estado 13 y esto se consigue con la ecuación de la eficiencia isentrópica de la turbina, ecuación 20:

$$\eta_{TVBP} = \frac{h_{8p} - h_{13}}{h_{8p} - h_{13s}} \quad (20)$$

Para encontrar los flujos máxicos de cada una de las líneas, es necesario realizar balances de energía y ecuación de continuidad en cada uno de los componentes del ciclo, estas ecuaciones se expondrán a continuación, componente por componente.

#### 4.2.4. Componentes del ciclo termodinámico

*Generador de vapor:* También denominado caldera, es un equipo encargado en la conversión de energía química en energía térmica por medio de la combustión; en este diseño se utiliza una caldera recuperadora de calor donde no necesita la quema de un combustible suplementario; el cambio de fase del agua se da por la elevada temperatura de los gases que salen de la cámara de post-combustión del incinerador.

Balances de masa

$$\dot{m}_5 = \dot{m}_6 = \dot{m}_{\text{vapor.ten}} \quad (21)$$

$$\dot{m}_7 = \dot{m}_8 \quad (22)$$

$$\dot{m}_5 + \dot{m}_7 = \dot{m}_6 + \dot{m}_8 \quad (23)$$

Aplicando primera ley de la termodinámica al agua que fluye por el interior de las tuberías se tiene la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_{\text{cald}} = \dot{m}_{\text{vapor.ten}} * (h_6 - h_5) + \dot{m}_7 * (h_8 - h_7) \quad (24)$$

Este calor también se puede expresar con la ecuación 25:

$$\eta_k = \frac{\dot{Q}_{cald}}{\dot{m}_{RSU} * PCI} \quad (25)$$

Donde:

$\dot{Q}_{cald}$	Flujo de calor producido por el generador de vapor [kW]
$\eta_{cald}$	Eficiencia térmica de los generadores, cuyo valor es 86%
$PCI$	Poder calorífico inferior de los RSU [kJ/kg]
$\dot{m}_{RSU}$	Cantidad de RSU quemados en el incinerador [kg/s]

Esta ecuación permite encontrar la cantidad de residuos sólidos urbanos a incinerar para una necesidad energética pre-determinada.

*Turbinas:* Las turbinas son las encargadas en transformar la energía térmica del fluido, en energía mecánica, En el eje de estos dispositivos se le suele acoplar los generadores eléctricos, que se encargan en transformar la energía mecánica rotacional en electricidad. El análisis energético de la turbina se muestra en la ecuación 26:

$$\dot{W}_{TV} = \dot{m}_{vapor.ten} * h_{6p} + \dot{m}_7 * h_{8p} - \dot{m}_{10} * h_{10} - \dot{m}_{13} * h_{13} - \dot{m}_9 * h_9 - \dot{m}_7 * h_7 \quad (26)$$

*Regenerador cerrado:* Es un intercambiador de calor, en el cual hay transferencia de calor entre dos corrientes de fluidos que no se mezclan o que no tienen contacto entre sí. Para realizar el análisis del regenerador cerrado, es necesario plantear balances de masa y energía las cuales se describen en la siguiente secuencia (ecuaciones 27, 28, 29, 30).

$$\dot{m}_{10} = \dot{m}_{11} \quad (27)$$

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_5 \quad (28)$$

$$\dot{m}_{10} + \dot{m}_4 = \dot{m}_{11} + \dot{m}_5 \quad (29)$$

$$\dot{m}_{10} * (h_{10} - h_{11}) = \dot{m}_5 * (h_5 - h_4) \quad (30)$$

*Regenerador abierto:* también es conocido como deaerador, es un dispositivo encargado en la eliminación de los gases no condensables, como dióxido de carbono, oxígeno que se presenta en

el fluido de trabajo. Otra función importante de este equipo es el almacenamiento de fluido para momentos de parada de la planta. El análisis de este elemento se realiza siguiendo las ecuaciones 31 y 32, que corresponden a los balances de masa y energía.

$$\dot{m}_{13} + \dot{m}_2 + \dot{m}_{12} = \dot{m}_3 \quad (31)$$

$$\dot{m}_{13} * h_{13} + \dot{m}_2 * h_2 + \dot{m}_{12} * h_{12} = \dot{m}_3 * h_3 \quad (32)$$

*Condensador:* Es el foco frío del ciclo Rankine y se materializa mediante intercambiadores de calor. Su misión es condensar el vapor húmedo que sale de la turbina para obtener agua líquida saturada, que será la que recojan las bombas para impulsarlas hacia el regenerador o caldera. En este diseño se utilizarán condensadores con refrigeración en circuito cerrado y torres de refrigeración; aquí el fluido de enfriamiento se enfría en las torres de refrigeración donde, finalmente, se evacua el calor a la atmósfera.

