

**ESTUDIO DE LA PREFACTIBILIDAD PARA GENERACIÓN DE ENERGÍA
ELÉCTRICA APROVECHANDO LA BIOMASA DEPOSITADA EN EL RELLENO
SANITARIO “EL CARRASCO” TENIENDO EN CUENTA LAS
ESPECIFICACIONES DE LA ENERGÍA A TRANSPORTAR.**

CARLOS ALBERTO AGUILAR CONTRERAS

JULIÁN EDUARDO BLANCO CORTÉS

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2016

**ESTUDIO DE LA PREFACTIBILIDAD PARA GENERACIÓN DE ENERGÍA
ELÉCTRICA APROVECHANDO LA BIOMASA DEPOSITADA EN EL RELLENO
SANITARIO “EL CARRASCO” TENIENDO EN CUENTA LAS
ESPECIFICACIONES DE LA ENERGÍA A TRANSPORTAR.**

**CARLOS ALBERTO AGUILAR CONTRERAS
JULIAN EDUARDO BLANCO**

**Trabajo de Grado para optar el título de
Ingeniero Electricista**

Director:

**ÁLVARO ALYAMANI TRIANA
Ingeniero Electricista, MS.c**

Codirector:

**GABRIEL ORDÓÑEZ PLATA
Ingeniero Electricista, Ph.D**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2016

AGRADECIMIENTOS

Los Autores de este proyecto agradecen a:

La **Universidad Industrial de Santander** y a la **Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones** por permitir nuestro crecimiento personal y profesional.

A nuestro Director **Álvaro Alyamani Triana** por brindarnos la orientación, el tiempo y la experiencia necesaria para apoyarnos durante la elaboración de este proyecto.

A nuestro co-director **Gabriel Ordóñez Plata** por brindarnos su tiempo, colaboración y las observaciones necesarias para hacer exitoso este proceso.

Al **relleno sanitario “El Carrasco”**, por permitirnos hacer las visitas técnicas y en especial al **Ingeniero Oscar Soto** por su buena disposición, su valiosa ayuda y la información suministrada.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	19
1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	22
2. OBJETIVOS.....	26
2.1 OBJETIVO GENERAL	26
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	26
3. MEMORIA DESCRIPTIVA Y ANTECEDENTES MUNDIALES.....	28
3.1 GESTIÓN Y TRATAMIENTO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS...28	
3.1.1 Aspectos generales y definiciones.....	29
3.1.2 Composición de los R.S.U.	32
3.1.3 Aplicaciones energéticas de los residuos sólidos urbanos.	39
3.1.4 Tecnologías para el aprovechamiento de los residuos.	40
3.1.5 Ciclo Rankine.....	47
3.1.6 Situación actual del relleno sanitario “El Carrasco”.....	48
3.2 ANTECEDENTES MUNDIALES DE APLICACIONES DE BIOMASA RESIDUAL MUNICIPAL CON RECUPERACIÓN ENERGÉTICA.....	51
3.2.1 Incineradoras en Europa.....	52

3.2.2. Incineradoras en Austria. En Austria existen tres plantas incineradoras de residuos sólidos urbanos:	53
3.2.3. Planta incineradora de Malmö.	56
3.2.4. Planta de Sleaford en Lincolnshire.....	57
3.2.5. Planta en Klemetsrud, Oslo, Noruega.....	57
3.2.6. Conversión de residuos en energía, Westenergy Oy en Vaasa, Finlandia.	58
4. ANÁLISIS DE LA TECNOLOGÍA ADOPTADA.	60
4.1 TRATAMIENTO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS.	60
4.1.1 Recolección y pretratamiento de los residuos como parte de su recuperación energética antes del proceso de combustión.....	60
4.1.2 Pretratamiento de residuos sólidos urbanos antes de ser incinerados.	61
4.1.3 Suministro y almacenamiento de residuos.....	62
4.2 TECNOLOGÍA DE VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE LOS RESIDUOS. ..	63
4.2.1 Etapa de tratamiento térmico.	63
4.2.2 Incineración con horno de parrilla. Las diferentes tecnologías para construir los hornos o incineradores, traen ventajas e inconvenientes, los tres más importantes son:	64
4.2.3 Tecnología para la incineración de residuos sólidos urbanos	67
4.3 CICLO AGUA/VAPOR UTILIZADO.....	71
4.3.1 Ciclo Rankine ideal regenerativo.	71
4.3.2 Grupo turbina alternador.	76

4.3.3 Condensador.	77
4.3.4 Bombas de impulsión de agua.....	78
4.4 TRATAMIENTO DE GASES.....	78
4.4.1 Factores para selección de un sistema de tratamiento de gases de combustión.....	78
4.4.2 Sistema de análisis de emisiones.....	80
4.4.3 Residuos principales de la combustión.....	80
4.4.4 Sistema de tratamiento de combustión y control aplicado.....	81
4.4.5 Técnicas que permiten reducir las emisiones de partículas.....	81
4.5 REQUISITOS DE DISEÑO PARA 1MW.....	83
4.5.1 Requisitos funcionales.....	83
5. CÁLCULOS.....	85
5.1 DATOS HISTÓRICOS DE DISPOSICIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS.....	85
5.2 COMPOSICIÓN DE LOS RESIDUOS.....	86
5.2.1 Información preliminar.....	87
5.2.2 Capacidad de residuos.....	88
5.2.3 Cálculo del poder calorífico inferior (P.C.I.).....	89
5.3 CÁLCULO DE LA COMBUSTIÓN.....	99
5.3.1 Combustión estequiométrica.....	99
5.3.2 Cantidad aire seco a suministrar.....	101

5.3.3 Cantidad de aire húmedo a suministrar.	102
5.3.4 Composición de los gases de combustión.	106
5.3.5 Volumen total de los gases emitidos.	110
5.3.6 Flujo másico de los gases emitidos.	111
5.4 CICLO DE VAPOR.	111
5.4.1 Esquema ciclo de vapor.	112
5.4.2 Condiciones de diseño del ciclo vapor.	112
5.4.3 Cálculo del ciclo vapor.	113
5.4.5 Caudal de extracciones del ciclo de vapor.	123
5.4.6 Potencia en la turbina.	125
5.5 BALANCE DE POTENCIAS.	126
5.5.1 Potencia suministrada.	126
5.5.2 Potencia disipada.	128
5.5.3 Potencia generada en el sistema.	132
5.5.4 Potencia de auto consumo.	133
5.5.5 Potencia entregada a la red.	133
5.5.6 Tabla de balance de potencias.	133
5.6 RENDIMIENTOS DEL SISTEMA.	135
5.6.1 Rendimientos del conjunto horno-caldera.	135
5.6.2 Rendimiento de la incineración.	135
5.6.3 Rendimiento total del ciclo de vapor.	136

5.6.4	Tabla de rendimientos del sistema.....	136
5.7	CÁLCULOS PARA GENERAR 1MW.....	136
5.7.1	Turbina para el ciclo vapor.....	137
5.7.2	Caudal de vapor en la turbina.....	138
5.7.3	Cantidad de R.S.U. necesarios para generar 1MW.....	139
5.7.4	Flujo másico y volumen total de los gases emitidos.....	139
5.7.5	Neutralización de gases ácidos.....	140
5.7.6	Diseño del horno de parrilla.....	142
5.7.7	Balance de potencia para 1MW.....	144
5.7.8	Rendimientos del sistema para 1MW.....	147
6.	EVALUACIÓN DEL PROYECTO USANDO EL SOFTWARE RETSCREEN.....	148
6.1	RETSscreen.....	148
6.1.1	Ventajas y desventajas.....	149
6.2	INFORMACIÓN DEL PROYECTO.....	150
6.3	CONDICIONES DE REFERENCIA DEL SITIO.....	151
6.4	SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DEL CASO PROPUESTO.....	155
6.5	ANÁLISIS DE EMISIONES.....	157
6.6	ANÁLISIS FINANCIERO.....	160
6.7	MICRO RED.....	164
6.7.1	Definición.....	165
6.7.2.	Beneficios de las microrredes.....	166

6.7.3. Componentes de una microred.....	166
7. CONCLUSIONES	168
BIBLIOGRAFIA.....	177
ANEXOS	178

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Generación de vapor por combustión directa	42
Figura 2. Esquema conceptual del proceso de gasificación con aire.....	43
Figura 3. Esquema conceptual del proceso de gasificación con oxígeno.....	44
Figura 4. Esquema conceptual del proceso de pirolisis	45
Figura 5. Esquema conceptual del proceso de digestión anaeróbica	46
Figura 6. Gráfica del proceso a través del ciclo Rankine.	47
Figura 7. Ubicación de las Cárcavas ubicadas en “El Carrasco”	50
Figura 8. Parillas de rodillo.....	67
Figura 9. Representación de una cámara de incineración.....	68
Figura 10. Caldera acuotubular.....	70
Figura 11. Diagrama T-S del ciclo Rankine ideal regenerativo.	72
Figura 12. Ciclo Rankine ideal regenerativo con un calentador de agua de alimentación. Y el diagrama T-S	75
Figura 13. Condensador de agua (ciclo vapor)	78
Figura 14. Diagrama psicrométrico	103
Figura 15. Esquema del ciclo de vapor.....	112
Figura 16. Esquema del pre-calentador.....	123
Figura 17. Diagrama de combustión en la parrilla.....	144
Figura 18. Información del proyecto.....	150

LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. Composición de los residuos sólidos área metropolitana de Bucaramanga.....	33
Tabla 2. Composición química de los residuos del área metropolitana de Bucaramanga.....	34
Tabla 3. Clases de residuos que ingresan en “El Carrasco”.....	35
Tabla 4. Caracterización de los residuos que ingresan en “El Carrasco”.....	36
Tabla 5. Comparación de las caracterizaciones de residuos realizadas en el Carrasco	38
Tabla 6. Parámetros para los estudios.	39
Tabla 7. Entradas y salidas en una tonelada de residuos de la planta Spittelau ...	54
Tabla 8. Entradas y salidas en una tonelada de residuos de la planta Wels	55
Tabla 9. Entradas y salidas en una tonelada de residuos de la planta Simmeringer Haide	55
Tabla 10. Principales impactos de la selección y pre tratamiento de los residuos.	61
Tabla 11. Histórico de la cantidad de residuos depositados anualmente en el relleno “El Carrasco”.....	86
Tabla 12. Capacidad mínima de residuos a incinerar	89
Tabla 13. Valores típicos de contenido de humedad en RSU.....	91
Tabla 14. Datos típicos del contenido de humedad de los componentes de los residuos sólidos urbanos	91
Tabla 15. Caracterización de los residuos sólidos urbanos en base húmeda y base seca	92
Tabla 16. Datos típicos de la composición química de los componentes de los residuos sólidos urbanos	93

Tabla 17. Composición química de los residuos sólidos urbanos que ingresan en “El Carrasco”	94
Tabla 18. Residuos con características de biotransformación en base húmeda y base seca.....	96
Tabla 19. Composición química de los residuos que ingresan en “El Carrasco” con característica de biotransformación	97
Tabla 20. Poder calorífico de los residuos que ingresan en “EL Carrasco”.	98
Tabla 21. Cálculo del oxígeno necesario – Residuos en masa.....	100
Tabla 22. Cálculo del oxígeno necesario – Residuos con propiedades de biotransfromación	100
Tabla 23. Composición de aire seco.....	101
Tabla 24. Masa de aire seco a suministrar	102
Tabla 25. Condiciones del aire en el ambiente	103
Tabla 26. Masa de aire húmedo a suministrar	104
Tabla 27. Volumen de aire húmedo a suministrar por hora.	105
Tabla 28. Balance másico entre reactivos y producto.....	106
Tabla 29. Porcentajes másico de los gases generados en la combustión en base húmeda.	108
Tabla 30. Porcentajes volumétricos de los gases generados en la combustión en base húmeda.	109
Tabla 31. Porcentajes másico de los gases generados en la combustión en base seca.	109
Tabla 32. Porcentajes volumétricos de los gases generados en la combustión en base seca.....	110
Tabla 33. Volumen total de los gases emitidos.	110
Tabla 34. Flujo másico de los gases emitidos.....	111
Tabla 35. Resumen de los puntos del ciclo de vapor.....	121
Tabla 36. Caudales másicos del ciclo vapor.....	124
Tabla 37. Potencia en la turbina	125
Tabla 38. Energía disipada en los gases de escape.....	130

Tabla 39. Balance de potencia.....	134
Tabla 40. Rendimientos del sistema.	136
Tabla 41. Características técnicas de la turbina Siemens SST-100	137
Tabla 42. Datos preliminares balance de energía para 1MW	145
Tabla 43. Balance de potencia para 1MW	146
Tabla 44. Rendimientos del sistema para 1MW.....	147

LISTA DE ANEXOS

Pág.

ANEXO A. CATALÓGO DE TURBINAS A VAPOR DE SIEMENS	178
ANEXO B. UPME Resolución 281 de 2015	187
ANEXO C. TABLAS TERMODINÁMICAS	190
ANEXO D. PODER CALORÍFICO DE ALGUNOS COMBUSTIBLES	204
ANEXO E. ANTECEDENTES EN COLOMBIA DE USO DE LA BIOMASACOMO FUENTE DE GENERACIÓN DE ENERGÍA.....	211
ANEXO F. GLOSARIO DE LOS DATOS INTRODUCIDOS EN RETSCREEN....	214

RESUMEN

TÍTULO: ESTUDIO DE LA PREFACTIBILIDAD PARA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA APROVECHANDO LA BIOMASA DEPOSITADA EN EL RELLENO SANITARIO “EL CARRASCO” TENIENDO EN CUENTA LAS ESPECIFICACIONES DE LA ENERGÍA A TRANSPORTAR*.

AUTORES: CARLOS ALBERTO AGUILAR CONTRERAS
JULIÁN EDUARDO BLANCO CORTÉS**

PALABRAS CLAVE: Biomasa, Residuos Sólidos Urbanos, Relleno Sanitario, turbinas de vapor, ciclo de vapor, combustión de residuos, Microredes Eléctricas.

DESCRIPCIÓN:

El gran aumento del consumo de energía a nivel mundial lleva al estudio e implementación de proyectos enfocados a la utilización de fuentes de energía renovable con fines de encontrar soluciones al impacto ambiental fomentando así el uso racional de la energía. Adicionalmente, con el crecimiento de la población la cantidad de residuos generados a diario se depositan en terrenos destinados para su disposición final, los cuales tras el paso del tiempo se ocupan y tras de contaminar todo el ambiente, se debe proceder a buscar un nuevo terreno para continuar con el depósito allí.

Con este proyecto se estudia la cantidad energética disponible en el relleno sanitario “El Carrasco” que se puede obtener a partir de las toneladas de biomasa que ingresan, mediante un proceso de combustión unido a un ciclo agua vapor, específicamente ciclo Rankine con regeneración se obtiene la cantidad de energía eléctrica disponible. Como complemento se utiliza el software RETScreen para comparar datos estimados con otros proyectos similares estudiados en otros lugares del mundo, permitiendo analizar y estudiar de manera general la prefactibilidad de utilizar cierta cantidad de biomasa para generar 1MW que mediante una microred se podría llevar energía a una población cercana o cubrir la demanda de las instalaciones propias de la empresa EMAB solucionando problemas ambientales ocasionados por los residuos, y entrando al mundo de las energías alternativas.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Alvaro Alyamani Triana. Codirector: Gabriel Ordoñez Plata.

ABSTRACT

TITLE: FEASIBILITY STUDY FOR POWER GENERATION BIOMASS ADVANTAGE PLACED IN LANDFILL "THE CARRASCO" TAKING INTO ACCOUNT THE SPECIFICATIONS OF ENERGY TO CARRY*.

AUTHORS: CARLOS ALBERTO AGUILAR CONTRERAS
JULIAN EDUARDO BLANCO CORTES**

KEYWORDS: Biomass, Solid Waste, Landfill, steam turbines, steam colic, waste combustion, Electric microgrids.

DESCRIPTION:

The large increase in energy consumption worldwide leads to the study and implementation of projects focused on the use of renewable energy sources for the purpose of finding solutions to the environmental impact thus promoting the rational use of energy. Additionally, with the growth of population the amount of waste generated daily are deposited on land intended for disposal, which after time deal and after polluting the whole environment, proceed to seek a new land to continue the deposit there.

With this project the energy amount available is studied in the dustbin "Carrasco" that can be obtained from the tons of biomass entering through a combustion process attached to a water vapor cycle, specifically Rankine cycle with regeneration is obtained amount of power available. To complement the RETScreen software is used to compare estimates with other similar projects studied in other parts of the world data, allowing analyze and study generally the feasibility of using certain amount of biomass to generate 1MW through a microgrid could bring energy to a nearby town or meet the demand for the facilities of the company EMAB solving environmental problems caused by waste, and entering the world of alternative energy.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Alvaro Alyamani Triana. Codirector: Gabriel Ordoñez Plata.

INTRODUCCIÓN

El gran aumento a nivel mundial en el consumo energético durante los últimos años, y la necesidad que se vive actualmente de disminuir el gran impacto ambiental que causan los combustibles fósiles, ha llevado a gobiernos e instituciones educativas a estudiar nuevas fuentes potenciales de energías renovables y alternativas.

En este sentido, la búsqueda de la producción de energéticos en un futuro debe ir ligada a proteger el medio ambiente y fomentar el uso racional de energías alternativas. Es por esto que se ha incentivado la implementación de una gran variedad de métodos para la generación de energía como lo son las fuentes de generación de energías eólicas, solares, hidráulicas y de biomasa, en la cual se centra este estudio. Dichas fuentes se caracterizan por su capacidad de ofrecer un servicio eficiente y de calidad, ayudando a abastecer la demanda de energía actual.

La utilización de la biomasa, para fines energéticos, es una alternativa para sustituir de forma parcial el uso de combustibles fósiles y de otras fuentes contaminantes que son usadas para generar energía. Los estudios que se han realizado y la implementación de nuevas tecnologías, permiten el uso de la biomasa como una fuente de energía renovable con un bajo impacto ambiental.

El uso de la biomasa como fuente de energía renovable, se da gracias a su contenido energético proveniente de la energía solar que es absorbida por los vegetales en el proceso de fotosíntesis. Esta energía se libera cuando se rompen los enlaces de los compuestos orgánicos en el proceso de combustión,

originado como resultado dióxido de carbono y agua. La biomasa que es usada para fines energéticos recibe el nombre de biocombustible y puede ser usada para fines térmicos, eléctricos y como combustible en automotores.

Además, de la problemática ambiental que causa el uso de combustibles fósiles como fuente de energía, otro de los principales problemas es qué hacer con toda la cantidad de residuos generados a diario en las poblaciones, que son arrojados en grandes superficies de terrenos. Para este caso en particular, la utilización de biomasa con fines energéticos instaura como prioridad la biomasa residual depositada en rellenos sanitarios, debido a que se realiza paralelamente el tratamiento ambiental y se obtiene beneficios económicos, contribuyendo a un desarrollo sostenible.

Con este trabajo de grado, se propone una alternativa a las problemáticas ambientales y energéticas del país y la región, ya que en la actualidad en los rellenos sanitarios, el tratamiento de los residuos opera sin un proceso adecuado que permita transformar la biomasa en una fuente de generación de energía.

En el primer capítulo, se exponen aspectos teóricos como clasificación de los residuos, su composición, caracterización, aplicación, aprovechamiento energético y antecedentes mundiales del uso de la biomasa como fuente de energía eléctrica.

En el segundo capítulo, se describe la tecnología adoptada para la valorización energética de la biomasa como lo son los hornos de parrilla y las turbinas de vapor, también se incluyen temas como el tratamiento previo que se hace de los residuos,

el ciclo de vapor empleado y el tratamiento que se les debe aplicar a los gases generados en la combustión.

En el tercer capítulo, se muestran los cálculos realizados para identificar el poder calorífico de los residuos, el volumen y el flujo másico de los gases generados en la combustión, los cálculos termodinámicos del ciclo de vapor, y se expone una metodología para realizar el balance de potencias del proceso. También se realizan los cálculos en detalle para tener una potencia instalada de 1 MW.

En el cuarto capítulo, mediante el software RETScreen, se evalúa lo realizado en los capítulos anteriores y se profundiza de forma práctica en la estimación de indicadores técnicos, ambientales y financieros del proyecto.

1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

La disposición de los residuos sólidos urbanos (RSU) es, una de las principales problemáticas que afecta a nuestro país en términos ambientales. El sistema más utilizado para la disposición final de estos residuos son los rellenos sanitarios.

El manejo integral de los RSU se debe de realizar de forma ordenada y eficiente, cumpliendo con los principios de salud pública y preservación ambiental. Pero la mayoría de los municipios en Colombia carecen de sistemas adecuados para el procesamiento y disposición de estos residuos, lo que genera problemas de contaminación de los suelos y en algunos casos de fuentes hídricas.

Al ser depositados los residuos en los rellenos sanitarios, estos comienzan su proceso de descomposición, donde producto de esto, aparecen los líquidos lixiviados y gases contaminantes. Estos líquidos y gases son nocivos y puede afectar la salud de las poblaciones cercanas a estos rellenos.