*Bomba:* Es un componente cuya función es transportar el fluido de trabajo, esto debido a cambios de energía cinética y de presión. En este sentido, la potencia real consumida por las bombas será calculada utilizando la ecuación 33.

$$\dot{W}_b = \frac{\dot{m} * v_e * (P_s - P_d)}{\eta_b} \quad (33)$$

Donde:

$\dot{m}$	Corresponde al flujo másico a través de la bomba [kg/s]
$v_e$	Volumen específico del fluido en la entrada de la bomba [m <sup>3</sup> /kg]
$(P_s - P_d)$	Diferencia de presiones entra la entrada y salida de la bomba [kPa]
$\eta_b$	Eficiencia isentrópica de la bomba
$\dot{W}_b$	Potencia de consumo real de la bomba [kW]

Posteriormente de plantear balances de masa y energía en cada uno de los dispositivos que componen la planta y de conocer las propiedades termodinámicas de los estados, se procede a encontrar la cantidad real de vapor generado en la caldera ( $\dot{m}_6$ ), esto se consigue planteando la ecuación de potencia neta de la planta, secuencia descrita por las ecuaciones 34, 35, 36, 37.

$$\dot{W}_{neta} = \dot{W}_{TV} - (\dot{W}_{b1} + \dot{W}_{b2}) \quad (34)$$

$$\dot{W}_{TV} = \dot{m}_6 * h_{6p} + \dot{m}_7 * h_{8p} - \dot{m}_{10} * h_{10} - \dot{m}_{13} * h_{13} - \dot{m}_7 * h_7 - \dot{m}_9 * h_9 \quad (35)$$

$$\dot{W}_{b1} = \dot{m}_9 * (h_2 - h_1) \quad (36)$$

$$\dot{W}_{b2} = \dot{m}_6 * (h_4 - h_3) \quad (37)$$

Donde la única incógnita es  $\dot{m}_6$ , correspondiente a la cantidad real de vapor generado en la caldera.

Para evaluar el rendimiento del ciclo y de la planta se utilizan las ecuaciones 38 y 39:

$$\eta_{\text{ciclo}} = \frac{\dot{W}_{\text{neto}}}{\dot{Q}_{\text{cald}}} \quad (38)$$

$$\eta_{\text{planta}} = \frac{\dot{W}_{\text{neto}}}{\dot{m}_{\text{RSU}} * \text{PCI}} \quad (39)$$

#### 4.3. Escenarios técnicos

Se pretenden evaluar dos escenarios técnicos:

1. Incineración de todos los RSU que se disponen en el relleno Sanitario La Glorita, sin tener previa clasificación, es decir que todos los desechos entrantes en los camiones compactadores serán dispuestos en la cámara de combustión de la planta de proceso. Para realizar éste análisis se tiene la composición elemental en base seca de los RSU (Tabla 3).
2. Incinerar algunos RSU dispuestos en el relleno, realizando una previa clasificación; se eliminarán los desechos orgánicos ya que es un material que no contribuye a la liberación de energía del combustible por su alto nivel de humedad. La composición elemental en base seca de éstos residuos se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Composición elemental en peso (base seca) de los RSU clasificados

<b>Elemento</b>	<b>% base seca</b>
Carbono	50,12
Hidrogeno	6,22
Azufre	0,09
Oxigeno	31,18
Nitrógeno	0,94
Cenizas	11,64
Humedad	5

El objetivo es encontrar para una misma necesidad energética, cuántos RSU debe incinerarse y estudiar la viabilidad de clasificación.

## 5. RESULTADOS Y RECOMENDACIONES

Existen herramientas computacionales que permiten dar solución a problemas de ingeniería, una de éstas es el programa EES (*Engineering Equation Solver*), la función básica de este software es la resolución numérica de ecuaciones algebraicas y diferenciales no lineales. Además, el EES suministra funciones integradas propias y termodinámicas para muchos fluidos [42]. El modelo termodinámico de la planta de utilidades y la solución de las ecuaciones de masa y energía se realizaron usando éste software y su código se presenta en los anexos.

### 5.1. Condiciones de operación de la planta

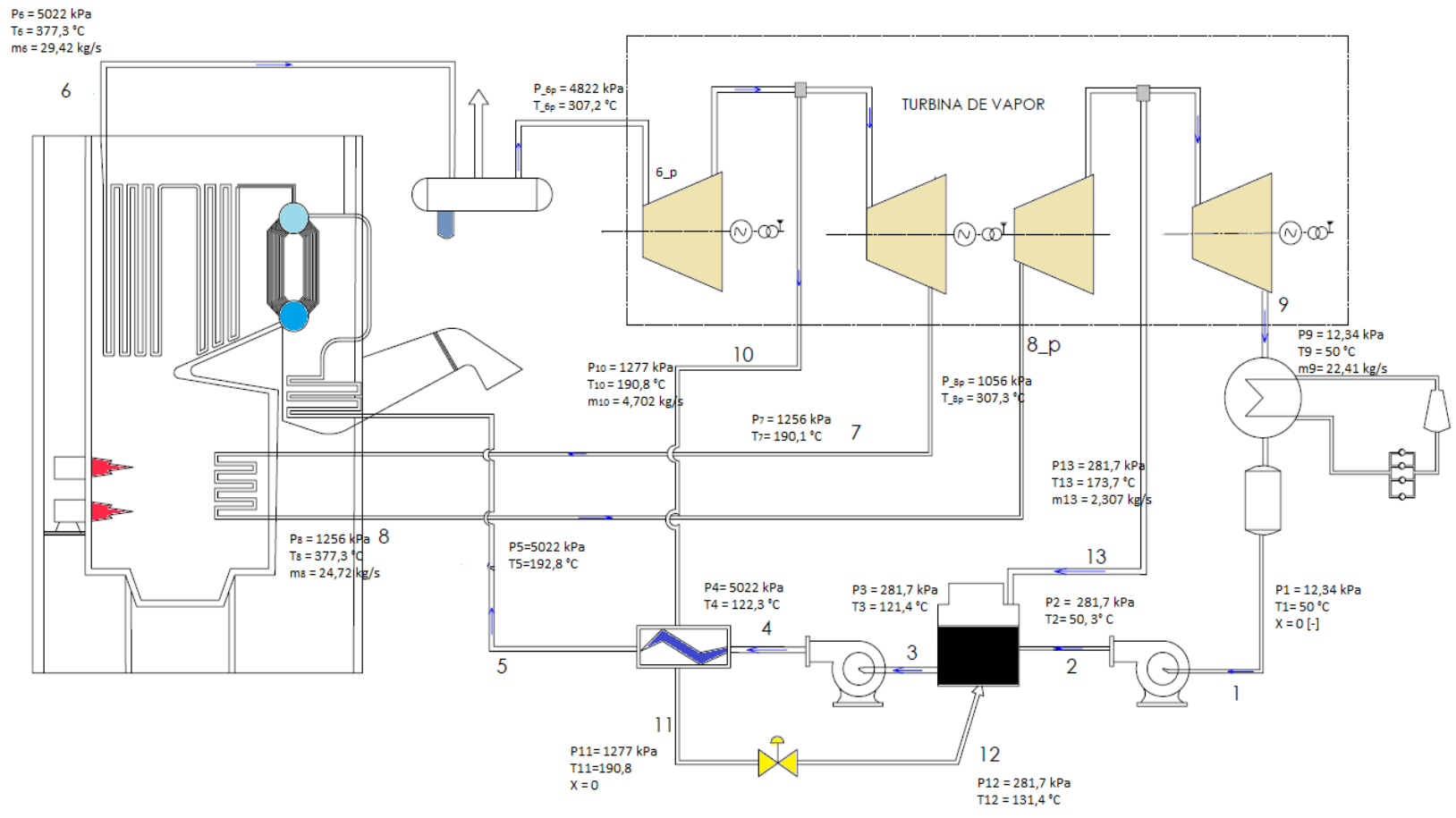
Para una necesidad energética de 20 MW, la planta de utilidades operará bajo las siguientes condiciones:

Tabla 6. Condiciones de operación de la planta de utilidades

Punto	P [kPa]	T [°C]	h [kJ/kg]	s [kJ/kg-K]	v [m <sup>3</sup> /kg]
1	12,34	50	209,3	0,7037	0,001012
2	281,7	50,03	209,7	0,704	0,001012
3	281,7	121,4	509,9	1,539	0,001062
4	5022	122,3	516,8	1,548	0,00106
5	5022	192,8	821,9	2,257	0,001142
6	5022	377,3	3138	6,557	0,05493
7	1256	190,1	2718	6,361	0,151
8	1256	377,3	3211	7,281	0,2345
9	12,34	50	2401	7,485	11,07
10	1277	190,8	2721	6,359	0,1487
11	1277	190,8	811,3	2,244	0,001143
12	281,7	131,4	811,3	2,289	0,07762
13	281,7	173,8	2812	7,224	0,7183

En la Figura 10. Se muestra los resultados del modelo termodinámico

Figura 10. Resultados del modelo termodinámico



## 5.2. Evaluación de la planta, resultado de los escenarios técnicos

En la Tabla 7. Se muestran los consumos de energía de las bombas, la potencia generada en el eje de la turbina, la potencia neta si se desea obtener una potencia en la red de 20 MW. Además, se muestra la eficiencia energética del proceso de conversión de energía.

Tabla 7. Evaluación de la planta

Potencia de la turbina $\dot{W}_{TV}$	[kW]	22349
Potencia bomba 1 $\dot{W}_{B1}$	[kW]	8,37
Potencia bomba 2 $\dot{W}_{B2}$	[kW]	202,8
Potencia neta $\dot{W}_{neta}$	[kW]	22137,83
Eficiencia del ciclo $\eta_c$	[%]	27,56
Eficiencia de la planta $\eta_p$	[%]	23,7

De la tabla 7, donde se muestra el rendimiento de la planta de utilidades; se puede considerar que los parámetros de diseño para representar el caso de estudio y la disposición de los elementos que componen la planta fueron apropiados y corresponden a los de una planta WTE, debido a que la eficiencia obtenida 23,7% es similar a los estudios encontrados en la literatura [43].

El grado de humedad de los residuos sólidos urbanos es un factor que influye en el proceso de incineración y esto es evidente al evaluar los dos escenarios técnicos. Como resultados se tiene: Si se desea aprovechar energéticamente los RSU sin previa clasificación, para generar 20 MW, se requiere incinerar 749,1 ton RSU/día y si se separan los materiales orgánicos de los inorgánicos para satisfacer la misma demanda es necesario incinerar solo 424 ton RSU/día. Claro está que el procedimiento de clasificación genera sobrecostos por la mano de obra y la difícil tarea de separación de estos componentes, sin embargo, en el relleno Sanitario La Glorita se pueden obtener los 20 MW que pueden ser vendidos al sistema de interconexión y se eliminarían las problemáticas asociadas al vertimiento a cielo abierto.

## 5.3. Recomendaciones

La disposición del ciclo de vapor tiene un impacto relevante en las plantas WTE, como recomendación se pueden proponer nuevas configuraciones de los elementos que puedan aumentar la eficiencia eléctrica de la planta. Realizar un análisis exergético a esta planta serviría para

identificar los lugares y las magnitudes de las irreversibilidades y así realizar posibles mejoras al sistema de conversión de energía.

## **6. CONCLUSIONES**

En este trabajo se realizó el diseño de la planta de utilidades de un proceso de incineración de residuos sólidos urbanos para el caso del relleno sanitario La Glorita ubicado en el departamento de Risaralda y en el cual 30 municipios descargan sus residuos. Se expone acerca de los componentes que debe llevar la planta de incineración, desde el proceso de recepción, almacenamiento, alimentación del horno hasta el lavado, filtrado y purificación de los gases de combustión. Se propone la planta de generación de potencia bajo una configuración en particular, donde, con las leyes de la termodinámica (balances de energía y materia) se establecen los parámetros de funcionamiento de la misma; condiciones que son importantes al momento de la selección de equipos sí se llegase a la construcción de la planta.

La disposición mostrada arroja una eficiencia del ciclo de 27,56% y una eficiencia de la planta de 23,7 %, valores que se asemejan a plantas de incineración encontradas en el mundo. En Colombia solo se tiene una planta con recuperación energética de las basuras y ésta se encuentra ubicada en la ciudad de San Andrés y Providencia con una generación neta de 1,4 MW incinerando 80 ton RSU/día. Para la planta propuesta se pueden generar 20 MW sí se incineran 750 ton RSU/día, un valor que corresponde a la disposición de residuos en el relleno de Risaralda.

Se realizó la caracterización de los residuos vertidos en el relleno sanitario en estudio y con ésta información se calculó el poder calorífico de los RSU con diferentes correlaciones matemáticas desarrolladas por investigadores en el mundo como Laura Meraz, Boie, D Wilson.