En consecuencia, es necesario que en la planificación urbana se incluyan sistemas adecuados de tratamiento y disposición de residuos que contribuyan a que se disminuyan de forma eficaz las emisiones de gases y compuestos nocivos al ambiente, dándoles un valor de retorno mediante el aprovechamiento energético, ya que estos residuos tienen un considerable valor energético que pueden ser transformados en energía eléctrica.

Otra problemática que va ligada a la disposición de los residuos sólidos urbanos (RSU) es, la dificultad de encontrar superficies amplias de terreno aptas en donde verter los residuos que se generan a diario. Por tanto, una solución a esta problemática es reducir el volumen de estos residuos de la mejor manera posible.

Depositar estos residuos sin un control riguroso causa daños ambientales, para depositarlos de forma adecuada es necesario realizar obras de gran importancia, ocupando grandes cantidades de terreno en donde se tenga un control de los gases que se producen y de los líquidos lixiviados, además de la necesidad de tener en cuenta factores como el viento y las lluvias, que propagan de forma incontrolada la contaminación en los lugares cercanos al relleno.

La incineración posibilita la reducción de los residuos que se encuentran depositados, aumentando la vida útil de los rellenos sanitarios y disminuyendo su impacto ambiental. Este método de reducción de residuos, resulta muy adecuado en ciudades densamente pobladas y con inconvenientes para disponer de un terreno amplio en donde verter los desechos, como lo es el caso de la ciudad de Bucaramanga, en donde han colapsado la capacidad de las cárcavas en donde son depositados los residuos, llevando a que actualmente el relleno sanitario “El Carrasco” se encuentra en emergencia sanitaria (según información del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible), y donde todavía no es claro donde serán llevados los residuos que se produzcan en los próximos años, cuando la capacidad del relleno llegue a su punto máximo.

“La Empresa de Aseo de Bucaramanga (EMAB) es la entidad encargada de los servicios de barrido, recolección, transporte y disposición final de los residuos sólidos urbanos (RSU) de la ciudad. En la actualidad presta el servicio de

disposición final de RSU al área metropolitana y a otros municipios aledaños (Lebrija, Rionegro, Playón, Suratá, Charta, Santa Bárbara, California, Matanza, Tona, Vetas y Zapatoca)", los cuales se depositan en el relleno sanitario "El Carrasco", ubicado en el departamento de Santander, entre los límites de Bucaramanga y Girón. [16]

Según los datos de báscula de disposición final de residuos, suministrados por la EMAB. Del relleno sanitario "El Carrasco", la cantidad de residuos dispuestos, fluctúa entre 700 a 1100 ton/día. En donde se toma como referente los valores registrados en el 2013 en donde en promedio se recibieron 873 toneladas de RSU diarias. En la Tabla 11, se muestra los valores de disposición total anual suministrados por la EMAB en "El Carrasco" durante estos años y en otros años en donde este valor fue estimado.

En los residuos que se depositan actualmente en "EL Carrasco", se encuentra la biomasa que puede ser aprovechada para transformarla en energía eléctrica mediante el proceso de incineración. También se estima que la cantidad de biomasa ya depositada podría servir, si al realizar una evaluación detallada sobre los parámetros como humedad, nitrógeno, cenizas, carbono, fósforo, potasio, capacidad calorífica, se logran identificar índices aceptables para su utilización.

Se propone la incineración de los RSU, como un método idóneo que ayuda a resolver en gran parte esta problemática ambiental, acogiendo en parte como un concepto de reciclaje, ya que se trata de un procedimiento en donde se realiza una recuperación energética, que puede ser aplicado en sitios donde se cumpla un criterio de gestión integral.

En síntesis, con la implementación de un esquema de gestión integral de los RSU, en donde la incineración tenga un papel importante, se ayuda a resolver en gran parte la problemática generada por la disposición de los residuos domiciliarios, aumentando la vida útil de los rellenos sanitarios, haciéndolos más seguros, logrando un impacto medioambiental positivo.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar un estudio de prefactibilidad eléctrica utilizando como fuente de energía alternativa la biomasa aprovechable de los residuos sólidos urbanos, donde se identifica el potencial energético para luego predimensionar una planta de generación.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar y describir el proceso de generación de energías alternativas, usando la biomasa que está depositada en el relleno sanitario “El Carrasco”.
- Identificar la composición de los residuos sólidos depositados en un relleno sanitario, analizando la biomasa que puede ser empleada como combustible y las diversas opciones tecnológicas de las cuales se dispone a nivel mundial para rescatar las de mejor adaptabilidad en nuestro sistema.
- Proyectar este tipo de generación alternativa de acuerdo a sus especificaciones adaptándola a una microred o en una planta de generación conectada a la red regional.
- Plantear la opción de dimensionar una planta de generación de energía eléctrica, usando la biomasa aprovechable como materia prima.
- Evaluar los resultados obtenidos en el software RETScreen y presentarlos como una opción, que permita optimizar el recurso existente y servir de base

futura para la toma de decisiones respecto al tema técnico de pre factibilidad del relleno sanitario.

3. MEMORIA DESCRIPTIVA Y ANTECEDENTES MUNDIALES.

Grandes cantidades de desechos urbanos se generan diariamente en el planeta, esto causa un gran problema para la sociedad y el medio ambiente, de ahí que debemos cooperar para ayudar en la solución de esta problemática ambiental; de igual manera, los desechos urbanos ocasionan un impacto económico importante debido a los costos asociados al tratamiento y disposición final de los mismos. La solución está ligada a los conceptos actuales de gestión de los residuos sólidos urbanos donde se busca minimizar su producción y valorizarlos mediante procesos de recuperación energética.

3.1 GESTIÓN Y TRATAMIENTO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS.

Debido a los efectos negativos que los residuos sólidos urbanos ocasionan en el medio ambiente, es necesaria la implementación de un esquema de gestión y tratamiento, que abarque desde el momento en que son generados estos residuos, hasta su disposición final. Este proceso busca un buen manejo de los residuos en todas sus etapas, resaltando la recuperación energética como una alternativa para minimizar las cantidades de residuos que son vertidos en los rellenos sanitarios.

Para realizar de forma adecuada este proceso, es importante clasificar los residuos según su naturaleza y origen, conocer las características que se derivan de sus propiedades, su composición, así como las etapas implementadas en el esquema de gestión.

3.1.1 Aspectos generales y definiciones. En este apartado se presentan algunas definiciones que permiten entender con mayor claridad los temas que se tratan en este documento, así como un esquema jerárquico de gestión de los residuos y la clasificación de estos.

3.1.1.1 Definición de Biomasa. La Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo define la biomasa como: *“fracción biodegradable de los productos, desechos y residuos de origen biológico procedentes de actividades agrarias (incluidas las sustancias de origen vegetal y de origen animal), de la silvicultura y de las industrias conexas, incluidas la pesca y la acuicultura, así como la fracción biodegradable de los residuos industriales y municipales”* [1].

Con base en la definición anterior, se considera como biomasa los residuos sólidos urbanos que ingresan en el relleno sanitario “El Carrasco”, los cuales son objeto de estudio en este documento.

3.1.1.2 Los residuos sólidos urbanos (RSU). Son los objetos, sustancias, materiales o elemento, generados por las actividades realizadas a diario por una población, estas actividades pueden ser de carácter doméstico o industrial. Cuando estos han prestado un servicio (han sido usados o consumidos), se consideran residuos urbanos con excepción de aquellos residuos que pueden causar daño a la población, los cuales son considerados peligrosos [2].

La Directiva de la Unión Europea 2008/98/CE incluye como bio-residuos: *“los residuos orgánicos procedentes de jardines y parques, residuos alimenticios y de cocina procedentes de hogares, restaurantes, servicios de restauración colectiva y establecimientos de consumo al por menor, y residuos comparables procedentes de plantas de transformación de alimentos”* [2].

3.1.1.3 Jerarquías en la gestión de residuos. La jerarquía de residuos es un esquema de actividades, en orden de prioridad, que conducen a un modelo óptimo de gestión en la legislación y la política sobre la prevención y la gestión de los residuos, constituyendo la mejor opción para el medio ambiente.

La directiva 2008/98/CE del parlamento europeo y del consejo de 19 de noviembre de 2008 sobre los residuos, define una jerarquía en la gestión de residuos sólidos urbanos en el siguiente orden de prioridad: a) Prevención; b) Preparación para la reutilización; c) Reciclado; d) Otro tipo de valorización, por ejemplo, la valorización energética; e) Eliminación [2].

En algunos casos, se pueden saltar algunos escalones de este esquema jerárquico para determinados flujos de residuos, en estos casos se deberá justificar mediante factibilidad técnica, viabilidad económica y protección del medio ambiente, entre otros [3].

3.1.1.3.1 Prevención. Ocupa el primer escalón de esta pirámide de jerarquía y supone una optimización en el uso de recursos de los que se resultan los residuos; la prevención debe entenderse como la reducción en la demanda de recursos y/o mejorar la calidad de los productos, promoviendo una mejor gestión o reducción el uso de materiales peligrosos. A diferencia de otras de las actividades que forman parte de esta pirámide de jerarquías, la prevención en la generación de residuos es la mejor opción [3], [4].

3.1.1.3.2 Reutilización. Consiste en aprovechar los residuos sin cambiar la forma ni las características, obteniendo un aprovechamiento completo de estos; esta

actividad puede promoverse al diseñar productos que puedan ser reutilizados de forma fácil y práctica [3], [4].

3.1.1.3.3 Reciclado. El reciclaje es un proceso de valorización en el que los residuos cambian la forma y sus características originales convirtiendo materiales en productos útiles; durante este proceso se pierde gran parte de los recursos que fueron usados en la fabricación de estos materiales generando una degradación en su calidad, pero no por esto deja de ser un buen método de valorización de recursos [3], [4].

3.1.1.3.4 Valorización energética. Es una forma de valorización y recuperación donde se destruye la estructura de los residuos, generando grandes cambios físicos y químicos en estos; se puede aplicar a gran parte de los residuos, siempre y cuando se genere un balance energético viable y se controlen las emisiones de gases contaminantes. Se considera, que esta actividad de valorización de los residuos es preferible a la eliminación de los mismos sin ningún tipo de valorización energética. La incineración como método de valorización energética es una de las tecnologías más utilizadas, otras tecnologías son la pirolisis y la gasificación [3], [4].

3.1.1.3.5 Eliminación. Ocupa el último lugar en la pirámide de jerarquía siendo la opción de gestión utilizada para los residuos sobrantes de las actividades anteriores de gestión. Esta alternativa cumple la función de eliminar los residuos no deseados, que no fueron utilizados en ninguna de las actividades anteriores de gestión, depositándolos de forma segura [3], [4].

3.1.1.4 Clasificación de los R.S.U. La clasificación de los RSU se realiza teniendo en cuenta los siguientes criterios:

- **Origen:** estos residuos son originados principalmente en los hogares, comercios, instituciones, en construcciones, en la industria, en el agro, etc.
- **Composición:** estos residuos pueden ser orgánicos o inorgánicos.
- **Grado de peligro:** entre los residuos con mayor grado de peligrosidad están los inertes, inflamables, sanitarios, radiactivos, infecciosos, etc.

A continuación, se clasifican los residuos que serán tenidos en cuenta para la recuperación energética según su origen.

- **Domiciliarios:** conforman gran parte los residuos que ingresan en los rellenos sanitarios. Son originados por la actividad doméstica y se componen principalmente de residuos de comidas, papel, cartón, plásticos, metales, textiles, etc.
- **Comerciales:** se generan en actividades de comercio diarias como mercados, restaurantes, oficinas, negocios, etc. Se componen principalmente de desechos orgánicos (sobras de restaurantes, alimentos en descomposición, etc.) y basura generada en actividades laborales (papel, cartón, plástico, etc.). no se incluyen los residuos hospitalarios.
- **Servicios municipales:** son los residuos que se obtienen en el barrido de las vías públicas y en la limpieza de espacios públicos. Se componen principalmente de residuos inertes, papel, restos de poda de jardinería, etc.

3.1.2 Composición de los R.S.U. depositados en el relleno sanitario “El Carrasco”. En este apartado se documenta la composición de los residuos que ingresa a diario en el relleno sanitario “El Carrasco”, tomando como referencia estudios realizados a estos residuos por entidades públicas y privadas.

3.1.2.1 Composición física de los residuos. Según Información de la EMAB. La composición física de los residuos sólidos del área metropolitana de Bucaramanga según el convenio EPB-UIS, 1996, tiene las siguientes características que se muestran en la Tabla 1. Cada residuo se toma respecto a 100 Kg.

Tabla 1. Composición de los residuos sólidos área metropolitana de Bucaramanga.

TIPO DE RESIDUO	% TOTAL
Material orgánico	56,00
Papel/Cartón	8,80
Plástico	19,40
Vidrio	4,20
Metales	2,40
Textiles	4,60
Cueros	1,90
Residuos Sanitarios	2,70

Fuente: Adaptado por la EMAB de convenio EPB-UIS, 1996.

3.1.2.2 Composición química de los residuos. En la Tabla 2, se muestra la composición química de los residuos sólidos del Área Metropolitana de Bucaramanga, tomada del estudio realizado por Buitrago Gómez Gerardo en 1989 y consignada en el documento Plan de Manejo Ambiental de enero de 1997. Según información proporcionada por la EMAB.

Tabla 2. Composición química de los residuos del área metropolitana de Bucaramanga.

PARAMETRO	RANGO DE OSCILACION	
	Mínimo	Máximo
Humedad	63,30	78,70
Nitrógeno Total	1,10	2,00
Cenizas	9,00	29,10
Carbono	39,40	50,60
Relación C/N	22,70	46,00
Fósforo	0,45	3,00
Potasio	1,20	2,00
ph Suspensión 1:2	5,40	6,00
Capacidad Calorífica	3 011,00	3 924,00

Fuente: Adaptado por la EMAB de Buitrago Gerardo, 1989.

3.1.2.3 Caracterización física de los residuos dispuestos en “El Carrasco”. La caracterización física que describen los diferentes materiales que componen los residuos sólidos sirve como un parámetro base para conocer sus propiedades y los riesgos que pueden causar al medio ambiente.

La información mostrada en la Tabla 3, corresponde al muestreo realizado para la preparación del documento PGIRS (plan de gestión integral de residuos sólidos) de la EMAB. En el cual se tomaron 18 muestras procedentes de los municipios del área metropolitana de Bucaramanga y aledaños. Los resultados fueron calculados y ordenados por categorías, teniendo en cuenta sus propiedades o posibilidades de tratamiento y disposición final. Esta información fue adaptada de GEOTEC INGENIERIA LTDA. 2002. Según lo informado por la EMAB.

Tabla 3. Clases de residuos que ingresan en “El Carrasco”.

DESCRIPCIÓN DE LOS RESIDUOS	CARACTERÍSTICAS
RESIDUOS CON CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE BIOTRANSFORMACIÓN	Residuos orgánicos provenientes de actividades domésticas o industriales susceptibles de descomponerse biológicamente y que constituyensustrato para producción de bioabono tales comocompostaje, lombricultura, etc.
RESIDUOS CON PROPIEDADES FÍSICAS PARA RECICLAJE.	Residuos que por sus características físicas se pueden reutilizar o pueden servir como materia prima en procesos productivos para la elaboración de nuevos Productos.
RESIDUOS CON CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE ESCOMBRERA	Residuos inertes provenientes de la construcción de vías, viviendas o excavaciones generales cuyo destino o uso final corresponde a depósitos de suelo, agregados, concretos, pavimento, etc.
RESIDUOS CON CARACTERÍSTICAS FÍSICAS PARA DISPOSICIÓN DIRECTA EN EL RELLENO SANITARIO (NO RECUPERABLES)	Residuos con mínima posibilidad de aprovechamiento por su grado de contaminación o mezcla con otros materiales que ocasionaría costos altos para su aprovechamiento. Tales residuos son llantas, papeles pequeños sucios, plásticos no reciclables, etc.
RESIDUOS CON CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE INCINERACIÓN	Estos residuos corresponden en general a los residuos patógenos especialmente a los provenientes de hospitales y centros médicos.

Fuente: Adaptado por la EMAB de GEOTEC INGENIERIA LTDA, 2002.

De acuerdo con la Tabla 3, se realizó una caracterización de los residuos que ingresan a “El Carrasco”. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 4. La información mostrada en esta tabla fue adaptada de, diagnóstico ambiental de alternativas FONADE –AMB 2002. Según lo informó la EMAB.

Tabla 4. Caracterización de los residuos que ingresan en “El Carrasco”.

COMPONENTES DEL RESIDUO	TOTAL	%
RESIDUOS CON CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE BIOTRANSFORMACIÓN		
Residuos de comida	1,694	50.30%
Papel y cartón sucios o pequeños	0,007	0.20%
Madera forestales aserrin	0,261	7.80%
Carbón cenizas escorias	0,083	2.50%
Pañales desechables, toallas higiénicas, Etc	0,099	2.90%
Hueso, vísceras, cueros	0,000	0%
TOTAL BIOTRANSFORMACIÓN	2,143	63.70%
RESIDUOS CON CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE RECICLAJE		
Plásticos envases	0,079	2.30%
Plásticos laminados	0,136	4.00%
Plásticos expandidos desechables	0,016	0.50%
Cartón y papel	0,138	4.10%
Textiles	0,069	2.10%
Vidrio	0,043	1.30%
Zapatos	0,049	1.50%
Metales ferrosos latas	0,023	0.70%
Metales ferrosos chatarras	0,009	0.30%
Aluminio	0,003	0.10%
TOTAL RECICLAJE	0,564	16.70%
RESIDUOS CON CARACTERÍSTICAS FÍSICAS PARA DISPOSICIÓN DIRECTA		
Llantas, cauchos	0,047	1.40%
Especiales, baterías, teléfonos, Etc	0,005	0.10%
Plásticos no reciclables	0,030	0.90%
Papel pequeño sucio	0,105	3.10%
Textiles no reciclables	0,122	3.60%
Cueros industriales	0,141	4.20%
Plásticos expandidos desechables	0,004	0.10%
Otros	0,052	1.50%
TOTAL DISPOSICIÓN DIRECTA	0,506	15.00%
RESIDUOS CON CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE ESCOMBRERA		
Escombros	0,144	4.30%
TOTAL ESCOMBRERA	0,144	4.30%
RESIDUOS CON CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE INCINERACIÓN		
Otros hospitalarios	0,006	0.20%
Patógenos, hospitalarios	0,003	0.10%
TOTAL INCINERACIÓN	0,009	0.30%
TOTAL MUESTRA (Kg):	3,366	100%

Fuente: Adaptado por la EMAB de diagnóstico ambiental de alternativas FONADE-AMB 2002.

De la información presentada en la Tabla 4., se concluye lo siguiente:

- El 63,7% de los residuos que ingresan al relleno sanitario “El Carrasco”, son desechos orgánicos con propiedades para ser transformados en energía. Aunque estos residuos, no se encuentran separados, sino mezclados entre sí.
- Los materiales que se pueden reciclar corresponden al 16,7%, cifra muy similar a los residuos no recuperables que equivalen al 15%.
- En menor proporción se encuentran los materiales como los escombros con un 4,3% y hospitalarios con un 0,3%.

En la Tabla 5., se muestra una comparación de los resultados obtenidos de diferentes estudios realizados en El Carrasco. “De la comparación se puede observar que la calidad de los materiales no ha cambiado significativamente, lo cual se aprecia en los valores bajos de la desviación estándar; sin embargo, en los materiales de plástico se observa una tendencia al incremento desde el año 1996, lo que se refleja en un mayor valor de desviación estándar de los datos. Un comportamiento similar se tiene en los materiales de construcción (escombros) al analizar los datos del año 2000 y 2002”. [5]

Tabla 5. Comparación de las caracterizaciones de residuos realizadas en “El Carrasco”.

COMPONENTE FÍSICO	RESULTADOS DE DIFERENTES ESTUDIOS (%)			DESVIACION ESTANDAR
	GEOTEC 2002	COGAN-RODRIGUEZ 2000	EPB-UIS 1996	
Orgánicos (a)	56,27	62,9	56	3,91
Plástico	7,88	14,9	19,4	5,81
Celulósico (papel y cartón)	7,4	7,2	8,8	0,87
Sanitario (b)	2,93	4,4	2,7	0,92
Vidrio	1,26	3,5	4,2	1,53
Textiles	5,67	2,7	4,6	1,51
Cuero	4,19	1,97	1,9	1,3
Metales totales	1,03	1,7	2,4	0,68
Res Construcción	4,28	0,46		2,7
Res Hospitalarios	0,27	0,24		0,02
Especiales (c)	0,15	0,08		0,05
Neumáticos	1,4	0,023		0,97
Otros	7,27			
Total	100	100,07	100	

Fuente: Datos suministrados por la EMAB.

En la Tabla 6., se muestran los parámetros tenidos en cuenta en los diferentes estudios realizados en el relleno “El Carrasco”.