Se analizaron dos escenarios técnicos para la generación de potencia: a) incineración de RSU sin previa clasificación; b) incineración de RSU separando en la fuente el material orgánico y llevando al horno de combustión solo material inorgánico. Los resultados indican que, para satisfacer una misma demanda energética, el escenario 1, requiere quemar 749,1 ton de RSU y el escenario 2 requiere quemar 424 ton de RSU, casi un 43% de residuos menos. Esto se debe a que el material orgánico posee una elevada cantidad de humedad respecto a el material inorgánico y hace que el poder calorífico del combustible disminuya.



## 7. REFERENCIAS

- [1] ATESA DE OCCIDENTE. ESP., “Informe de caracterización de residuos sólidos a disponer en el relleno sanitario La Glorita de la ciudad de Pereira,” Pereira, 2015.
- [2] J. Medina and I. Jiménez, *Guía para la gestión integral de los residuos sólidos municipales*, 1ra ed. Mexico, 2001.
- [3] X. Lin, F. Wang, Y. Chi, Q. Huang, and J. Yan, “A simple method for predicting the lower heating value of municipal solid waste in China based on wet physical composition,” *Waste Manag.*, vol. 36, pp. 24–32, 2015.
- [4] C. A. R. del V. del Cauca, “CVC,” 2016. [Online]. Available: <http://www.cvc.gov.co/>.
- [5] “SOPESA S.A E.S.P.,” 2016. [Online]. Available: <http://www.sopesa.com/proyectos/planta-de-generacion-rsu>.
- [6] D. Moratorio, I. Rocco, and M. Castelli, “Conversión de Residuos Sólidos Urbanos en Energía Converting Municipal Solid Waste into energy,” *Mem. Trab. Difusión Científica y Técnica*, vol. 10, pp. 115–126, 2012.
- [7] H. A. Arafat, K. Jijakli, and A. Ahsan, “Environmental performance and energy recovery potential of five processes for municipal solid waste treatment,” *J. Clean. Prod.*, vol. 105, pp. 233–240, 2015.
- [8] B. Johnke, “Emissions From Waste Incineration,” *Good Pract. Guid. Uncertain. Manag. ...*, pp. 455–468, 2009.
- [9] A. A. Garrido, “La energía como elemento esencial de desarrollo,” 2009.
- [10] M. Bianchi, L. Branchini, A. De Pascale, M. Falchetti, and P. Fiore, “Advanced waste-to-energy steam cycles,” *Energy Procedia*, vol. 45, pp. 1205–1214, 2014.
- [11] M. Bianchi, L. Branchini, and A. De Pascale, “Combining waste-to-energy steam cycle with gas turbine units,” *Appl. Energy*, vol. 130, pp. 764–773, 2014.

- [12] U. R. I. Virgili, “Generación y gestión de residuos: un compromiso con la sostenibilidad,” 2016. [Online]. Available: [http://www.desenvolupamentsostenible.org/index.php?option=com\\_content&view=article&id=200&Itemid=92&lang=es](http://www.desenvolupamentsostenible.org/index.php?option=com_content&view=article&id=200&Itemid=92&lang=es). [Accessed: 11-Aug-2016].
- [13] M. Münster and H. Lund, “Comparing Waste-to-Energy technologies by applying energy system analysis,” *Waste Manag.*, vol. 30, no. 7, pp. 1251–1263, 2010.
- [14] F. McDougall, P. White, M. Franke, and P. Hindle, *Integrated solid waste management: a life cycle inventory*, 2nd ed. Great Britain, 2008.
- [15] S. Júlia Santos, “Análise do potencial energético e do processo de incineração como alternativa na gestão de resíduos sólidos urbanos em Florianópolis,” Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.
- [16] Incontec, “Norma Técnica Colombiana GTC 24,” no. 571, p. 13, 2009.
- [17] G. Tchobanoglous, H. Theissen, and R. Eliassen, *Desechos sólidos: Principio de ingeniería y administración.*, 2nd ed. California, 1982.
- [18] A. Restrepo, A. Andade, *Guía para el aprovechamiento energético de biogás captado de vertedero en el ámbito colombiano*, 1st ed. Pereira, Colombia: Vicerrectoría de investigación, innovación y extensión, Universidad Tecnológica de Pereira, 2016.
- [19] Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios República de Colombia, *Disposición Final de Residuos Sólidos - Informe Nacional*. 2015.
- [20] M. Ordoñez, “Evaluación de la Generación de biogás en rellenos sanitarios en Colombia en el marco del protocolo de Kyoto,” Universidad Tecnológica de Pereira, 2011.
- [21] Dane, *Proyecciones municipales por área 2006-2020, Información estadística, Colombia*. 2016, p. 107.
- [22] R. D. Montoya Ramírez, F. I. Cuervo, and C. A. Monsalve Rico, “Technical and financial valuation of hydrokinetic power in the discharge channels of large hydropower plants in Colombia: A case study,” *Renew. Energy*, vol. 99, pp. 136–147, 2016.

- [23] UPME, *Plan De Expansion De Referencia Generacion - Transmisión, 2015-2029 Unidad de Planeación Minero Energética*. Bogotá, Colombia, 2014.
- [24] O. F. (Ministerio de M. y E. Prias Caicedo, *Programa de Uso Racional y Eficiente de Energía y Fuentes No Convencionales – PROURE Plan de acción al 2015 con visión al 2025*. 2010.
- [25] Y. Olaya, S. Arango-Aramburo, and E. R. Larsen, “How capacity mechanisms drive technology choice in power generation: The case of Colombia,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 56, pp. 563–571, 2016.
- [26] B. Leckner, “Process aspects in combustion and gasification Waste-to-Energy (WtE) units,” *Waste Management.*, vol. 37, pp. 13–25, 2015.
- [27] O. K. M. Ouda, S. A. Raza, A. S. Nizami, M. Rehan, R. Al-Waked, and N. E. Korres, “Waste to energy potential: A case study of Saudi Arabia,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 61, pp. 328–340, 2016.
- [28] X. Llauro Fábregas and M. Poch Espallargas, “Estudio de la aplicación de sistemas basados en el conocimiento a la operación de una planta de tratamiento de residuos sólidos urbanos por valorización energética,” 2003.
- [29] Y.-C. Chen, “Potential for energy recovery and greenhouse gas mitigation from municipal solid waste using a waste-to-material approach,” *Waste Manag.*, 2016.
- [30] C. y T. Ministerio de Vivienda, *Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS, TÍTULO F Sistemas de Aseo Urbano*. 2012.
- [31] W. R. Niessen, *COMBUSTION AND INCINERATION PROCESSES*, 3rd ed. New York, 2002.
- [32] Y. a. Cengel and M. E. Boles, “Termodinamica - Cengel 7th,” *Termodinamica*, p. 1456, 2011.
- [33] J. W. Tester and M. Modell, “Thermodynamics and Its Applications,” *Book*, vol. 3rd Edition. p. 936, 1997.

- [34] L. Meraz, A. Domínguez, I. Kornhauser, and F. Rojas, “A thermochemical concept-based equation to estimate waste combustion enthalpy from elemental composition,” *Fuel*, vol. 82, no. 12, pp. 1499–1507, 2003.
- [35] J. Mata-Sánchez, J. A. Pérez-Jiménez, M. J. Díaz-Villanueva, A. Serrano, N. Núñez-Sánchez, and F. J. López-Giménez, “Statistical evaluation of quality parameters of olive stone to predict its heating value,” *Fuel*, vol. 113, pp. 750–756, 2013.
- [36] D. L. Wilson, “Prediction of heat of combustion of solid wastes from ultimate analysis,” *Environ. Sci. Technol.*, vol. 6, no. 13, pp. 1119–1121, 1972.
- [37] A. F. Martínez, “Planta de incineración de residuos sólidos urbanos con tecnología de parrilla y recuperación energética,” 2007.
- [38] M. D. E. Emisi, “Emisiones a la atmósfera y correcciones. Tipos de hornos,” pp. 1–31, 2005.
- [39] U. T. P. Pereira, *Curso de Ingeniería Mecánica: Plantas térmicas*. 2016.
- [40] D. Sanz, “Análisis y Optimización exergética de una planta de Cogeneración para la Industria Azucarera,” Pereira, Colombia, 2014.
- [41] Haywood, *Ciclos termodinámicos de potencia y refrigeración*, 2nd ed. 2003.
- [42] Y. a. Cengel and A. J. Ghajar, *Transferencia de calor y masa, Fundamentos y aplicaciones*, 4th ed. Ciudad de Mexico, 2012.
- [43] L. Branchini, “Advanced Waste-To-Energy Cycles,” Tesis de doctorado, p. 219, 2012.