Tabla 6. Parámetros para los estudios.

	GEOTEC 2002	COGAN-RODRIGUEZ 2000	EPB-UIS 1996
Periodo de muestreo	7 días	35 días	NE
Número total de muestras.	18 muestras	35 muestras	NE
Peso total de las muestras	3,4 Ton	98,6 Ton	NE

Fuente: Datos suministrados por la EMAB

3.1.3 Aplicaciones energéticas de los residuos sólidos urbanos. Dentro de las aplicaciones que pueden tener los R.S.U. se encuentran las siguientes: Producción de electricidad, producción de calor y vapor, y gas combustible entre otras. Estas pueden variar dependiendo de la composición y características de estos residuos.

3.1.3.1 Producción de electricidad. La electricidad se genera a partir de diferentes tipos de residuos que sirven como materia prima que, dependiendo del tipo, caracterización y cantidad disponible, varía la tecnología empleada para su valorización energética. Esta generación se puede producir mediante turbinas de vapor, turbinas de gas y empleando motores Stirling. [6]

3.1.3.2 Producción de calor y vapor. Mediante la combustión de los residuos se genera calor y vapor. El calor producido se puede emplear en la calefacción de hogares o puede ser un subproducto para generación de energía eléctrica en centrales combinadas de calor y energía. El vapor producido por la combustión de los residuos se puede emplear para accionar turbinas de vapor para generar energía eléctrica, también puede emplearse como calor de un proceso en una fábrica, o utilizarse para mantener un flujo de agua caliente. [6]

3.1.3.3 Gas combustible. El biogás que se produce durante el proceso de digestión o pirólisis anaerobia de los residuos, puede ser utilizado en motores de combustión interna para accionar turbinas en la generación de energía eléctrica, producción calorífica, en necesidades comerciales y domésticas y en vehículos que sean modificados para funcionar con este tipo de combustible. [6]

3.1.3.4 Cogeneración. Cuando una entidad presenta un alto consumo térmico y eléctrico, se plantea la posibilidad de una instalación en donde se produzca con estas dos formas de energía llamado cogeneración. Esta forma de generación, trae grandes ventajas ya que es más eficiente que si se emplean estos dos sistemas por separado. [6]

3.1.4 Tecnologías para el aprovechamiento de los residuos. En la actualidad, existen diversas tecnologías para el tratamiento de los residuos sólidos urbanos, y se pueden clasificar según la naturaleza del proceso.

En este documento, el tipo de biomasa que estudiara será la biomasa residuos o residuos sólidos urbanos (R.S.U.); en consecuencia los procesos que mejor se adaptan para este tipo de residuos son:

- Combustión directa
- Gasificación
- Pirólisis
- Digestión anaerobia

El aprovechamiento que se puede obtener con estas tecnologías son: producción térmica y generación eléctrica.

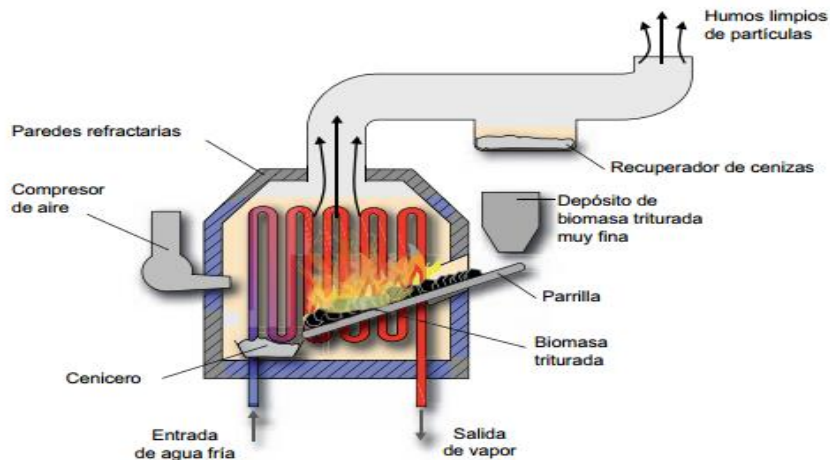
3.1.4.1 Combustión directa. La materia orgánica reacciona de forma química con el oxígeno mediante el proceso de combustión a través de una reacción exotérmica, la cual trasmite calor al medio, se obtiene generalmente dióxido de carbono y agua; si los compuestos que reaccionan tienen los elementos azufre y nitrógeno, aparecen óxidos de azufre y óxidos de nitrógeno.[7]

Existen factores en la biomasa que afectan el proceso de combustión de forma trascendente como: las características físicas, químicas y energéticas como porcentaje de oxígeno y temperatura a la que se realiza la misma, que está aproximadamente entre 600 °C y 1300 °C. [7]

“Entre las características físicas de la biomasa sobresale, por su importancia, el grado de humedad de la misma. Se aconseja que el grado de humedad sea inferior a 15% (biomasa seca), ya que en la evaporación del agua contenida en la biomasa se consume parte de la energía liberada en la combustión. Si se utiliza biomasa seca pueden lograrse rendimientos del orden del 80%, frente a los rendimientos conseguidos (60%) cuando se utiliza biomasa húmeda (humedad >50%). Asimismo, la granulometría (tamaño) y la densidad son características que influyen en la duración del proceso de combustión y en los equipos utilizados en el tratamiento y en la propia combustión”. [7]

En la Figura 1., se muestra como se genera el vapor mediante la combustión directa de los residuos.

Figura 1. Generación de vapor por combustión directa.



Fuente: Tomado [7]

3.1.4.2 Procesos termoquímicos. Para transformar la biomasa se debe someter a un proceso de oxidación con determinadas condiciones de presión y temperatura, con el fin de obtener un producto en cualquier estado, ya sea sólido, líquido o gaseoso para la aplicación deseada. Es importante aclarar que si éste se realiza en presencia del oxígeno, se le denomina gasificación; Por el contrario, en ausencia de oxígeno se le llama pirólisis. [7]

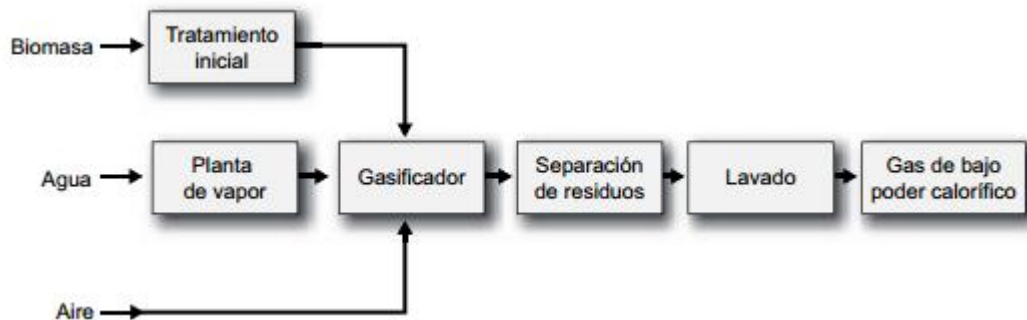
3.1.4.2.1 Gasificación. Este concepto se refiere al proceso o también al conjunto de ellos para transformar un combustible sólido en gaseoso, el cual contiene otros componentes CO (monóxido de carbono), CO₂ (dióxido de carbono), H₂ (hidrógeno), CH₄ (metano) y el vapor de agua.

En la gasificación, la biomasa debe tener una humedad baja para evitar pérdidas de energía en la evaporización y mejorar así el rendimiento del proceso. De igual forma, la temperatura debe estar en un rango de 700 °C a 1500 °C para obtener los

resultados esperados y evitar problemas técnicos, teniendo en cuenta que las presiones pueden variar entre 1 y 30 atmósferas. [7]

Cuando la humedad es inferior a 15%, a la biomasa se le realiza gasificación con aire en pequeña cantidad en comparación a una gran cantidad de masa en combustión, se obtiene el denominado gas gasógeno o gas pobre el cual tiene un poder calorífico inferior a 5,5 MJ/m³. Este gas se utiliza comúnmente en equipos de combustión destinados a generar electricidad mediante turbinas de gas y generadores eléctricos. En la Figura 2 se muestra un esquema del proceso de gasificación con aire. [7]

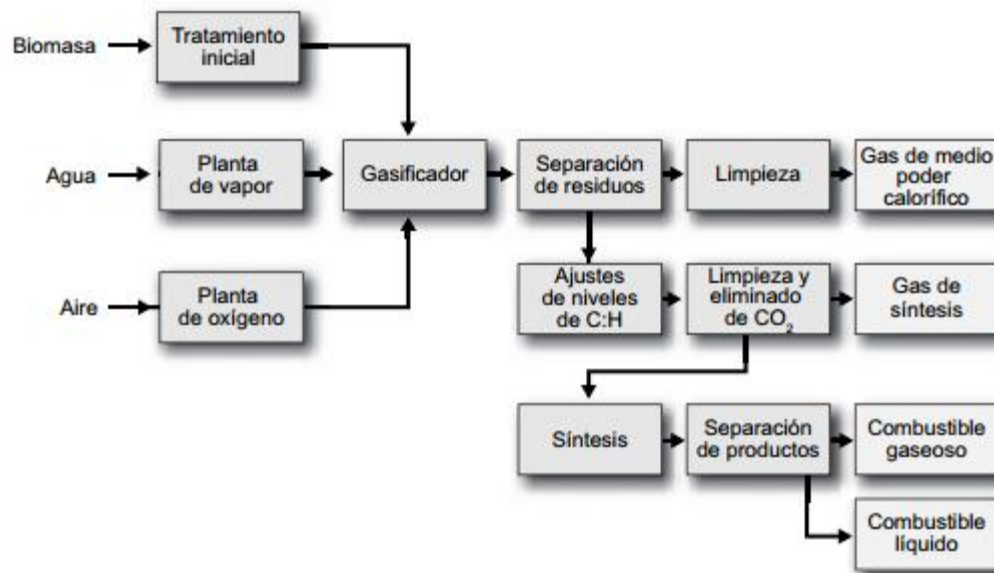
Figura 2. Esquema conceptual del proceso de gasificación con aire.



Fuente: Tomado [7]

Cuando la gasificación de la biomasa seca se realiza con oxígeno se obtiene el denominado gas de síntesis, con poder calorífico superior al gasógeno pero inferior al de los combustibles convencionales (propano, butano, etc.). A este gas se le puede convertir en combustible líquido como el metanol y otros combustibles gaseosos. En la Figura 3 se muestra un esquema del proceso de gasificación con oxígeno. [7]

Figura 3. Esquema conceptual del proceso de gasificación con oxígeno.



Fuente: Tomado [7]

3.1.4.2.2 Pirólisis. Este proceso se encarga de procesar un combustible y obtener otro con mejores características. La pirólisis se realiza en ausencia total de oxígeno a una temperatura inicialmente de 260 °C para terminar aproximadamente con una de 500 °C.

Las características de la biomasa a emplear como residuos agrícolas, forestales, sólidos urbanos y las condiciones de operación del proceso (temperatura, presión, tiempo, etc.) determinan la composición y el tipo de producto obtenido. En la Figura 4 se muestra un esquema del proceso de pirólisis. [7]

Figura 4. Esquema conceptual del proceso de pirólisis



Fuente: Tomado [7]

3.1.4.3 Procesos biológicos. *“En estos procesos la biomasa húmeda se degrada gracias a la acción de microorganismos, que contiene la biomasa o que se incorporan al proceso, obteniéndose productos de alta densidad energética. Los dos procesos más conocidos son la digestión anaerobia y la fermentación alcohólica”.* [7]

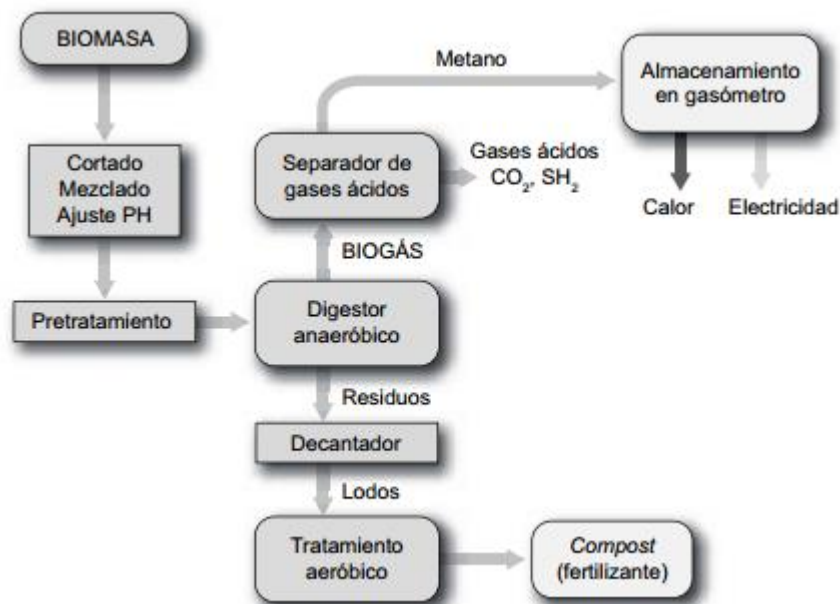
Como parte de este documento solo se define la digestión anaerobia, ya que el proceso de fermentación alcohólica no es apropiado para el tipo de biomasa residual o para los residuos sólidos urbanos.

3.1.4.3.1 Digestión anaerobia. Al igual que la pirólisis se lleva a cabo en ausencia de aire, pero la descomposición de la biomasa se realiza por acción de bacterias y no por altas temperaturas.

El producto que resulta es el llamado biogás, compuesto de dióxido de carbono y metano, junto con fango, el cual puede funcionar como fertilizante de terrenos.

La producción del biogás consta de tres etapas de la siguiente forma: en primer lugar ocurre una descomposición de la materia orgánica en azúcares, llamada hidrólisis; después continua la transformación en ácidos orgánicos denominada acetogénica, y como tercera etapa la metanogénica, en donde ocurre la transformación de las sustancias anteriormente obtenidas en metano (CH_4) y gases ácidos (SH_2 , CO_2). En la Figura 5 se muestra un esquema del proceso de digestión anaeróbica. [7]

Figura 5. Esquema conceptual del proceso de digestión anaeróbica.



Fuente: Tomado [7]

3.1.5 Ciclo Rankine. Para eliminar muchos aspectos imprácticos asociados con el ciclo de Carnot se debe sobrecalentar el vapor en la caldera y condensarlo mediante el condensador, como se muestra mediante el diagrama T-s en la figura 6.

A este ciclo que supera al ciclo de Carnot por su practicidad, se le llama ciclo Rankine, aplicado en las centrales eléctricas de vapor y reconocido como el ciclo ideal para ellas. Este ciclo ideal está compuesto por los siguientes procesos:

Proceso 1-2: Compresión isentrópica en una bomba.

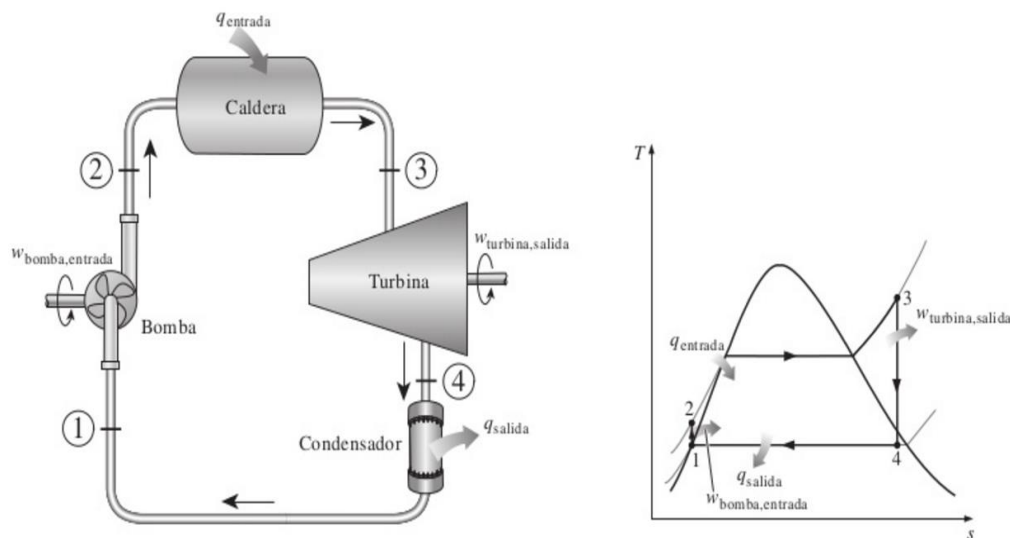
Proceso 2-3: Adición de calor a presión constante en una caldera.

Proceso 3-4: Expansión isentrópica en una turbina.

Proceso 4-1: Rechazo de calor a presión constante en un condensador.

En la figura 6, se muestra a la izquierda el esquema de los componentes de un ciclo Rankine ideal. A la izquierda su respectivo diagrama T-s.

Figura 6. Gráfica del proceso a través del ciclo Rankine.



Fuente: Tomado [8]

El agua ingresa a la bomba en el estado 1, como un líquido saturado y se condensa isentrópicamente hasta la presión de operación en la caldera. La distancia vertical entre los estados 1 y 2 en el diagrama T-s se muestra un poco exagerada para tener una mayor claridad sobre la compresibilidad casi nula del agua.

El agua al entrar en la caldera lo hace como líquido comprimido en el estado 2, y sale como vapor sobrecalentado en el estado 3. La caldera junto a una sección llamada sobrecalentador, donde el vapor se sobrecalienta, recibe el nombre de generador de vapor.

El vapor sobrecalentado en el estado 3, ingresa a la turbina donde se expande isentrópicamente y produce trabajo al hacer girar el eje que se encuentra conectado a un generador eléctrico. La presión y la temperatura del vapor disminuyen hasta llegar al estado 4, donde el vapor entra al condensador.

En el condensador se rechaza el calor hacia medios refrigerantes, convirtiendo al vapor como líquido saturado para ingresar a la bomba y retomar el ciclo.

3.1.6 Situación actual del relleno sanitario “El Carrasco”. Las alarmas están encendidas gracias a los boletines informativos que se encuentran y a la realidad que se vive en torno al tema de los desechos sólidos urbanos.

Una noticia, redactada por Felix Leonardo Quintero del periódico El Tiempo el día 11 de octubre de 2013, titulada “El barrio que espera el cierre del relleno del Carrasco en Bucaramanga” se muestra cómo desde ese entonces no es fácil encontrar soluciones viables.

Durante, aproximadamente 4 años, se interpuso una demanda al relleno sanitario “El Carrasco” por parte del barrio porvenir, lo cual empezó en el 2009 donde se declaró la emergencia sanitaria. Desde ese entonces la administración municipal ha evitado el cierre.

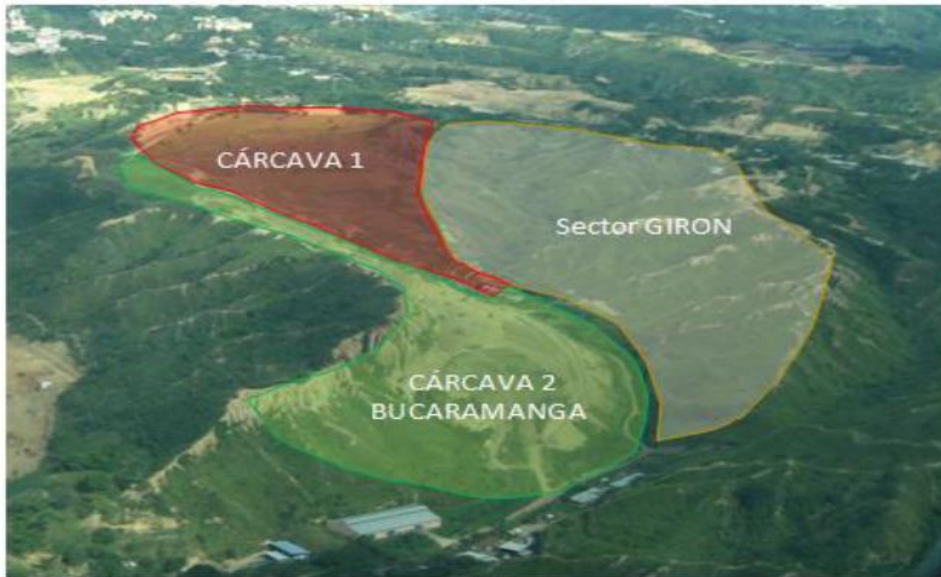
Los motivos básicamente es que no es sólo una problemática que sufre el barrio El Porvenir, sino un problema mundial sobre qué hacer con la basura y cómo poder mejorar la disposición minimizando impactos ambientales, sociales, económicos y preservando condiciones sostenibles a las iniciativas de ciudades sostenibles y sustentables.

Una nueva noticia titulada “*El Carrasco seguirá operando por 24 meses más*”, cita que: “*Los alcaldes del área metropolitana reconocieron ayer que en el corto plazo no hay ninguna solución, por lo que acordaron seguir usando El Carrasco y prorrogar la emergencia sanitaria.*”[9]

Se trae a consideración, la información real suministrada por la empresa municipal de aseo de Bucaramanga (EMAB), que en el año de 1977 bajo un estudio detallado y en manos de un experto de rellenos sanitarios de origen canadiense George Riviche, se creó un convenio para la disposición y sitio final de los residuos sólidos urbanos al suroccidente de la ciudad de Bucaramanga donde limita el barrio El porvenir y el municipio de Girón.

En ese entonces, la disposición de los residuos consistía en dejar caer cualquier cantidad de residuos sin control ambiental sin anticiparse a los impactos posibles que se ocasionarían en un futuro, por así decirlo justo ahora. Entre 1997 y 1988, se formuló un plan de manejo ambiental aprobado por la corporación autónoma regional para la defensa de la meseta de Bucaramanga (CDMB), este documento clasificó sectores de disposición de desechos en Cárcavas las cuales se muestran en la Figura 7, y están ubicadas de la siguiente forma:

Figura 7. Ubicación de las Cárcavas ubicadas en “El Carrasco”



Fuente: Tomado [10]

Cárcava I:

Está Compuesta por dos zonas, donde la zona I funcionó desde 1986 hasta 1996. Después de remodelarse y adecuarse volvió a funcionar en los años de 1997 hasta 2006. La zona II es el sitio donde se opera actualmente desde el año 2007.

Cárcava II:

Este sitio fue utilizado durante el año de 1977 hasta 1985, su disposición a cielo abierto almacenó cerca de 500mil toneladas de desechos. Recibió un nombre como botadero “*Malpaso*”.

Cárcava III:

Este sitio se encuentra aún sin ser utilizado al sur-occidente del predio. Su área es de 12 hectáreas que se ubican en el municipio de Girón. Se encuentra cubierto por vegetación y no ha sido intervenido aún.

Como dato importante, sobre la cantidad de residuos depositados al día, se encuentra que “*En El Carrasco se depositan 900 toneladas diarias de basura procedente de 14 municipios*”. [11]

3.2 ANTECEDENTES MUNDIALES DE APLICACIONES DE BIOMASA RESIDUAL MUNICIPAL CON RECUPERACIÓN ENERGÉTICA.

Los antecedentes, en el uso de biomasa como combustible para incineración a nivel mundial han ido aumentando, a medida que la energía requerida en procesos industriales y domiciliarios son parte del diario vivir, como calefacción o energía eléctrica. El caso de los residuos sólidos urbanos que se convierten en problema dado su contaminación después de su disposición final, pueden permitir una obtención de energía final y así disminuir su impacto negativo con el medio ambiente, por ello la idea de aprovechar estos desechos es algo que inquieta a los países, dado la problemática de almacenar basura, surgen algunos propósitos en común:

- Prevenir la producción de residuos es la máxima prioridad.
- Los residuos deben reciclarse, ya que es ecológicamente ventajoso, técnicamente factible y económicamente razonable.
- Los residuos que quedan se vierten con una reactividad mínima y de manera ecológica.
- El tratamiento térmico reduce el volumen aproximadamente de 10 a 1.
- Utilizando el contenido calorífico de los residuos, casi el 30% del calor anual utilizado para la calefacción centralizada en Viena se produce en las tres plantas incineradoras de residuos que existe. [12]

3.2.1 Incineradoras en Europa. En Europa, la incineración de residuos sólidos urbanos ha sido aplicada con altos estándares de calidad ambiental, inversiones y ganancias económicas y aprovechamiento de energía en forma de calor o electricidad.

La electricidad generada mediante la incineración de residuos se considera producción de energía en régimen especial y, como tal, recibe unas aportaciones fijadas reglamentariamente por la Administración. Bajo este concepto se estima que en 2009 la incineración de residuos en España recibió 37,8 millones de euros. [13]

Un ejemplo español es la planta incineradora de residuos sólidos urbanos, que se encuentra en la ciudad autónoma española, en el norte de África, a orillas del mar Mediterráneo, en el cabo de Tres Forcas, la cual en el año de 1991 se planteó la solución del problema de los residuos sólidos urbanos para llevar a cabo la construcción y explotación de la Planta Incineradora, el 22 de Julio de 1993 se constituye la sociedad Residuos de Melilla, S.A. (REMESA), los datos mostrados por la compañía sobre la turbina de vapor, alternador y condensador, muestra cómo trabajar con vapor a 40 bar y 400°C, la cual cuenta, con una extracción intermedia de vapor ,cuyo propósito es generar energía eléctrica. La energía producida es alrededor de 2,7 MWh mediante un generador síncrono trifásico donde la principal intención es cubrir la demanda interna de la planta y los excedentes de energía se vierten en la red pública. [14]

Las técnicas de minimización de residuos y de recogida selectiva de sus residuos permiten reducir el flujo de materiales a tratar, sin embargo, aun soportando el elevado coste económico que representa su aplicación intensiva, son técnicamente incapaces de afrontar un tratamiento integral de los residuos, tal como el que la Ciudad de Melilla necesitaba. En consecuencia, la técnica elegida fue la de incineración, ya que permite tratar todo el flujo de residuos, obteniendo grandes ventajas de entre las cuales se pueden citar:

- Creación de un centro de tratamiento único para todo tipo de residuos (excepto industriales o especiales)
- El escenario de la técnica permitía mantener de forma continuada un nivel de calidad medio ambiental muy elevado con total seguridad.
- La reducción del volumen de los residuos alcanza valores del 90%, facilitando enormemente el tratamiento de las escorias en vertedero. Dado el carácter inerte de las escorias es posible su uso en obras públicas como relleno y bases, lo que puede llegar a hacer innecesario su vertido.
- La Planta Incineradora permite producir una apreciable cantidad de energía eléctrica, cuyo uso en la red pública permite reducir el consumo de combustible fósil en la generación eléctrica. Alternativamente, la combinación de energía eléctrica y térmica que produce la Planta Incineradora puede emplearse en otros proyectos sociales o industriales de interés para la ciudad.[14]

Estudios mundiales demuestran que el sistema de incineración y gestión de residuos en plantas permite disminuir niveles de contaminación en el suelo, aire y hasta en fuentes hídricas que tienen contacto con subproductos de la basura en rellenos.

3.2.2. Incineradoras en Austria. En Austria existen tres plantas incineradoras de residuos sólidos urbanos:

- Dos en Viena (Spittelau con capacidad de aproximadamente 260.000 toneladas¹ al año y Floetzersteig con aproximadamente 200.000 toneladas al año.)
- Una en Wels (provincia de Alta Austria) con capacidad de aproximadamente 60.000 toneladas al año [15].

Ejemplos de incineradoras, juntos con sus tablas proporcionadas, se traen a consideración mostrando tablas de información donde se resume características importantes de algunas incineradoras en Austria.

La tabla 7., muestra las entradas y salidas mediante mediciones realizadas por la planta incineradora de Spittelau en una tonelada de residuos en el año 2000.

Tabla 7. Entradas y salidas en una tonelada de residuos de la planta Spittelau.

Entradas Relativas a 1 tonelada de residuos		Salidas relativas a 1 tonelada de residuos	
Calor	27,6 kWh	Calor	1857 kWh
Electricidad	78,5 kWh	Electricidad	150 kWh
Gas natural	20,1 m ³	Vapor (p=32 bares; T=240°C)	2,6 t
Agua dulce	730 l	Escoria	207 kg
Cal	2,9 Kg	Chatarra Metálica	22 kg
Hidróxido sódico, 30%	2,25 kg	Cenizas Volantes	19 kg
Amoniaco, 25%	2,9 kg	Torta de filtro (15-20%H ₂ O)	1 kg
Agentes de precipitación, 51%	0,17 kg	Agua Residual limpia	415 l
		Gas de combustión limpio(seco)	4545 Nm ³

Fuente: Adaptado [21]

La tabla 8., muestra las entradas y salidas de la planta incineradora de Wels tomando como año de referencia un estudio del año 2000.

Tabla 8. Entradas y salidas en una tonelada de residuos de la planta Wels

Entradas relativas a 1 t de residuos		Salidas relativas a 1 tonelada de residuos	
Electricidad	130 kWh	Electricidad	599 kWh
Gas natural	4,5 m ³	Vapor (p=40 bares; T=400°C)	3,15 t
Agua dulce	850 l	Escoria	274 kg
Cal	6,4 kg	Chatarra férrea	17,2 kg
Hidróxido sódico, 30%	3,0 kg	Ceniza volante	35 kg
Amoniaco, 25%	1,4 kg	Torta de filtro (28% H ₂ O)	2,25kg
Coque	1,2 kg	Yeso	4,7 kg
Polielectrolitos	0,006 kg	Agua residual limpia	358 l
Acido clorhídrico, 30%	0,5 kg	Gas de combustión limpio (seco)	5692 Nm ³
FeCl ₃ , 40%	0,65 kg		
Na ₂ S	0,19 kg		

Fuente: Adaptado [21]

La tabla 9., proporciona la información de la incineradora Simmeringer Haide, que permite observar con mayor claridad las entradas y salidas respecto a una tonelada de residuos como referencia.

Tabla 9. Entradas y salidas en una tonelada de residuos de la planta Simmeringer Haide.

Entradas relativas a 1 t de residuos		Salidas relativas a 1 t de residuos	
Electricidad	234 kWh	Calor	1459 kWh
Agua dulce	6158 l	Electricidad	269 kWh
Fuel-oil pesado, 1% S	0,033 m ³	Vapor (p=52 bares, T=350°C)	3,7 t
Cal	23,2 kg	Escoria	190 kg
Coque	5,0 kg	Chatarra metálica	13,4 kg
Hidróxido sódico, 50%	5,2 kg	Cenizas volantes	14,6 kg
Amoniaco, 25%	3,0 kg	Torta de filtro (54,7%H ₂ O)	17 kg
Agentes precipitantes, 15%	0,32 kg	Agua residual limpia	1657 l
FeCl ₃ , 40%	1,53 kg	Gas de combustión limpio (seco)	7900 Nm ³
Ácido clorhídrico, 30%	1,0 kg		
Arena	35,6 kg		
Nitrógeno líquido, 98,5%	3,6 kg		

Fuente: Adaptado [21]

3.2.3. Planta incineradora de Malmö. Malmö es una ciudad que se encuentra ubicada en la provincia de Escania, es la tercera ciudad más grande en Suecia y también dentro de las 15 ciudades verdes, cuya argumentación la realiza la publicación «15 ciudades verdes», publicada en 2007, por Grist Magazine.

Como la mayoría de las autoridades locales de todo el mundo, Malmö está experimentando cada vez mayores cantidades de residuos de acuerdo con el desarrollo económico de la sociedad. En las instalaciones de SYSAV conversión de residuos en energía en Malmö, los volúmenes de residuos se reducen a través del tratamiento térmico y al mismo tiempo la energía en forma de energía y la calefacción se produce en beneficio de los municipios propietarios de solid waste company of Southwest Scania (SYSAV). La instalación de conversión de residuos en energía de SYSAV en Malmö se ha extendido por una nueva unidad de 4 producir tanto calor y electricidad a partir de residuos sólidos urbanos y residuos industriales de aprox. ½ millones de habitantes en los 14 municipios del sur de Skåne. Las unidades más nuevas son: 25 [t / h], Unidad 3 encargó en 2003. 25 [t / h], Unidad 4 comisionado en 2008.

Por otra parte, una bomba de calor de absorción se ha instalado con el fin de aumentar la eficiencia total de la planta a más de 100% en la condensación de gas de combustión. La capacidad de la planta es ahora 650.000 toneladas de residuos al año, y produce 1,4 TWh de calor y 0,3 TWh de energía. El centro es uno de los más grandes de su tipo en Europa. La instalación cumple con las normas ambientales más estrictas establecidas por la Unión Europea, y en algunas áreas, incluyendo NOx los requisitos de garantía son aún más estrictas que las de la UE. Desde 1998 Ramboll ha sido el representante de SYSAV. [17]

3.2.4. Planta de Sleaford en Lincolnshire. La planta Sleaford en Lincolnshire, Reino Unido, es un ejemplo de las mejores técnicas para la producción de energía por combustión de biomasa forestal haciendo uso de calderas. El proyecto fue ejecutado en un consorcio entre BWSC y BWE con este último como proveedor de calderas. Está construido para una entrada de calor de hasta 120 MW equivalente a un consumo de biomasa forestal de 30 toneladas por hora, que suman 240.000 toneladas por año y generando el poder 38.5MW, correspondiente a aproximadamente 65.000 hogares y negocios. También es posible utilizar hasta 22% astillas de madera en la caldera. Sustitución de carbón en la planta de Sleaford reduce las emisiones de CO₂ en más de 150.000 toneladas por año. [18]

3.2.5. Planta en Klemetsrud, Oslo, Noruega. En Oslo ciudad de Noruega, el tratamiento a los residuos sólidos es un tema que ha tomado gran importancia permitiendo ejecutar proyectos para mejorar las relaciones con el medio ambiente, y proporcionar beneficios a los habitantes, mediante la incineración y obtención de energía en forma de calor y eléctrica. El Municipio de Oslo, Energigjeninnvenningsetaten, EGE, está ampliando la capacidad de tratamiento en la planta de conversión de residuos en energía en Klemetsrud por una tercera unidad. Este y otros proyectos han puesto Noruega en el mapa climático mundial. Noruega es el país con el creciente sector de la calefacción urbana más rápido (en% anual) y con la mayor parte de los residuos a la energía en la producción de calor de distrito.

- **Solución integrada.**

Oslo Municipio está estableciendo una solución integrada para el tratamiento de residuos, recuperación de energía y calefacción urbana incluyendo un mayor uso de las energías renovables. Ramboll es parte del equipo del proyecto con el establecimiento paralelo de una planta de clasificación de residuos domésticos en plástico, residuos orgánicos y desechos residuales, una planta de producción de

biogás a partir de residuos orgánicos para ser utilizado como biocombustible para los autobuses de Oslo y tratamiento térmico prolongado de los residuos remanentes con el calor y la producción de electricidad en Klemetsrud instalación de conversión de residuos en energía. Ramboll es consultor principal de Oslo Ayuntamiento en relación con este último, el responsable de la adquisición de equipos mecánicos y eléctricos, así como la obra civil para una tercera unidad y de la coordinación de las actividades relacionadas con la calefacción urbana. [19]

Ramboll asiste Oslo Municipio durante todo el proyecto - desde la planificación hasta la ejecución de la nueva unidad. Cuando en servicio en 2011, las instalaciones de conversión de residuos en energía en Oslo tendrán una capacidad total anual de 415.000 toneladas de residuos. La capacidad de la nueva unidad es de 160.000 toneladas por año, la producción de 55,4 MW de calor (demanda de calor de 40.000 hogares) y 10,5 MW de electricidad (el consumo de electricidad de 20.000 hogares) [19].

3.2.6. Conversión de residuos en energía, Westenergy Oy en Vaasa, Finlandia.

Finlandia también requiere tratar muchos de los residuos generados por los habitantes, y como gran muestra de su interés en obtener energía a partir de los residuos debido a la motivación por parte de la Unión Europea decidió que Ramboll fuese su consultor de Westenergy Oy Ab. Con el fin de alejarse de su dependencia de los vertederos cinco empresas intermunicipales de gestión de residuos con el nombre de Westenergy Oy Ab decidido establecer una instalación de conversión de residuos en energía en Vaasa. Animado por la legislación de la UE, esta es la primera instalación de conversión de residuos en energía para los residuos urbanos de muchos en Finlandia.[20]

En mayo de 2008, Ramboll firmó un contrato con Westenergy Oy Ab de servicios de consultoría, para la planificación e implementación de un verde campo de las

instalaciones de conversión de residuos en energía. Ramboll ayuda al cliente a través de todas las etapas del proyecto, desde el análisis y la planificación de proyectos de puesta en marcha y seguimiento de los contratos en el periodo de garantía. La energía producida en la instalación es equivalente a la demanda de electricidad de 7.000 hogares y cubrirá el 25 por ciento de la demanda de calefacción urbana en Vaasa. [20]

4. ANÁLISIS DE LA TECNOLOGÍA ADOPTADA.

La tecnología necesaria, para lograr la obtención de energía mediante los residuos sólidos urbanos, permite el buen desarrollo del proceso desde su comienzo mediante la recolección del producto hasta los desechos finales como consecuencia de la incineración. Durante esta transformación se describen los elementos que hacen parte del ciclo de agua-vapor utilizado, y un planteamiento sobre el tratamiento de los gases de combustión.

4.1 TRATAMIENTO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS.

Existen técnicas para pretratamiento, almacenamiento y manejo para los distintos tipos de residuos que son generados y que pueden ser utilizados mediante un plan de gestión integral de residuos para su valorización energética, tales son:

- Residuos sólidos urbanos;
- Residuos peligrosos;
- Lodos de depuradora;
- Residuos clínicos.

Se procede a describir el orden de las operaciones más relevantes para los tipos de residuos sólidos que son el caso de estudio principal. [21]

4.1.1 Recolección y pretratamiento de los residuos como parte de su recuperación energética antes del proceso de combustión. La naturaleza de los residuos sólidos urbanos que ingresan en el relleno “El Carrasco”, puede verse

afectada por el proceso de recogida y pretratamiento, es por ello necesario un cumplimiento consistente de los requisitos para este fin. Un programa necesario es el de reciclaje que de no ser realizado puede generar algunas reacciones inesperadas. En la Tabla 10., se muestra la influencia de seleccionar y pretratar los residuos sólidos.

Tabla 10. Principales impactos de la selección y pre tratamiento de los residuos.

Fracción eliminada	Impactos principales sobre el resto de residuos
Vidrio y metales	Aumento en el poder calorífico
	Reducción en la cantidad de metales recuperables en la escoria
Papel, cartón y plástico.	Reducción en el poder calorífico
	Posible reducción en las cargas de cloro si el PVC es común
Residuos orgánicos, como alimentos y residuos de jardín	Reducción en las cargas de humedad (particularmente de las cargas máximas)
	Aumento en el valor calorífico neto
Residuos voluminosos	Menor necesidad de extracción/trituración de tales residuos
Residuos peligrosos	Reducción en la carga de metales peligrosos
	Reducción de algunas otras sustancias, como Cl, Br, Hg

Fuente: Adaptado [21]

Según sea la eficacia de los sistemas de separación y pretratamiento empleados, así se afecta el residuo final que entra a la planta de tratamiento. Esto puede ser muy variable, dado que algunas fracciones residuales permanecen en el residuo suministrado, aún después de ser pre tratado; también, se pueden encontrar residuos comerciales, industriales y peligrosos. [21]

4.1.2 Pretratamiento de residuos sólidos urbanos antes de ser incinerados. Es común, realizar la mezcla de residuos en el foso acumulador y para el pretratamiento de RSU se restringe a la trituración de la basura compactada, donde

se puede realizar haciendo uso de cortadoras de palanca, trituradora, molinos o cortadoras giratorias.

Es importante, establecer seguridad contra incendios, para ello se puede realizar una separación en la zona de descargas espaciando los fosos de almacenamiento y una distribución adecuada de las maquinas hidráulicas como herramientas de corte; por otra parte, es necesario la descompresión de los recintos para reducir el riesgo de explosión.

Generalmente, cuando el volumen de los residuos sea mayor al del equipo de alimentación del horno, se requiere realizar una reducción para obtener características de combustión más consistentes. En algunos casos se puede mejorar la incineración mezclando, machacando y triturando todo el material.

El pretratamiento adicional de residuos es inusual en las plantas con hornos de parrilla, pero puede ser esencial para otros diseños de hornos. [21]

4.1.3 Suministro y almacenamiento de residuos. Existe un lugar al que llegan los residuos mediante camiones compactadores para descargar las basuras en los fosos de almacenamiento, el cual recibe nombre de zona de suministro.

4.1.3.1 Control de residuos. El control de residuos se puede realizar mediante superficies basculantes o con cierta inclinación que permitan el ingreso al foso. Las aberturas del foso pueden tener forma para cerrarse con el fin de evitar problemas de olor, ruido y emisiones de los residuos, manteniendo así mejores niveles de seguridad contra incendios.

4.1.3.2 Foso. El foso tiene un fondo impermeable en cemento. Para obtener, una mayor uniformidad en poder calorífico, tamaño, estructura y composición del material vertido a las tolvas del llenado, en la incineración es trascendental la mezcla de todo el material. Teniendo capacidad de almacenamiento aproximada de tres a cinco días, durante productividad de la planta, teniendo en cuenta los componentes de los residuos.

Con el fin de evitar la acumulación de polvo y gases como el metano, debido a los procesos de fermentación, acumulación de olores y emisiones de polvo, el aire primario para la incineración en el horno se toma de la zona del foso.

4.2 TECNOLOGÍA DE VALORIZACIÓN ENERGÉTICA DE LOS RESIDUOS.

El material que alimentará al proceso, requiere de una etapa de combustión, o de tratamiento térmico, adecuada técnicamente para evitar producir un comportamiento inadecuado o poco fiable en las características de los distintos tipos de residuos, de esta forma se puede valorar a nivel energético los mismos. [21]

4.2.1 Etapa de tratamiento térmico. Debido a que existen diferentes tipos de residuos, se les debe aplicar los tratamientos térmicos adecuados a cada uno de ellos. [21]

Algunos de las aplicaciones tecnológicas más utilizadas comúnmente:

- Incineradores de parrilla;
- Hornos rotativos;
- Lechos fluidizados;
- Sistemas de pirolisis y gasificación.

4.2.1.1 Tecnologías para los residuos sólidos urbanos. Para este tipo de residuos, existen varios sistemas de combustión como parrilla móvil, hornos rotativos y de lecho fluidizado. Esta última tecnología requiere que los residuos tengan un rango específico de tamaños de partícula, lo que generalmente requiere una recogida selectiva y tratamiento antes de incineración. [21]

4.2.2 Incineración con horno de parrilla. Las diferentes tecnologías para construir los hornos o incineradores, traen ventajas e inconvenientes, los tres más importantes son:

- Horno de lecho fluido
- Horno rotativo
- Horno de parrilla

En este documento se menciona información relacionada con el horno de parrilla para profundizar en la tecnología escogida para este estudio.

4.2.2.1 Hornos de parrilla. Los hornos de parrilla se aplican ampliamente en la incineración de residuos urbanos mixtos. En Europa, aproximadamente en un 90% de las instalaciones se tratan los RSU utilizan parrillas. Otros residuos tratados en incineradores de parrilla, muchas veces, con RSU son:

Residuos comerciales e industriales no peligrosos, lodos de depuradora y algunos residuos clínicos.

Los incineradores de residuos normalmente tienen los siguientes componentes:

- Alimentador de residuos
- Parrillas de incineración

- Descargador de cenizas de fondos
- Sistemas de conducción de aires de incineración
- Cámaras de incineración
- Quemadores de auxiliares

En los hornos de parrilla se realizan las siguientes funciones:

- Transporte de los materiales a incinerar a través del horno
- Carga y aflojamiento de los materiales a incinerar
- Posicionamiento de las zonas de incineración principal en la cámara de incineración, posiblemente en combinación medidas de control de rendimiento del horno.

Uno de los objetivos de la incineración es una buena distribución del aire de incineración en el horno, de acuerdo con los requisitos de combustión. Un soplante de aire primario fuerza la entrada de aire, a través de pequeñas aberturas de la capa de la parrilla, hasta la capa de combustible.

Normalmente, se añade más aire sobre el lecho de residuos para completar la combustión.

Es frecuente, que algunos materiales finos (que a veces se denominan cribados o tamizados), caigan a través de la parrilla. Este material es recuperado en el fondo por el extractor de ceniza. A veces, se recupera separadamente y puede reciclarse en la parrilla para su nueva incineración o retirarse directamente para su eliminación.

Normalmente, el tiempo de permanencia de los residuos en las parrillas no es superior a 60 minutos.

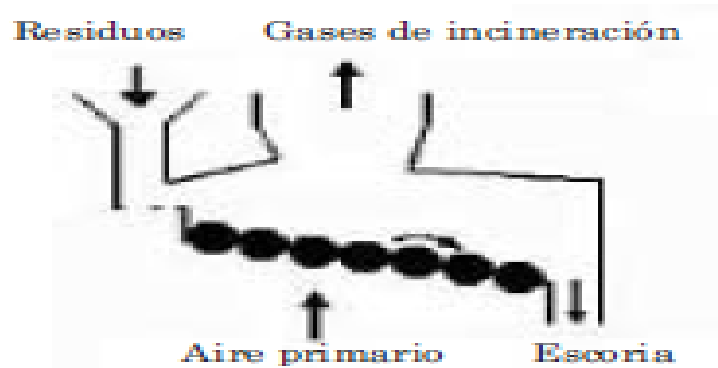
Pueden distinguirse distintos sistemas de parrillas, atendiendo al modo en que los residuos son transportados, a través de, las distintas zonas de la cámara de combustión. Todos ellos deben cumplir requisitos relativos a la alimentación de aire primario, a la velocidad de transporte e inclinación, así como de mezcla de los residuos, otras características pueden incluir controles adicionales, o una construcción más robusta para resistir las duras condiciones en la cámara de combustión.

4.2.2.1.1 Parrillas móviles. Consiste en una cinta transportadora metálica continua o biela conectada que se mueva lo largo del horno. El menor potencial para agitar los residuos (solo se mezcla cuando se transfiere de una cinta a otra) hace que su uso sea escaso en instalaciones modernas.

4.2.2.1.2 Parrillas de rodillos. Consisten en un rodillo perforado que atraviesa el ancho de la zona de parrilla con varios rodillos instalados en serie, y se produce una agitación en la zona de transición, cuando el material se desprende de los rodillos.

En la Figura 8., se representa de forma sencilla el funcionamiento básico de una parrilla de rodillo.

Figura 8. Parrillas de rodillo.

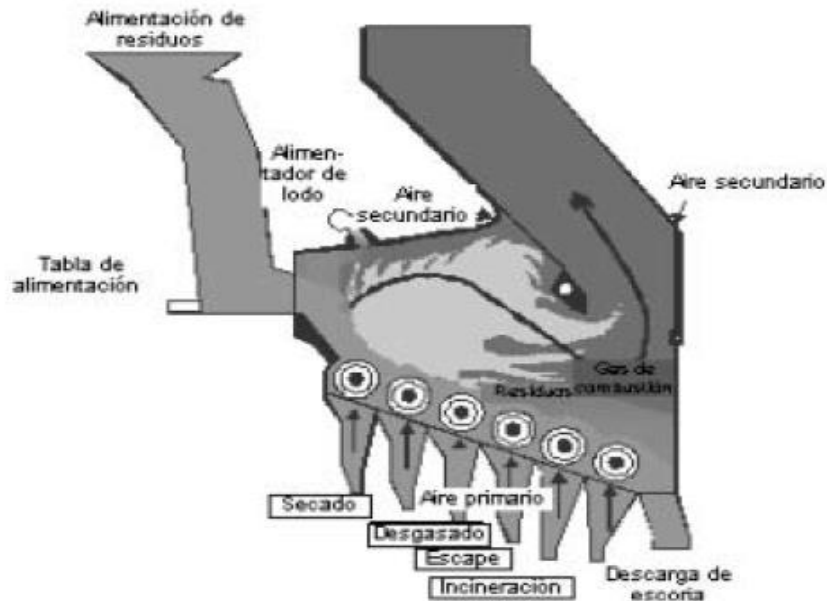


Fuente: Tomado [21]

4.2.3 Tecnología para la incineración de residuos sólidos urbanos. Esta tecnología sirve para realizar la incineración y evaporar el agua que hace parte de este ciclo, su diseño debe ser óptimo ya que es una de las etapas más importantes del proceso. Se procede a describir la cámara de incineración y la caldera correspondiente a utilizar en este proceso.

4.2.3.1 Cámara de incineración. La combustión sucede sobre la parrilla en un lugar llamado cámara de incineración, en la Figura 9., es posible apreciar un ejemplo para una cámara de incineración.

Figura 9. Representación de una cámara de incineración.



Fuente: Tomado [21]

La cámara de incineración, a grandes rasgos, está conformada por una parrilla que se encuentra situada en el fondo, algunas paredes refrigeradas y otras que se encuentran en los lados del horno sin refrigeración, y generalmente un techo o superficie de calentamiento para la caldera en la parte superior. Debido a que los residuos urbanos tienden a tener alto contenido volátil, los gases se desprenden y solo una porción de la incineración se produce en la parrilla o cerca de ella [21].

4.2.3.2 Calderas de biomasa. Para convertir el agua en vapor sobrecalentado es necesario utilizar una caldera la cual se encarga de producir vapor, proveniente de la incineración realizada en el horno de parrilla el cual contiene una cámara de incineración.

La función de una caldera de biomasa es igual a la caldera de combustibles fósiles. Lo que los hace distintos es que el tipo de combustible, lo que hace más económico

el funcionamiento y con menor impacto medioambiental reduciendo las emisiones de carbono y azufre.

Para este caso de estudio, se requiere el uso de caldera de tipo acuotubular, la cual se define a continuación. [22]

4.2.3.2.1 Caldera acuotubular. Este tipo de caldera se usa principalmente en centrales eléctricas y algunas aplicaciones industriales. Como su nombre lo indica está se compone por tubos con diámetros pequeños proporcionando el transido del fluido con presiones altas requeridas.

Las dimensiones de los tubos longitudinales se aprovechan para aumentar la superficie de calefacción, y se encuentran inclinados con el fin de permitir al vapor salir por la parte más alta y mediante forma natural pueda ingresar agua. [22]

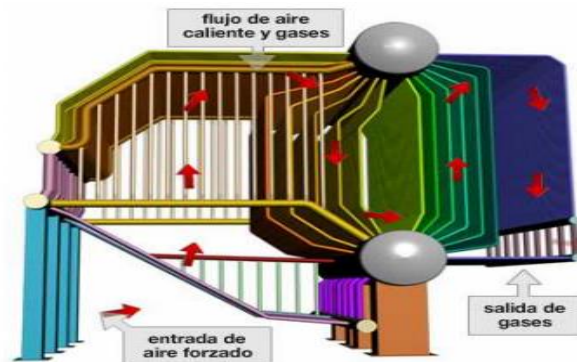
Ventajas de las calderas acuotubulares

- La caldera de tubos de agua tiene la característica de trabajar a altas presiones, se define como inexplorable, lo que proporciona seguridad para su manejo y operación.
- Posee un tiempo de arranque para producir vapor a la presión normal de trabajo en un tiempo aproximadamente de veinte minutos, mostrando que su operación es automática y en la mayoría de los casos su quemador ecológico para la combustión es la biomasa forestal.
- Una de las principales ventajas es que este tipo de tecnología produce vapor seco, diferente del vapor húmedo producido por calderas de tubos de humo,

el cual, contiene menor grado de humedad en un porcentaje de veinte por ciento, mejorando el aprovechamiento de este. [22]

4.2.3.2.2. Calderas acuotubulares con Biomasa. Este tipo de calderas tienen pequeños cambios en su estructura que las permite diferenciarse de las que funcionan con combustibles fósiles. Una de las principales variables del combustible como la biomasa, es el tamaño y grado de humedad, el cual exige que se tenga un buen manejo del aire para poder controlar la combustión. Este manejo se realiza mediante inyectores de aire con ventiladores orientados de forma estratégica para dispersar el material en su interior. Como complemento se ubican ventiladores en la base de la caldera que inyecten aire caliente para conseguir una excelente combustión [22]. En la Figura 10, se observa una caldera acuotubular y el flujo del aire en su interior.

Figura 10. Caldera acuotubular.



Fuente: Tomado [22]

4.3 CICLO AGUA/VAPOR UTILIZADO.

La mayor parte de la generación termoeléctrica comercial se realiza mediante plantas térmicas que funcionan con vapor como fluido de trabajo. En general estas plantas operan sobre la base del ciclo básico, el cual está compuesto por una caldera, turbina, condensador y bomba de alimentación de agua. A medida que la capacidad de la planta aumenta, sus parámetros de presión y temperatura también aumentan, con el objeto de conseguir altos rendimientos térmicos y bajos costos de generación. Estas variaciones obligan a modificaciones técnicas que dan lugar a variantes de ciclos que se identifican con nombres y características muy particulares.

El ciclo descrito a continuación es una reforma al ciclo Rankine ideal, llamado ciclo Rankine ideal con regeneración o regenerativo.

4.3.1 Ciclo Rankine ideal regenerativo. La primera parte del proceso de adición de calor en la caldera sucede a temperaturas relativamente bajas.

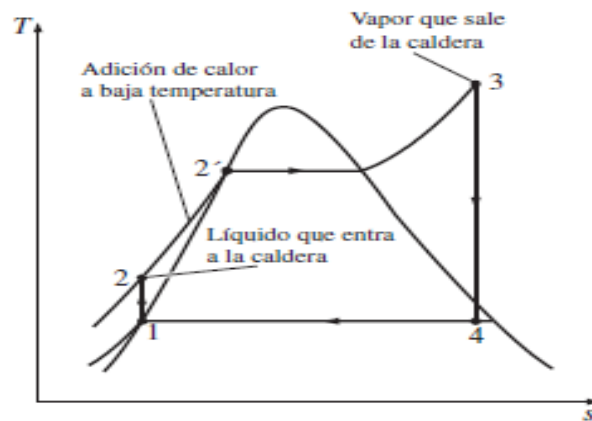
Cuando se realiza un examen cuidadoso del diagrama T-S del ciclo Rankine mostrado en la Figura 11, revela que el calor se transfiere al fluido de trabajo durante el proceso 2-2' a una temperatura baja en comparación a las temperaturas que se logran alcanzar durante el proceso. De esta manera se reduce la temperatura promedio a la que se añade el calor y por consiguiente se ve afectada la eficiencia del ciclo.

Como consecuencia, se indica una disminución de la eficiencia, entonces es necesario buscar la forma de aumentar la temperatura del agua que sale de la bomba, la cual se llama agua de alimentación, antes que ingrese a la caldera. Una

opción, es transferir calor al agua de alimentación del vapor de expansión en un intercambiador de calor a contraflujo integrado a la turbina, esta posibilidad se llama Regeneración.

Mediante la figura 11., se muestra el diagrama de temperatura y entropía (T-S), se representa el ciclo Rankine ideal regenerativo.

Figura 11. Diagrama T-S del ciclo Rankine ideal regenerativo.



Fuente: Tomado [8]

4.3.1.1 Regenerador de agua de alimentación. “Un proceso de regeneración práctico en las centrales eléctricas de vapor se logra con la extracción o “drenado” o “purga” del vapor de la turbina en diversos puntos. Este vapor, que podría producir más trabajo si se expandiera aún más en la turbina, se utiliza en cambio para calentar el agua de alimentación. El dispositivo donde el agua de alimentación se calienta mediante regeneración se llama regenerador o calentador de agua de alimentación.

La regeneración no sólo mejora la eficiencia del ciclo, también proporciona un medio conveniente de desairear el agua de alimentación (al eliminar el aire que se filtra al condensador) para evitar la corrosión en la caldera. Asimismo, ayuda a controlar el gran flujo volumétrico del vapor en las etapas finales de la turbina (debido a los grandes volúmenes específicos a bajas presiones). Por consiguiente, la regeneración se utiliza en todas las centrales eléctricas de vapor modernas desde su introducción a principios de la década de los 1920.

4.3.1.2 Calentador de agua de alimentación (CAA). Un calentador de agua de alimentación es un intercambiador de calor, donde éste se transfiere del vapor al agua de alimentación mediante la mezcla de ambos flujos de fluido (calentadores de agua de alimentación abiertos) o sin mezclarlos (calentadores de agua de alimentación cerrados).

4.3.1.2.1 Calentadores abiertos de agua de alimentación. Un calentador abierto de agua de alimentación (o de contacto directo), es básicamente una cámara de mezclado en la que el vapor extraído de la turbina se mezcla con el agua de alimentación que sale de la bomba. Idealmente, la mezcla sale del calentador como líquido saturado a la presión del calentador. El esquema de la central eléctrica de vapor con un calentador abierto de agua de alimentación (denominado también ciclo regenerativo de una sola etapa) y el diagrama T-s del ciclo se muestran en la Figura 12.

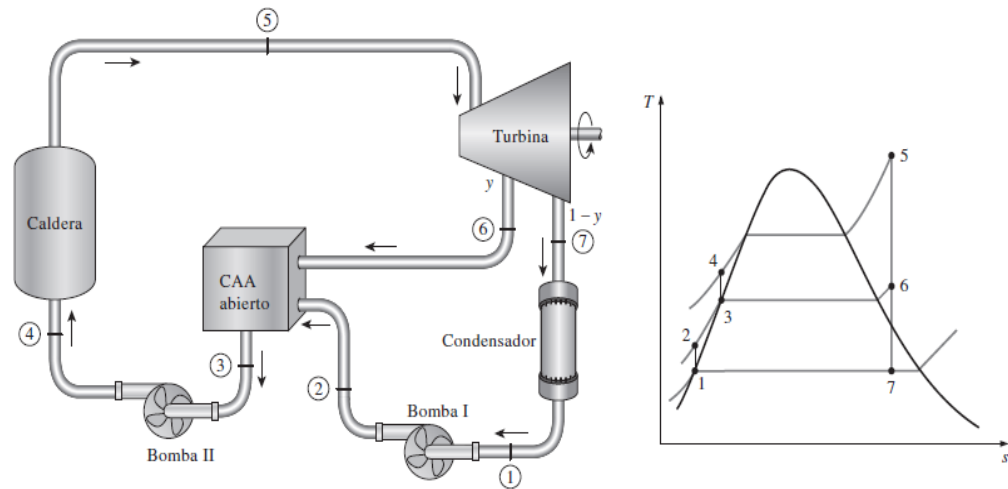
En un ciclo Rankine ideal regenerativo, el vapor entra a la turbina a la presión de la caldera (estado 5) y se expande isentrópicamente hasta una presión intermedia (estado 6). Se extrae un poco de vapor en este estado y se envía al calentador de agua de alimentación, mientras el vapor restante continúa su expansión isentrópica hasta la presión del condensador (estado 7). Este vapor sale del condensador como

líquido saturado a la presión del condensador (estado 1). El agua condensada, que también es llamada agua de alimentación, entra después a una bomba isentrópica, donde se comprime hasta la presión del calentador del agua de alimentación (estado 2) y se envía al calentador del agua de alimentación, donde se mezcla con el vapor extraído de la turbina. La fracción del vapor extraído es tal que la mezcla sale del calentador como líquido saturado a la presión del calentador (estado 3). Una segunda bomba eleva la presión del agua hasta la presión de la caldera (estado 4). El ciclo se completa con el calentamiento del agua en la caldera hasta el estado de entrada de la turbina (estado 5). [8]

Al analizar centrales eléctricas de vapor es más conveniente trabajar con cantidades expresadas por unidad de masa del vapor que circula por la caldera. Por cada 1kg de vapor que sale de la caldera, “Y” kg se expanden de manera parcial en la turbina y se extraen en el estado 6. El resto (1-y) kg se expande por completo hasta la presión del condensador. Por consiguiente, los flujos másicos son diferentes en distintos componentes. Por ejemplo, si el flujo másico a través de la caldera es m, será de (1-y) m a través del condensador. Este aspecto del ciclo Rankine regenerativo debe considerarse en el análisis del ciclo así como en la interpretación de las áreas en el diagrama T-s. De acuerdo con la Figura 12, el calor y las interacciones de trabajo de un ciclo Rankine regenerativo con un calentador de agua de alimentación pueden expresarse por unidad de masa de vapor que fluye a través de la caldera como:

$$\begin{aligned}
 q_{entrada} &= h_5 - h_4 \\
 q_{salida} &= (1 - y)(h_7 - h_1) \\
 w_{turbina,salida} &= (h_5 - h_6) + (1 - y)(h_6 - h_7) \\
 w_{bomba,entrada} &= (1 - y)w_{bomba I,entrada} + w_{bomba II,entrada}
 \end{aligned}$$

Figura 12. Ciclo Rankine ideal regenerativo con un calentador de agua de alimentación. Y el diagrama T-S



Fuente: Tomado [8]

Dónde:

$$y = m_6/m_5 \text{ (Fracción de vapor extraído)}$$

$$w_{bomba I, entrada} = V_1(P_2 - P_1)$$

$$w_{bomba II, entrada} = V_3(P_4 - P_3)$$

La eficiencia térmica del ciclo Rankine aumenta como resultado de la regeneración. Esto se debe a que la regeneración eleva la temperatura promedio a la que el calor se transfiere al vapor en la caldera aumentando la temperatura del agua antes de que entre a la caldera. La eficiencia del ciclo se incrementa aún más cuando aumenta el número de calentadores de agua de alimentación. Muchas grandes centrales que operan en la actualidad utilizan hasta ocho calentadores de agua de alimentación; el número óptimo se determina con base en consideraciones económicas. El uso de un calentador de agua de alimentación adicional no puede

ser justificado a menos que ahorre más en relación con los costos del combustible que se gastó en su propio costo. [8]

4.3.2 Grupo turbina alternador. La turbina y el alternador son los elementos más importantes de la central, debido a que el vapor actúa sobre los alabes de la turbina. El rodete de la turbina se encuentra unido al rotor del generador, que al girar con los polos excitados por una corriente induce una corriente alterna en las bobinas del estator del alternador. Como consecuencia de la transmisión de energía del vapor a la turbina, se requiere que el ese vapor se condense regresando nuevamente al ciclo de agua vapor gracias al condensador. Se hace referencia a que en los terminales del estator aparece una corriente alterna de media tensión y alta intensidad, que mediante un transformador pasa a ser alta tensión y baja intensidad para ser transportada mediante líneas de transmisión de alta tensión hacia centros de distribución y otra derivación con transformador reductor de baja tensión para satisfacer consumo interno. [22]

4.3.2.1 Turbina de vapor. El concepto de este tipo de turbinas, consiste básicamente en un motor térmico cíclico rotativo, donde la combustión es externa y su movimiento se debe al empuje del vapor, quien proporciona la energía mecánica. [22]

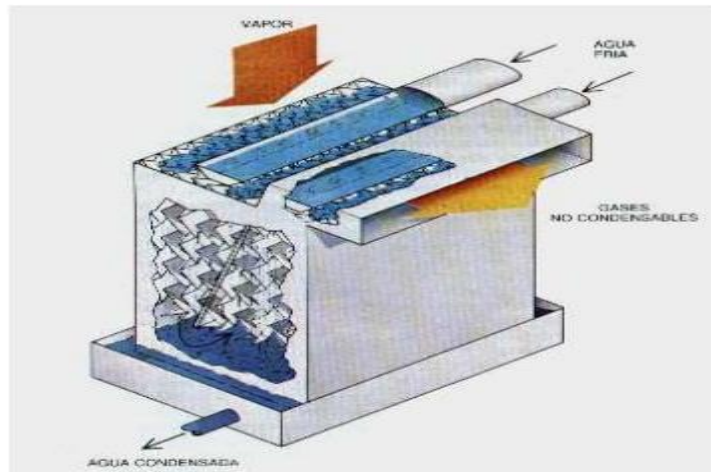
Los tipos de turbinas existentes de acuerdo a las aplicaciones y necesidades son muy variados, para este caso de estudio se hace mención de las turbinas condensadoras, debido a que son utilizadas generalmente en las plantas de potencia eléctrica. El vapor expulsado por este tipo de turbinas se encuentra parcialmente saturado usualmente con una calidad mayor al 90%, con presiones inferiores a la atmosférica se dirige posteriormente al condensador. [22]

4.3.2.2 Generador síncrono. Los generadores o motores síncronos son máquinas cuya velocidad de rotación se vincula directamente con la frecuencia de la red de corriente alterna. En la mayoría de las instalaciones eléctricas se emplean con mayor frecuencia los generadores de energía eléctrica, también llamados alternadores. Las máquinas más usadas son las trifásicas, que se encuentran compuestas por tres bobinas en el inducido con ángulos de 120° , las cuales generan tres ondas de tensión en cada bobina, para obtener así la llamada onda trifásica. [22]

4.3.3 Condensador. El condensador se encarga de intercambiar calor, mediante considerables cantidades de agua que funciona como refrigerador para condensar el vapor según sea la diferencia de temperaturas entre vapor y agua.

A nivel físico, el condensador se compone de un cilindro como tanque en el que se descarga el vapor, en el interior se encuentra una interconexión de tubos por los cuales transita el líquido refrigerante, comúnmente agua, que condensa el vapor cuando este entra en contacto con las superficies frías. Los tubos de los condensadores deben soportar extremas condiciones de temperatura y corrosión. En la Figura 13, se recrea el flujo del vapor y agua al interior de un condensador.

Figura 13. Condensador de agua (ciclo vapor)



Fuente: Tomado [22]

4.3.4 Bombas de impulsión de agua. El agua debe ser impulsada entre los distintos elementos del ciclo, así como también debe tomar y reingresar el fluido de trabajo al tanque de alimentación. Estas bombas se encargan de proporcionar las características de caudal y presión requeridas durante cada etapa. [22]

4.4 TRATAMIENTO DE GASES.

El tratamiento de gases emitidos por la combustión de residuos sólidos urbanos debe realizarse basados en las características propias que afectan el medio y que exige un adecuado sistema para controlarlos.

4.4.1 Factores para selección de un sistema de tratamiento de gases de combustión. En la siguiente lista se enuncian los factores generales que se deben

tener en cuenta a la hora de seleccionar un sistema de tratamiento para los gases de combustión [21]:

- Tipo de residuos, composición y variación;
- Tipo de proceso de combustión y tamaño;
- Caudal y temperatura de gases de combustión;
- Contenido de los gases de combustión, magnitud y frecuencia de variaciones en composición;
- Límites de emisión de objetivos;
- Restricciones para el vertido de efluentes acuosos;
- Requisitos de visibilidad de penachos;
- Disponibilidad de terreno y espacio;
- Disponibilidad y coste de salidas para los residuos acumulados/recuperados;
- Compatibilidad con los componentes del proceso existentes (plantas existentes);
- Disponibilidad y coste del agua y otros reactivos;
- Posibilidades de suministro de energía (ej: suministro de calor de lavadores de condensación);
- Disponibilidad y coste del agua y otros reactivos;
- Posibilidades de suministro de energía (ej: suministro de calor de lavadores de condensación);
- Disponibilidad de subvenciones por energía exportada;
- Carga de residuo tolerable de los residuos entrantes (hay factores comerciales y políticos);
- Reducción de emisiones por métodos primarios;
- Emisión del ruido;
- Disposición de los distintos dispositivos de limpieza de gases de combustión, a ser posible, con temperaturas decrecientes desde la caldera a la chimenea.

4.4.2 Sistema de análisis de emisiones. Se requiere de un sistema, que pueda realizar una medición de las emisiones, el cual, debe estar instalado en la chimenea, proporcionando cantidad de partículas y productos como [21]:

- CO (monóxido de carbono)
- NO_x (óxidos de nitrógeno)
- SO₂ (dióxido de azufre)
- O₂ (oxígeno)
- HCl (ácido clorhídrico)
- C (carbono total)
- H₂O (agua como vapor)

En ocasiones, las mediciones son vitales en el momento de realizar una comparación con emisiones como referencia. Por otra parte, las mediciones de dioxinas y furanos se realizan temporalmente para tener indicadores sobre el cumplimiento de normas ambientales y legislación. Los datos meteorológicos, tales como, la velocidad del viento y dirección, temperatura, humedad, presión, radiación y cantidad de lluvia; se deben procesar y almacenar en una estación de control para la supervisión que proporcione un mantenimiento correcto. [21]

4.4.3 Residuos principales de la combustión. En el proceso de incineración de residuos sólidos urbanos se generan gases contaminantes [21]:

- Óxidos de azufre como SO₂ y el SO₃.
- Ácido clorhídrico (ClH).
- Monóxido de carbono (CO) producido por la combustión completa.
- Óxidos de nitrógeno (NO_x).

- Compuestos orgánicos como dioxinas, furanos, clorobencenos, clorofenoles e hidrocarburos poliaromáticos.
- Metales pesados como residuos son el plomo, cobre, cadmio y mercurio.
- Partículas sólidas provenientes de inquemados que resultan de combustiones completas.

4.4.4 Sistema de tratamiento de combustión y control aplicado. Los sistemas de tratamiento de combustión se componen de una combinación de unidades de procesos individuales que en un conjunto proporcionan un sistema de tratamiento global para los gases de combustión. [21]

4.4.5 Técnicas que permiten reducir las emisiones de partículas. Con el fin de obtener beneficios medioambientales, en donde se reducen las emisiones a la corriente de gases de combustión, donde se quiere que la cantidad de partículas se disminuya en procesos posteriores se hace uso de técnicas, las cuales consisten en el proceso de separación de ceniza volante donde permite un tratamiento separado para posible reciclaje. [21]

En la incineración de residuos se considera importante la eliminación de partículas generadas por este proceso. Una etapa donde se elimina el polvo antes que cualquier otro tratamiento ocurre en la caldera. [21]

En el proceso de incineración de residuos, se hace uso de los siguientes sistemas de eliminación previa:

- ciclones y multiciclones;
- precipitadores electrostáticos(PE);
- filtros de manga (FM);

Se resalta que los PE y ciclones pueden no alcanzar los estándares más bajos en emisión de partículas, pero si permiten y proporcionan ayuda para alcanzar los niveles de emisiones más bajos si se aplican en combinación con otra técnica.

Como dato operativo importante se resalta que la eliminación previa de partículas, reduce de manera significativa las partículas en los TGC siguientes, permitiendo que exista un menor riesgo en obstrucciones y las unidades situadas posteriores a este proceso. [21]

4.4.5.1 Eliminación de partículas provenientes de los gases de combustión.

Para la eliminación de partículas, provenientes de los gases de combustión, se deben tener en cuenta que los diferentes equipos están condicionados con los siguientes factores [21]:

- Carga en la partícula en la corriente de gas.
- Tamaño de las partículas promedio.
- Cantidad de gas.
- Temperatura a la que se encuentra el gas de combustión.

4.5 REQUISITOS DE DISEÑO PARA 1MW.

Los requisitos enunciados a continuación permiten conocer de forma global los componentes que conforman el ciclo vapor con el fin de comprender el funcionamiento de un proceso para generar energía eléctrica mediante una planta de incineración de residuos sólidos urbanos.

4.5.1 Requisitos funcionales. Para iniciar este proceso los residuos sólidos urbanos se deben transportar y almacenar en la central, donde se someten a un pretratamiento de selección, secado y triturado para reducir su tamaño y mejorar la combustión. A continuación, pasa a un foso de almacenamiento. [22]

A continuación, los residuos almacenados se conducen a la caldera para su combustión, y el calor producido por la incineración hace que el agua a través de las tuberías de la caldera se convierta en vapor. En este caso, la caldera tiene una parrilla móvil donde se queman los residuos. [22]

El agua que circula por el interior de la caldera, procede de un tanque de alimentación; la cual, antes debe ser precalentada mediante el intercambio de calor con los gases de combustión aún calientes que salen de la propia caldera y de la extracción de la turbina. Estos gases de combustión se recirculan por la caldera para reducir la cantidad de inquemados o partículas sólidas en suspensión, para aprovechar al máximo el poder energético y reducir las emisiones a la atmósfera.[22]

Como se hace mención, en el tratamiento de gases de combustión, estos deben ser depurados en un electrofiltro mediante la precipitación de las partículas que transporta dicho gas antes de ser vertido a la atmósfera a través de una chimenea.

Las partículas retenidas, junto con las cenizas de la combustión, son conducidas a un cenicero para ser transportadas posteriormente a un vertedero. [22]

El vapor generado en la caldera se expande en la turbina de vapor que mueve el generador eléctrico, donde se realiza la transformación de energía mecánica en eléctrica. Después se eleva su tensión en los transformadores y se inyecta a la red mediante las líneas de transmisión correspondientes, y al interior de la misma planta mediante una microred. [22]

El vapor de agua que proviene de la turbina, se transforma en líquido en el condensador, para luego, ser dirigido mediante las bombas de impulsión al tanque de alimentación, para reiniciar el ciclo de agua-vapor. [22]

5. CÁLCULOS.

Este capítulo documenta los cálculos realizados para obtener el poder calorífico y el potencial energético de los residuos que son depositados en el relleno sanitario “El Carraco”, para luego identificar la potencia eléctrica que se puede generar empleando la incineración de los residuos como un proceso de valorización energética, con el fin de proponer una alternativa tecnológica y ambiental para el aprovechamiento de estos residuos.

5.1 DATOS HISTÓRICOS DE DISPOSICIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS.

En los residuos que se están depositando actualmente en los rellenos sanitarios de Colombia, se encuentra la biomasa que puede ser aprovechada para transformarla en energía eléctrica y térmica mediante el proceso de incineración.

Para los cálculos, de este trabajo de grado, se tomaron como referencia los datos de la cantidad de residuos depositados en el relleno sanitario “El Carrasco” ubicado en la ciudad de Bucaramanga.

En la Tabla 11., se presenta la cantidad de residuos depositados desde el año 2010 hasta el 2014 en el relleno sanitario “El Carrasco”.

Tabla 11. Histórico de la cantidad de residuos depositados anualmente en el relleno “El Carrasco”.

AÑO	DISPOSICIÓN TOTAL ANUAL (Toneladas)
2010	280 868,297
2011	274 560,530
2012	292 617,245
2013	318 813,055
2014	328 351,440

Fuente: Datos suministrados por la EMAB.

Se propone la incineración de los RSU como un método idóneo que ayuda a resolver, en gran parte, esta problemática ambiental; acogiéndose en parte como un concepto de reciclaje, ya que se trata de un procedimiento en donde se realiza una recuperación energética, que puede ser aplicado en sitios donde se cumpla un criterio de gestión integral.

En general, se puede afirmar que con la implementación de un esquema de gestión integral de los RSU, en donde la incineración tenga un papel importante, ayuda a resolver en gran parte la problemática generada por la disposición de los residuos urbanos, aumentando la vida útil de los rellenos sanitarios, haciéndolos más seguros.

5.2 COMPOSICIÓN DE LOS RESIDUOS.

A diferencia de los combustibles convencionales, los residuos sólidos urbanos se caracterizan por su heterogeneidad, lo que implica que se deban estudiar con mayor

profundidad para establecer la tecnología de recuperación energética a emplear, realizando una adecuada gestión de los mismos.

5.2.1 Información preliminar. Para realizar los cálculos referentes a la combustión de los residuos sólidos urbanos, son fundamentales dos parámetros: cantidad de residuos a tratar y composición cualitativa de los residuo.

Para este trabajo de grado se tienen en cuenta dos alternativas de incineración de los residuos sólidos urbanos para identificar el potencial energético.

- Incineración de los residuos en bruto o en masa según llega a la planta sin necesidad de tratamiento previo.

- Incineración de los residuos con un tratamiento previo donde se caracterizan los residuos y se clasifican en:
 - Reciclables
 - Con propiedades para ser transformados en energía
 - No recuperables
 - Escombros
 - Hospitalarios

Para cada una de las alternativas propuestas de incineración de los residuos, se calcula el poder calífico inferior (P.C.I.). Para poder identificar el potencial energético de los residuos que son depositados a diario en el relleno sanitario “El Carrasco” de la ciudad de Bucaramanga, y que generan un gran problema medioambiental.

5.2.2 Capacidad de residuos. Para conocer la capacidad de residuos sólidos urbanos (R.S.U.) de la que se dispondrá, teniendo en cuenta las dos alternativas propuestas, se toma como referencia la cantidad de residuos que ingresaron en el año 2014, que según la Tabla 11., fueron de $328\,351,440 \frac{\text{ton}}{\text{año}}$.

Con estos datos se calcula la capacidad mínima de residuos necesarios que serán incinerados:

$$328\,351,440 \frac{\text{ton}}{\text{año}} \times \frac{1 \text{ año}}{365 \text{ días}} \times \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ horas}} = 37,48 \frac{\text{ton}}{\text{h}}$$

Este valor, de $37,48 \frac{\text{ton}}{\text{h}}$, se obtiene tomando todos los residuos mezclados sin ningún tipo de tratamiento previo.

Para conocer la capacidad mínima de residuos con tratamiento previo, se toma como referencia el estudio realizado por GEOTEC INGENIERIA LTDA en el 2002, en el cual se tomaron 18 muestras de los residuos que son depositados en el relleno sanitario “El Carrasco” con un peso total de las muestras de 3,4 toneladas.

Los resultados obtenidos en este estudio se muestran en la Tabla 4 del capítulo 3, donde se indica la caracterización de los residuos sólidos urbanos que ingresan al relleno sanitario “El Carrasco”.

Con la información proporcionada por la EMAB del estudio realizado por GEOTEC INGENIERIA LTDA, 2002 de la caracterización de los residuos que son depositados en el relleno sanitario “El Carrasco”. Se determinó que porcentaje de los residuos que ingresan al relleno tienen propiedades de biotransformación para usarlos en el proceso de incineración con recuperación energética.

Con estos datos, se calcula la capacidad mínima de residuos necesarios con tratamiento previo que serán incinerados:

$$(328\ 351,440 \times 0,637) \frac{\text{ton}}{\text{año}} \times \frac{1 \text{ año}}{365 \text{ días}} \times \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ horas}} = 23,88 \frac{\text{ton}}{\text{h}}$$

En la Tabla 12., se muestra la capacidad mínima de residuos a incinerar, tomando los residuos en masa y con tratamiento previo que garantice una buena gestión de los residuos.

Tabla 12. Capacidad mínima de residuos a incinerar.

Características	Capacidad [Ton/h]
residuos en bruto o en masa	37,48
residuos con propiedades de biotransformación	23,88

Fuente: Los autores

5.2.3 Cálculo del poder calorífico inferior (P.C.I.). Se define el poder calorífico, como el valor absoluto de la entalpía de combustión, lo cual significa, la cantidad de calor que puede entregar un cuerpo.

Es importante, distinguir entre el poder calorífico superior (PCS) y el inferior (PCI). En el P.C.S. se considera que el agua de los productos se encuentra en fase líquida, mientras que en el P.C.I. se considera vapor.

En el caso del P.C.S., se puede aprovechar el calor de condensación, por lo cual, aumenta el rendimiento de la planta. Pero en este caso, se trabaja con el P.C.I., debido que, para poder aprovechar el calor de la condensación, solamente se puede usar con combustibles totalmente libres de azufre (como el gas natural), para evitar condensaciones ácidas.

Para conocer el poder calorífico de los residuos que ingresan al relleno sanitario “El Carrasco”, es necesario saber la composición física y química de los residuos a incinerar, así como su contenido de humedad.

5.2.3.1 P.C.I. residuos en bruto o en masa. En el estudio, realizado entre las Empresas Publicas de Bucaramanga EPB y la Universidad Industrial de Santander UIS en 1996 para la recuperación del componente humano del relleno sanitario, se realizó una evaluación sobre las características de los residuos sólidos que ingresaban en ese momento en el relleno sanitario “El Carrasco”, y se establecieron los porcentajes de los materiales más representativos. Los resultados se muestran en la Tabla 1., del capítulo 3.

A partir del porcentaje en peso de los residuos, y conociendo el porcentaje de humedad de cada componente, se muestra la relación de los mismos en base seca a partir de la cual se obtienen los compuestos químicos que forman estos residuos.

En la Tabla 13 que se muestra a continuación se encuentran los porcentajes de humedad de cada uno de los componentes principales que se encuentran en los residuos sólidos urbanos. Estos datos fueron adaptados de La Enciclopedia del Medio Ambiente Urbano, y los valores son muy variables si existen restos de líquidos en el interior de los recipientes.

Tabla 13. Valores típicos de contenido de humedad en RSU.

HUMEDAD RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS		
Componentes	Humedad en %	
	Sin Mezclar	Mezclados
Orgánicos	68	65
Papel y Cartón	12	24
Plásticos	1	2
Madera	20	24
Téxtiles	12	19
Vidrio	2	3
Metales	2	2

Fuente: Adaptado [23]

Para tener unos valores más detallados del contenido de humedad de los componentes que se encuentran en los residuos sólidos urbanos y poder integrar los datos mostrados en la Tabla 13, se toma como referencia la Tabla 14 en donde se complementan los porcentajes de humedad.

Tabla 14. Datos típicos del contenido de humedad de los componentes de los residuos sólidos urbanos

Componente	POR CIENTO DE HUMEDAD	
	Rango	Típico
Desechos de alimentos	50 - 80	70
Papel	4 - 10	6
Cartón	4 - 8	5
Plásticos	1 - 4	2
Textiles	6 - 15	10
Caucho	1 - 4	2
Cuero	8 - 12	10
Desechos de jardín	30 - 80	60
Madera	15 - 40	20
Vidrio	1 - 4	2
Envases de hojalata	2 - 4	3
Metales no ferrosos	2 - 4	2
Metales ferrosos	2 - 6	3
Tierra, Ceniza, Ladrillo, etc.	6 - 12	8
Desechos sólidos municipales	15 - 40	20

Fuente: Adaptado [24]

Con base a los porcentajes de humedad mostrados en la Tabla 14, se calculan los valores de la caracterización de los residuos sólidos mostrados en la Tabla 1 del capítulo 3, en base seca. A continuación, se muestra en la Tabla 15 la caracterización de los residuos sólidos urbanos que ingresan al relleno sanitario “El Carrasco” en base húmeda y base seca.

Tabla 15. Caracterización de los residuos sólidos urbanos en base húmeda y base seca.

Tipo de residuo	Base húmeda (Kg)	Humedad (%)	Base seca (Kg)
Material orgánico	56,00	70	16,80
Papel / Cartón	8,80	11	7,83
Plástico	19,40	2	19,01
Vidrio	4,20	2	4,12
Metales	2,40	3	2,33
Textiles	4,60	10	4,14
Cuero	1,90	10	1,71
Residuos sanitarios	2,70	20	2,16
TOTAL	100,00	41,90	58,10

Fuente: Los autores.

Los valores de la Tabla 15 son respecto de 100 Kg de residuos.

Por lo tanto, se tiene la siguiente distribución en porcentaje, referidos a los 58,10 kg de residuos en base seca:

ORGÁNICOS ----- 28,92%

COMBUSTIBLE ----- 56,27%

INERTES ----- 14,81%

TOTAL EN BASE SECA ----- 100%

Para conocer la composición química de los residuos sólidos urbanos que ingresan en el relleno sanitario “El Carrasco”, se toma como referencia la Tabla 16., en donde se muestra la composición química de cada uno de los componentes que conforman los R.S.U.

Tabla 16. Datos típicos de la composición química de los componentes de los residuos sólidos urbanos.

Componente	POR CIENTO EN PESO (base seca)					
	Carbón	Hidrógeno	Oxígeno	Nitrógeno	Azufre	Cenizas
Desechos de alimentos	48,0	6,4	37,6	2,6	0,4	5,0
Papel	43,5	6,0	44,0	0,3	0,2	6,0
Cartón	44,0	5,9	44,6	0,3	0,2	5,0
Plástico	60,0	7,2	22,8	----	----	10,0
Textiles	55,0	6,6	31,2	4,6	0,2	2,5
Caucho	78,0	10,0	----	2,0	----	10,0
Cuero	60,0	8,0	11,6	10,0	0,4	10,0
Desechos de jardín	47,8	6,0	38,0	3,4	0,3	4,5
Madera	49,5	6,0	42,7	0,2	0,1	1,5
Vidrio	0,5	0,1	0,4	<0,1	----	98,9
Metales	4,5	0,6	4,3	<0,1	----	90,5
Suciedad, cenizas, etc	26,3	3,0	2,0	0,5	0,2	68,0

Fuente: Adaptado [24]

Basados en los datos de la Tabla 16., se calcula la composición química de los residuos sólidos urbanos que ingresan en el relleno sanitario “El Carrasco”.

Los datos siguientes expresados en la Tabla 17., muestran los elementos químicos que conforman los componentes de los residuos sólidos urbanos en base seca, y el total de cada elemento de los residuos en bruto.

Tabla 17. Composición química de los residuos sólidos urbanos que ingresan en “El Carrasco”.

	Base Seca	Carbono (C)	Hidrogeno (H)	Oxigeno (O)	Nitrógeno (N)	Azufre (S)	Cenizas
Material orgánico	16,80	8,0640	1,0752	6,3168	0,4368	0,0672	0,8400
Papel / Cartón	7,83	3,4461	0,4699	3,4931	0,0235	0,0157	0,4699
Plástico	19,01	11,4072	1,3689	4,3347	----	----	1,9012
Vidrio	4,12	0,0206	0,0041	0,0165	0,0037	----	4,0707
Metales	2,33	0,1048	0,0140	0,1001	0,0021	----	2,1068
Textiles	4,14	2,2770	0,2732	1,2917	0,1904	0,0062	0,1035
Cuero	1,71	1,0260	0,1368	0,1984	0,1710	0,0068	0,1710
Residuos sanitarios	2,16	0,5681	0,0648	0,0432	0,0108	0,0043	1,4688
TOTAL %	58,10	26,9137	3,4069	15,7944	0,8383	0,1002	11,1320

Fuente: los autores.

Con las cantidades de los componentes químicos de los residuos, se puede hallar el poder calorífico inferior (P.C.I.) de la mezcla de los residuos en bruto o en masa empleando diversos procedimientos:

Fórmula de Dulong

$$PCS \left(\frac{Kcal}{Kg} \right) = 80,8 * (\%C) + 344 * \left[(\%H_2) - \left(\frac{\%O_2}{8} \right) \right] + 22,2 * (\%S) + 5,56 * (\%N_2)$$

Ecuación 1. Poder Calorífico Superior (PCS), Fórmula de Dulong. [25]

$$PCI \left(\frac{Kcal}{Kg} \right) = PCS - 5,97 * [(\%H_2O) + 9 * (\%H_2)]$$

Ecuación 2 Poder Calorífico Inferior Fórmula de Dulong. [25]

Reemplazando los valores de la Tabla 17., en la Ecuación 1, calculamos el poder calorífico superior de los residuos en bruto o en masa.

$$PCS \left(\frac{Kcal}{Kg} \right) = 80,8 * (26,9137) + 344 * \left[(3,4069) - \left(\frac{15,7944}{8} \right) \right] + 22,2 * (0,1002) + 5,56 * (0,8383)$$

$$PCS = 2\ 674,33 \left(\frac{Kcal}{Kg} \right)$$

Reemplazando los valores de la Tabla 17., en la Ecuación 2, calculamos el poder calorífico inferior de los residuos en bruto o en masa.

$$PCI \left(\frac{Kcal}{Kg} \right) = PCS - 5,97 * [(41,90) + 9 * (3,4069)]$$

$$PCI = 2\ 241,13 \left(\frac{Kcal}{Kg} \right)$$

Fórmula empírica

$$PCI \left(\frac{Kcal}{Kg} \right) = 81 * (\%C) + 290 * \left[(\%H_2) - \left(\frac{\%O_2}{8} \right) \right] + 21 * (\%S) - 6 * (\%H_2O)$$

Ecuación 3 Poder Calorífico Inferior Fórmula empírica [25]

Reemplazando los valores de la Tabla 17., en la Ecuación 3, calculamos el poder calorífico inferior de los residuos en bruto o en masa.

$$PCI \left(\frac{Kcal}{Kg} \right) = 81 * (26,9137) + 290 * \left[(3,4069) - \left(\frac{15,7944}{8} \right) \right] + 21 * (0,1002) - 6 * (41,90)$$

$$PCI = 2\ 346,16 \left(\frac{Kcal}{Kg} \right)$$

En adelante, se adoptará como P.C.I. de los residuos sólidos urbanos que ingresan en el relleno sanitario “El Carrasco” de la ciudad de Bucaramanga, el resultado obtenido mediante la Fórmula de Dulong es:

$$PCI = 2\,241 \left(\frac{Kcal}{Kg} \right)$$

5.2.3.2 P.C.I. residuos con tratamiento previo. Con base a los porcentajes de humedad mostrados en la Tabla 14, se calculan los valores de los residuos con características de biotransformación mostrados en la Tabla 4 del capítulo 1, en base seca. A continuación, se muestra en la Tabla 18., los residuos que ingresan en el relleno sanitario “El Carrasco” en base húmeda y base seca, con características de biotransformación.

Tabla 18. Residuos con características de biotransformación en base húmeda y base seca.

Característica	Tipo de residuo	Base húmeda (Kg)	Base seca (Kg)
Biotransformación	Residuos de Comida	50,3	15,09
	Papel/Cartón	0,2	0,178
	Residuos Sanitarios	2,9	2,32
	Madera/forestales/aserrin	7,8	6,24
	Carbón/Cenizas/Escorias	2,5	2,30

Fuente: Los autores.

Basados en los datos de la Tabla 16., se calcula la composición química de los residuos sólidos urbanos con características de biotransformación que ingresan en el relleno sanitario “El Carrasco”. Estos valores son expresados en la Tabla 19., a continuación.

Tabla 19. Composición química de los residuos que ingresan en “El Carrasco” con característica de biotransformación.

	Base Seca	Carbono (C)	Hidrogeno (H)	Oxigeno (O)	Nitrógeno (N)	Azufre (S)	Cenizas
Residuos de Comida	23,69	11,3702	1,5160	8,9067	0,6159	0,0948	1,1844
Papel/Cartón	0,285	0,1253	0,0171	0,1270	0,0009	0,0006	0,0171
Residuos Sanitarios	3,64	0,9573	0,1092	0,0728	0,0182	0,0073	2,4752
Madera/forestales/aserrín	9,79	4,8470	0,5875	4,1812	0,0196	0,0098	0,1469
Carbón/Cenizas/Escorias	3,61	0,9485	0,1082	0,0721	0,0180	0,0072	2,4524
TOTAL %	41,01	18,2484	2,3380	13,3598	0,6726	0,1196	6,2759

Fuente: Los autores.

Con las cantidades de los componentes químicos de los residuos podemos hallar el P.C.I. de los residuos con características de biotransformación empleando diversos procedimientos:

Reemplazando los valores de la Tabla 19, en la Ecuación 1, calculamos el poder calorífico superior de los residuos con características de biotransformación.

$$\begin{aligned}
 PCS \left(\frac{Kcal}{Kg} \right) &= 80,8 * (18,2484) + 344 * \left[(2,3380) - \left(\frac{13,3598}{8} \right) \right] + 22,2 * (0,1196) \\
 &\quad + 5,56 * (0,6726) \\
 PCS &= 1\,710,67 \left(\frac{Kcal}{Kg} \right)
 \end{aligned}$$

Reemplazando los valores de la Tabla 19, en la Ecuación 2, calculamos el poder calorífico inferior de los residuos con características de biotransformación.

$$PCI \left(\frac{Kcal}{Kg} \right) = PCS - 5,97 * [(58,98) + 9 * (2,3380)]$$

$$PCI = 1\,232,94 \left(\frac{Kcal}{Kg} \right)$$

Reemplazando los valores de la Tabla 19, en la Ecuación 3, calculamos el poder calorífico inferior de los residuos con características de biotransformación mediante la fórmula empírica.

$$PCI \left(\frac{Kcal}{Kg} \right) = 81 * (18,2484) + 290 * \left[(2,3380) - \left(\frac{13,3598}{8} \right) \right] + 21 * (0,1196) - 6 * (58,98)$$

$$PCI = 1\,320,48 \left(\frac{Kcal}{Kg} \right)$$

En adelante, se adopta como P.C.I. de los residuos sólidos urbanos que ingresan en el relleno sanitario “El Carrasco” de la ciudad de Bucaramanga con características de biotransformación, los resultados obtenidos mediante la Fórmula de Dulong.

$$PCI = 1\,233 \left(\frac{Kcal}{Kg} \right)$$

En la Tabla 20., se resumen los procedimientos para calcular el poder calorífico de los residuos.

Tabla 20. Poder calorífico de los residuos que ingresan en “EL Carrasco”.

	PCS_Fórmula de Dulong	PCI_Fórmula de Dulong	PCI_Fórmula empírica
Residuos en bruto o en masa	2 674,33	2 241,13	2 346,16
Residuos con propiedades de Biotransformación	1 710,67	1 232,94	1 320,48

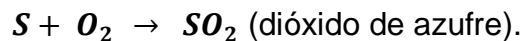
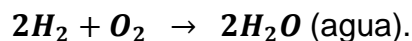
Fuente: Los autores

5.3 CÁLCULO DE LA COMBUSTIÓN.

La combustión de los residuos es un tratamiento térmico en presencia de aire que da como resultado la emisión de gases y partículas representadas en escorias y cenizas volantes con un volumen menor que los residuos incinerados. El objetivo de esto es aprovechar el calor desprendido por la combustión para generar vapor a altas temperaturas.

5.3.1 Combustión estequiométrica. A continuación, se realiza el cálculo del aire de combustión.

Las reacciones químicas que se producen son las siguientes, con las cuales obtendremos el oxígeno necesario.



El combustible se quema empleando aire como elemento oxidante. El oxígeno necesario para que se produzca la combustión de estas reacciones se obtiene del aire introducido en el horno, además del oxígeno contenido en los residuos. En la Tabla 21., se presenta el oxígeno necesario para llevar a cabo la combustión estequiométrica de los residuos en masa.

Tabla 21. Cálculo del oxígeno necesario – Residuos en masa.

Reacción → Producto	% PESO	Kg/Kmol	Kmol/100 Kg	Coef. O ₂	Kmol O ₂ / 100 Kg
$C + O_2 \rightarrow CO_2$	26,9137	12,0110	2,2407543	1	2,2407543
$H_2 + (1/2)O_2 \rightarrow H_2O$	3,4069	2,0158	1,6900982	0,5	0,8450491
$S + O_2 \rightarrow SO_2$	0,1002	32,0598	0,0031254	1	0,0031254
$H_2 + 2Cl \rightarrow 2HCl$	0,1400	70,9059	0,0019744	0	0,0000000
$O_2 \rightarrow O_2$	15,7944	31,9988	0,4935935	-1	-0,4935935
$N_2 \rightarrow N_2$	0,8383	28,0134	0,0299250	0	0,0000000
$H_2O \rightarrow H_2O$	41,6745	18,0152	2,3132965	0	0,0000000
$ASH \rightarrow ASH$	11,1320	-	-	-	-
TOTAL	100				2,5953353

Fuente: Los autores.

Son necesarios $2,595 \frac{Kmol O_2}{100 Kg RSU}$ para residuos en masa. En la Tabla 22., se presenta el oxígeno necesario para llevar a cabo la combustión estequiométrica de los residuos en masa:

Tabla 22. Cálculo del oxígeno necesario – Residuos con propiedades de biotransformación.

Reacción → Producto	% PESO	Kg/Kmol	Kmol/100 Kg	Coef. O ₂	Kmol O ₂ / 100 Kg
$C + O_2 \rightarrow CO_2$	18,2484	12,0110	1,5193073	1	1,5193073
$H_2 + (1/2)O_2 \rightarrow H_2O$	2,338	2,0158	1,1598373	0,5	0,5799186
$S + O_2 \rightarrow SO_2$	0,1196	32,0598	0,0037305	1	0,0037305
$H_2 + 2Cl \rightarrow 2HCl$	0,14	70,9059	0,0019744	0	0,0000000
$O_2 \rightarrow O_2$	13,3598	31,9988	0,4175094	-1	-0,4175094
$N_2 \rightarrow N_2$	0,6726	28,0134	0,0240099	0	0,0000000
$H_2O \rightarrow H_2O$	58,85	18,0152	3,2666859	0	0,0000000
$ASH \rightarrow ASH$	6,2759	-	-	-	-
TOTAL	100				1,6854471

Fuente: Los autores.

Son necesarios, $1,685 \frac{Kmol O_2}{100 Kg RSU}$, para residuos con propiedades de biotransformación.

5.3.2 Cantidad aire seco a suministrar. Para que se lleve a cabo la oxidación completamente durante el proceso de combustión será necesario suministrar un exceso de oxígeno del 80%.

La cantidad de oxígeno total a suministrar es:

$$2,595 \frac{Kmol O_2}{100 Kg RSU} * 1,8 = 4,671 \frac{Kmol O_2}{100 Kg RSU}$$

Al expresar las cantidades anteriores en Kg de Oxígeno por Kg de RSU es:

$$4,671 \frac{Kmol O_2}{100 Kg RSU} \frac{1}{100} * 31,9988 \frac{Kg O_2}{Kmol} = 1,4946 \frac{Kg O_2}{Kg RSU}$$

El aire seco es compuesto en su mayoría de oxígeno y nitrógeno, en la Tabla 23, se muestra el porcentaje de masa y volumen de esta composición.

Tabla 23. Composición de aire seco.

	O ₂	N ₂
Masa	23,30%	76,70%
Volumen	21%	79%

Fuente: adaptado [26]

La masa de aire seco que se suministra debe ser:

$$m_{aire_seco} = \frac{1,4946 \frac{Kg O_2}{Kg RSU}}{0,233 \frac{Kg O_2}{Kg Aire_seco}} = 6,414 \frac{Kg Aire_seco}{Kg RSU} \text{ (Residuos en masa)}$$

$$m_{aire_seco} = \frac{0,9705 \frac{Kg O_2}{Kg RSU}}{0,233 \frac{Kg O_2}{Kg Aire_seco}} = 4,1653 \frac{Kg Aire_seco}{Kg RSU} \text{ (Residuos para Biotransformación)}$$

En la Tabla 24., se muestra en forma de resumen el factor de masa de aire seco a suministrar para los residuos en masa y con propiedades de biotransformación.

Tabla 24. Masa de aire seco a suministrar.

	m aire_seco [Kg aire_seco/Kg RSU]
Residuos en bruto o en masa	6,414
Residuos con propiedades de Biotransformación	4,165

Fuente: Los autores.

5.3.3 Cantidad de aire húmedo a suministrar. Se tiene en cuenta la humedad del aire procedente del ambiente suministrado en el horno, donde se incineran los residuos. Para esto, se tiene en cuenta las condiciones del aire en la ciudad de Bucaramanga en donde se encuentra el relleno sanitario “El Carrasco”. En la Tabla 25., se muestran los valores promedios de temperatura, presión atmosférica y humedad del aire.

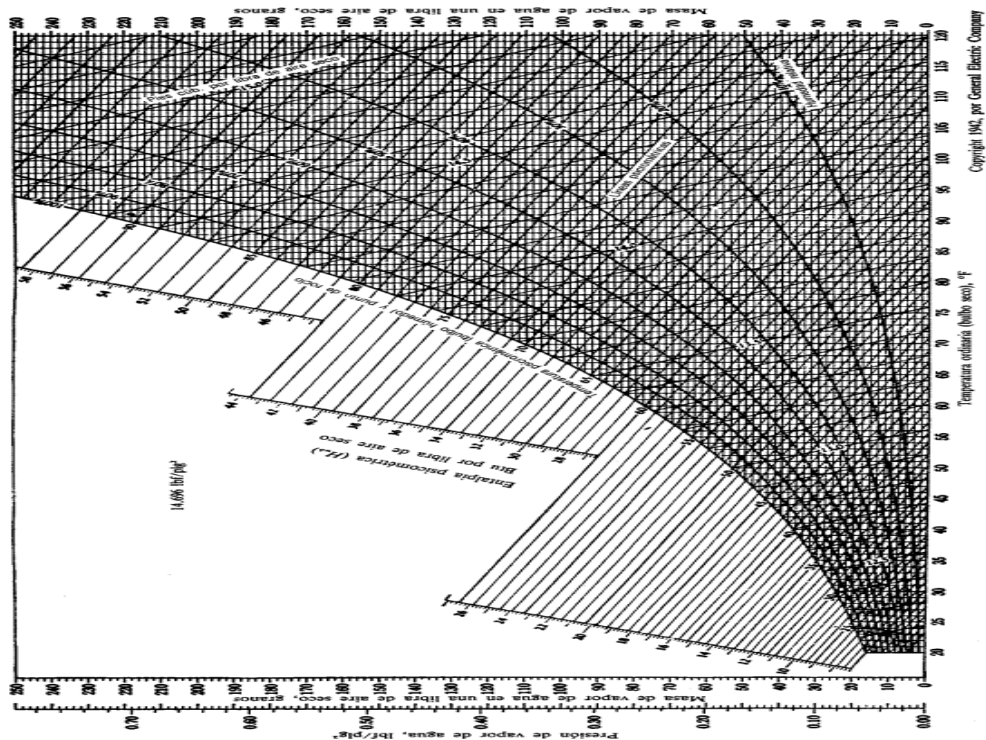
Tabla 25. Condiciones del aire en el ambiente.

CONDICIONES DEL AIRE EN LA CIUDAD DE BUCARAMANGA	
Temperatura	23 °C
Presión	1.015 mbar
Humedad relativa	83%

Fuente: Adaptado [27]

A partir del diagrama psicrométrico que se muestra en la Figura 14 a continuación, se obtiene la humedad específica del aire teniendo en cuenta las condiciones del aire de la Tabla 25.

Figura 14. Diagrama psicrométrico



Fuente: Tomado [27]

$$\text{Humedad específica } (\omega) = 0,0146 \frac{\text{Kg H}_2\text{O}}{\text{Kg Aire}_\text{seco}}$$

De este modo la masa de agua aportada por el aire es:

$$m_{\text{Agua_aire}} = \omega \cdot m_{\text{Aire}_\text{seco}}$$

$$m_{\text{Agua_aire}} = 0,0146 \frac{\text{Kg H}_2\text{O}}{\text{Kg Aire}_\text{seco}} * 6,414 \frac{\text{Kg Aire}_\text{seco}}{\text{Kg RSU}} = 0,0936 \frac{\text{Kg H}_2\text{O}}{\text{Kg RSU}}$$

Por lo tanto, la masa de aire húmedo a suministrar es:

$$m_{\text{Aire}_\text{húmedo}} = m_{\text{Aire}_\text{seco}} + m_{\text{Agua_aire}}$$

$$m_{\text{Aire}_\text{húmedo}} = 6,414 \frac{\text{Kg Aire}_\text{seco}}{\text{Kg RSU}} + 0,0936 \frac{\text{Kg H}_2\text{O}}{\text{Kg RSU}} = 6,507 \frac{\text{Kg Aire}_\text{húmedo}}{\text{Kg RSU}}$$

Por lo que se debe introducir una masa de 6,507 kg de aire húmedo por cada kg de residuo incinerado. En la Tabla 26, se muestra la cantidad de aire húmedo a suministra.

Tabla 26. Masa de aire húmedo a suministrar

	m aire_húmedo [Kg aire_húmedo/Kg RSU]
Residuos en bruto o en masa	6,507
Residuos con propiedades de Biotransformación	4,226

Fuente: Los autores

Masa molecular del aire:

$$M_{\text{aire}} \frac{1 \times 32 + 3,76 \times 28}{4,76} = 28,84 \frac{\text{Kg}}{\text{Kmol}}$$

Al considerar el aire como un gas ideal se puede calcular el volumen de aire húmedo a suministrar bajo condiciones normales {T [°K] = (273 + 23°C); P=1atm} utilizando la ecuación de estado mostrada a continuación.

$$V = \frac{n \cdot R \cdot T}{P}$$

Ecuación 4 Ecuación de estado

$$V = \frac{6,507 \frac{Kg \text{ Aire}_h}{Kg_{RSU}} \cdot 8,314 \frac{Kpa \cdot m^3}{Kmol \cdot K} \cdot 296 K}{28,84 \frac{Kg}{Kmol}} = 5,481 \frac{Nm^3}{Kg_{RSU}}$$

El volumen necesario por hora es:

$$V = 5,481 \frac{Nm^3}{Kg_{RSU}} * 37\,480 \frac{Kg}{h} = 205\,428 \frac{Nm^3}{h}$$

En la Tabla 27, se muestra el volumen de aire húmedo que se suministrará por hora.

Tabla 27. Volumen de aire húmedo a suministrar por hora.

	V aire_húmedo [Nm³/h]
Residuos en bruto o en masa	205 428
Residuos con propiedades de Biotransformación	84 511

Fuente: Los autores.

5.3.4 Composición de los gases de combustión. Para conocer el porcentaje en peso y volumen de los gases generados en la combustión es necesario conocer el balance másico, en la Tabla 28., se muestra el balance másico entre reactivos y producto.

Tabla 28. Balance másico entre reactivos y producto.

Reactivos → Producto	
C [12 Kg]	CO ₂ [44 Kg]
H ₂ [2 Kg]	H ₂ O [18 Kg]
S [32 Kg]	SO ₂ [64 Kg]
N ₂ [28 Kg]	N ₂ [28 Kg]
Cl ₂ [35,45 Kg]	2HCl [36,45 Kg]

Fuente: Los autores.

Las cantidades másicas de los gases generados en la combustión son:

CO₂ (dióxido de carbono)

$$m_{CO_2} = \frac{44}{12} (\%C) = \frac{44}{12} \cdot (0,2691) = 0,9867 \frac{Kg CO_2}{Kg RSU}$$

H₂O (agua)

$$m_{H_2O} = \frac{18}{2} (\%H_2) + m_{Agua_RSU} + m_{Agua_aire} = \frac{18}{2} \cdot (0,0341) + 0,4167 + 0,0936 = 0,8172 \frac{Kg H_2O}{Kg RSU}$$

SO₂ (dióxido de azufre)

$$m_{SO_2} = \frac{64}{32} (\%S) = \frac{64}{32} \cdot (0,001002) = 0,0020 \frac{Kg SO_2}{Kg RSU}$$

N₂ (nitrógeno)

$$m_{N_2} = \frac{28}{28} (\%N_2) + m_{N_2_aire_seco} = \frac{28}{28} \cdot (0,0084) + (0,767 \cdot 6,414) = 4,9279 \frac{Kg N_2}{Kg RSU}$$

HCl (ácido clorhídrico)

$$m_{HCl} = \frac{36,45}{35,45} (\%HCl) = \frac{36,45}{35,45} \cdot (0,0014) = 0,00144 \frac{Kg HCl}{Kg RSU}$$

Combinado a los gases generados en la combustión, se encuentra el oxígeno en exceso suministrado:

$$m_{O_2(exceso)} = m_{O_2_aire_seco} \cdot exceso = \frac{6,414}{1,8} \cdot (0,233) \cdot 0,8 = 0,6642 \frac{Kg O_2(exceso)}{Kg RSU}$$

Para conocer el volumen de los gases generados en la combustión, se tiene en cuenta que un Kmol de cualquiera de las sustancias bajo condiciones normales (0°C, 1 atm), ocupa 22,41 $\frac{Nm^3}{Kmol}$.

CO₂

$$V_{CO_2} = \frac{Kg CO_2}{Kg RSU} \cdot \frac{1}{M} \cdot 22,4 \frac{Nm^3}{Kmol} = 0,9867 \cdot \frac{1}{44} \cdot 22,4 = 0,5023 \frac{Nm^3}{Kg RSU}$$

H₂O

$$V_{H_2O} = \frac{Kg H_2O}{Kg RSU} \cdot \frac{1}{M} \cdot 22,4 \frac{Nm^3}{Kmol} = 0,8172 \cdot \frac{1}{18} \cdot 22,4 = 1,0169 \frac{Nm^3}{Kg RSU}$$

SO₂

$$V_{SO_2} = \frac{Kg SO_2}{Kg RSU} \cdot \frac{1}{M} \cdot 22,4 \frac{Nm^3}{Kmol} = 0,0020 \cdot \frac{1}{64} \cdot 22,4 = 0,0007 \frac{Nm^3}{Kg RSU}$$

N₂

$$V_{N_2} = \frac{Kg N_2}{Kg RSU} \cdot \frac{1}{M} \cdot 22,4 \frac{Nm^3}{Kmol} = 4,9279 \cdot \frac{1}{28} \cdot 22,4 = 3,9423 \frac{Nm^3}{Kg RSU}$$

HCl

$$V_{HCl} = \frac{Kg\ HCl}{Kg\ RSU} \cdot \frac{1}{M} \cdot 22,4 \frac{Nm^3}{Kmol} = 0,00144 \cdot \frac{1}{36,45} \cdot 22,4 = 0,00088 \frac{Nm^3}{Kg\ RSU}$$

El volumen del oxígeno en exceso es:

$$V_{O_2(exceso)} = \frac{Kg\ O_2(exceso)}{Kg\ RSU} \cdot \frac{1}{M} \cdot 22,4 \frac{Nm^3}{Kmol} = 0,6642 \cdot \frac{1}{32} \cdot 22,4 = 0,4649 \frac{Nm^3}{Kg\ RSU}$$

En las Tablas 29 a 32, que se muestran a continuación, se resumen los valores calculados en las operaciones anteriores, mostrando los porcentajes máscicos y volumétricos de los gases generados en la combustión en base seca y base húmeda.

Tabla 29. Porcentajes máscico de los gases generados en la combustión en base húmeda.

Producto	Residuos en masa		Residuos con propiedades de Biotransformación	
	Kg / Kg RSU	% masa	Kg / Kg RSU	% masa
CO ₂	0,9867	13,33	0,6691	12,95
H ₂ O	0,8172	11,04	0,8597	16,64
SO ₂	0,0020	0,03	0,0024	0,05
N ₂	4,9279	66,60	3,2015	61,98
HCl	0,0014	0,02	0,0014	0,03
O ₂ (exceso)	0,6642	8,98	0,4313	8,35
TOTAL	7,3994	100,00	5,1654	100,00

Fuente: Los autores.

Tabla 30. Porcentajes volumétricos de los gases generados en la combustión en base húmeda.

Producto	Residuos en masa		Residuos con propiedades de Biotransformación	
	m3 / Kg RSU	% volumen	m3 / Kg RSU	% volumen
CO ₂	0,5023	8,47	0,3406	7,97
H ₂ O	1,0169	17,15	1,0698	25,02
SO ₂	0,0007	0,01	0,0008	0,02
N ₂	3,9423	66,50	2,5612	59,91
HCl	0,0009	0,02	0,0009	0,02
O ₂ (exceso)	0,4649	7,84	0,3019	7,06
TOTAL	5,9280	100,00	4,2752	100,00

Fuente: Los autores.

Tabla 31. Porcentajes másico de los gases generados en la combustión en base seca.

Producto	Residuos en masa		Residuos con propiedades de Biotransformación	
	Kg / Kg RSU	% masa	Kg / Kg RSU	% masa
CO ₂	0,9867	14,99	0,6691	15,54
SO ₂	0,0020	0,03	0,0024	0,06
N ₂	4,9279	74,87	3,2015	74,35
HCl	0,0014	0,02	0,0014	0,03
O ₂ (exceso)	0,6642	10,09	0,4313	10,02
TOTAL	6,5822	100,00	4,3057	100,00

Fuente: Los autores.

Tabla 32. Porcentajes volumétricos de los gases generados en la combustión en base seca.

Producto	Residuos en masa		Residuos con propiedades de Biotransformación	
	m3 / Kg RSU	% volumen	m3 / Kg RSU	% volumen
CO ₂	0,5023	10,23	0,3406	10,63
SO ₂	0,0007	0,01	0,0008	0,02
N ₂	3,9423	80,27	2,5612	79,90
HCl	0,0009	0,02	0,0009	0,03
O ₂ (exceso)	0,4649	9,47	0,3019	9,42
TOTAL	4,9111	100,00	3,2054	100,00

Fuente: Los autores

5.3.5 Volumen total de los gases emitidos. El volumen total de los gases emitidos en base húmeda es de $5,9280 \frac{Nm^3}{Kg RSU}$, por consiguiente, el caudal a la hora es:

$$V_{gases} = 5,9280 \frac{Nm^3}{Kg RSU} * 37480 \frac{Kg}{h} = 222\ 181 \frac{Nm^3}{h}$$

En la Tabla 33., se muestran los volúmenes de los gases que son emitidos durante la combustión de los residuos en masa y con propiedades de transformación.

Tabla 33. Volumen total de los gases emitidos.

	V gases [Nm ³ /h]
Residuos en bruto o en masa	222 181
Residuos con propiedades de Biotransformación	102 092

Fuente: Los autores

5.3.6 Flujo másico de los gases emitidos. El flujo másico de los gases emitidos en base húmeda es de:

$$m_{gases} = 7,3994 \frac{Kg}{Kg_{RSU}} * 37\,480 \frac{Kg}{h} = 277\,329 \frac{Kg}{h}$$

En la Tabla 34., se muestran los flujos másicos de los gases que son emitidos durante la combustión de los residuos en masa y con propiedades de transformación.

Tabla 34. Flujo másico de los gases emitidos.

	m_{gases} [Kg/h]
Residuos en bruto o en masa	277 329
Residuos con propiedades de Biotransformación	123 350

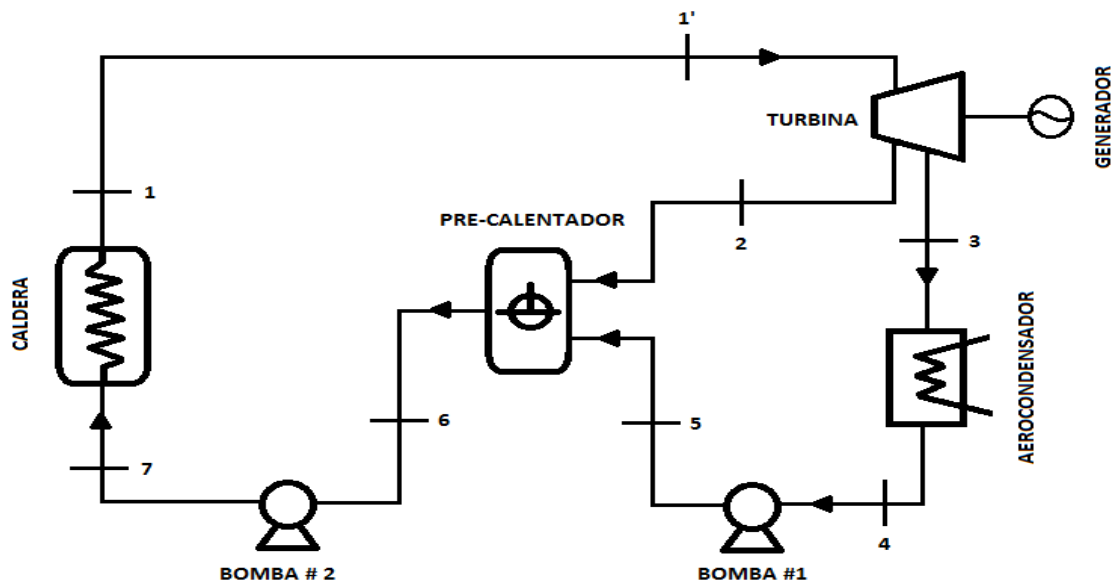
Fuente: Los autores

5.4 CICLO DE VAPOR.

El ciclo vapor, es un ciclo térmico que trabaja con el agua como fluido, en el cual, se aprovecha el calor de los gases generados en la combustión de los residuos. Permitiendo que, mediante el intercambio de calor que se produce en la caldera, el agua se convierta en vapor sobrecalentado y pase a través de una turbina de vapor que se encuentra acoplada a un generador, produciendo energía eléctrica.

5.4.1 Esquema ciclo de vapor. El ciclo utilizado para la recuperación de energía, es un ciclo Rankine con regeneración y con un pre-calentador abierto. En la figura 15, se muestra el esquema del ciclo de vapor elegido.

Figura 15. Esquema del ciclo de vapor.



Fuente: Los autores

5.4.2 Condiciones de diseño del ciclo vapor. Para conocer las condiciones de diseño se toma como referencia la información mostrada a continuación, la cual necesaria para iniciar el ciclo de vapor:

“Para producción de electricidad a partir de RSU, las condiciones típicas de vapor sobrecalentado son 40-45 bares y 380-400°C. Se aplican cifras más bajas, generalmente de menos de 30 bares y 300°C, cuando se genera electricidad a partir de residuos peligrosos, debido a los mayores riesgos de corrosión (que producen

mayores dificultades y costes operativos), con posible fuga de gases de combustión ácidos a altos parámetros de vapor". [21]

Además, para poder definir el ciclo se hace necesario conocer el rendimiento de la turbina. Este dato no puede conocerse con exactitud hasta decidir la compra del equipo. A falta de este dato se ha supuesto un rendimiento del 90% que es un valor común para este tipo de turbinas.

Los datos de diseño del ciclo de vapor son:

- Presión vapor (entrada turbina)----- 40 bar
- Temperatura vapor (entrada turbina)----- 410 °C
- Temperatura agua alimentación caldera ----- 140 °C
- Presión salida turbina ----- 0,2 bar
- Rendimiento de la turbina ----- 90%
- Rendimiento de las bombas ----- 75%

5.4.3 Cálculo del ciclo vapor.

Punto 1. Salida de la caldera.

A la salida de la caldera se tiene vapor sobrecalentado, con la presión (P) y temperatura (T) mediante las tablas de vapor se obtienen los valores entalpía (h), entropía (s) y volumen (v).

T1 [°C]	410
P1 [bar]	40
$h1 \left[\frac{Kj}{Kg} \right]$	3237,8
$s1 \left[\frac{Kj}{Kg \cdot K} \right]$	6,8048
$v1 \left[\frac{m^3}{Kg} \right]$	0,07475

Punto 1'. Entrada de la turbina.

Desde la salida de la caldera hasta la entrada a la turbina se producen unas pérdidas estimadas de un 5% de presión y una pérdida de temperatura de 5 °C. Se tiene vapor sobrecalentado, y realizando el mismo procedimiento del punto 1, obtenemos los demás valores.

T1' [°C]	405
P1' [bar]	38
$h1' \left[\frac{Kj}{Kg} \right]$	3229,6
$s1' \left[\frac{Kj}{Kg \cdot K} \right]$	6,8200
$v1' \left[\frac{m^3}{Kg} \right]$	0,08190

Punto 2s. Extracción isentrópica de la turbina.

Proceso isentrópico entre 1' y 2s, por lo que sus entropías son iguales. La temperatura de este punto es la de alimentación a la caldera más el incremento por el intercambiador de 5°C.

$$T_{2s} = 140^{\circ}\text{C} + 5^{\circ}\text{C} = 145^{\circ}\text{C}$$

$$S_{2s} = S_{1'} = 6,8200 \frac{Kj}{Kg \cdot K}$$

$$P_{2s} = 4,15 \text{ bar}$$

Debido a estas condiciones, el fluido se encuentra dentro de la curva de saturación por lo que podemos calcular el título:

$$X = \frac{S_{2s} - S_{2sf}}{S_{2sg} - S_{2sf}} = \frac{6,82 - 1,791}{6,884 - 1,791} = 0,9874$$

Conocido el título, se puede calcular el resto de variables de la extracción isentrópica:

$$h_{2s} = h_{2sf} + x \cdot (h_{2sg} - h_{2sf}) = 610,64 + 0,9874 \cdot (2739,81 - 610,64) = 2713 \frac{Kj}{Kg}$$

$$v_{2s} = v_{2sf} + x \cdot (v_{2sg} - v_{2sf}) = 1,0851 + 0,9874 \cdot (446,12 - 1,0851) = 0,4408 \frac{m^3}{Kg}$$

T _{2s} [°C]	145
P _{2s} [bar]	4,15
h _{2s} [$\frac{Kj}{Kg}$]	2713
s _{2s} [$\frac{Kj}{Kg \cdot K}$]	6,8200
v _{2s} [$\frac{m^3}{Kg}$]	0,4408

Punto 2. Extracción real de la turbina.

En la extracción real se tiene vapor sobrecalentado, el rendimiento de la turbina es de $\eta_{T_{ext}} = 0,90$. La presión de este punto es la del punto teórico (isentrópico). El resto de variables se pueden calcular con estos datos:

$$P2 = P2s = 4,15 \text{ bar}$$

$$\eta_{T_ext} = \frac{h1' - h2}{h1' - h2s} \rightarrow h2 = h1' - (h1' - h2s) \cdot \eta_{T_ext} = 2764,64 \frac{Kj}{Kg}$$

T2 [°C]	156,03
P2 [bar]	4,15
h2 [$\frac{Kj}{Kg}$]	2764,64
s2 [$\frac{Kj}{Kg \cdot K}$]	6,9409
v2 [$\frac{m^3}{Kg}$]	0,4600

Punto 3s. Salida isoentrópica de la turbina.

La presión a la salida de la turbina es de 0,2 bar, que corresponde con una temperatura de líquido saturado de T3s= 60,06 °C. Sabiendo que S3s = S2 = 6,9409 $\frac{Kj}{Kg \cdot K}$, se calcula el título y el resto de las variables:

$$X = \frac{S3s - S3sf}{S3sg - S3sf} = \frac{6,9409 - 0,83202}{7,9072 - 0,83202} = 0,8634$$

T3s [°C]	60,06
P3s [bar]	0,2
h3s [$\frac{Kj}{Kg}$]	2286,9
s3s [$\frac{Kj}{Kg \cdot K}$]	6,9409
v3s [$\frac{m^3}{Kg}$]	6,60337

Punto 3. Salida real de la turbina.

Se conoce que $P_3 = P_{3s} = 0,2$ bar, se considera un título de $X_3=0,9$ y se calcula el resto de las variables:

T_3 [°C]	60,06
P_3 [bar]	0,2
h_3 [$\frac{Kj}{Kg}$]	2373,15
s_3 [$\frac{Kj}{Kg \cdot K}$]	7,2000
v_3 [$\frac{m^3}{Kg}$]	6,8832

El rendimiento (η_T) de la segunda extracción (salida de la turbina) se calcula a partir de estos datos:

$$\eta_T = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_{3s}} = \frac{2764,64 - 2373,153}{2764,64 - 2286,86} = 0,82$$

Punto4. Salida del aerocondensador.

En este punto, el líquido se encuentra a la misma temperatura y presión que a la entrada del aerocondensador pero en condiciones de líquido saturado:

T4 [°C]	60,06
P4 [bar]	0,2
h4 [$\frac{Kj}{Kg}$]	251,42
s4 [$\frac{Kj}{Kg \cdot K}$]	0,8320
v4 [$\frac{m^3}{Kg}$]	0,00102

Punto 5. Entrada al pre calentador.

En este punto, las condiciones de entrada del precalentador serán las de líquido comprimido.

A partir de la diferencia de presiones entre la entrada y salida de la bomba se puede calcular el trabajo (W_{bomba_1}) realizado por la misma:

$$W_{bomba_1} = v \cdot dp = v_4 \cdot (P_5 - P_4)$$

$$W_{bomba_1} = 0,401 \frac{Kj}{Kg}$$

Conocido el trabajo realizado por la bomba y el rendimiento de la misma se puede obtener el salto entálpico:

$$\eta_{bomba_1} = \frac{W_{bomba_1}}{h_5 - h_4} \rightarrow h_5 = \frac{W_{bomba_1}}{\eta_{bomba_1}} + h_4 \rightarrow h_5 = 251,95 \frac{Kj}{Kg}$$

T5 [°C]	60,06
P5 [bar]	4,15
$h_5 \left[\frac{Kj}{Kg} \right]$	251,95
$s_5 \left[\frac{Kj}{Kg \cdot K} \right]$	0,8320
$v_5 \left[\frac{m^3}{Kg} \right]$	0,00102

Punto 6. Salida del precalentador.

Las condiciones de salida del precalentador vienen determinadas por las condiciones de diseño, el agua de alimentación de la caldera se encuentra a una temperatura de T6=140°C.

T6 [°C]	140
P6 [bar]	4,15
$h_6 \left[\frac{Kj}{Kg} \right]$	610,64
$s_6 \left[\frac{Kj}{Kg \cdot K} \right]$	1,7910
$v_6 \left[\frac{m^3}{Kg} \right]$	0,00109

Punto 7. Entrada a la caldera.

En este punto se tiene líquido comprimido siendo la presión de diseño de P8= 40 bar.

A partir de la diferencia de presiones entre la entrada y salida de la bomba2 se puede calcular el trabajo realizado por la misma:

$$W_{bomba_2} = v \cdot dp = v_4 \cdot (P_7 - P_6)$$

$$W_{bomba_2} = 3,89 \frac{Kj}{Kg}$$

Conocido el trabajo realizado por la bomba2 y el rendimiento de la misma se puede obtener el salto entálpico:

$$\eta_{bomba_2} = \frac{W_{bomba_2}}{h_7 - h_6} \rightarrow h_7 = \frac{W_{bomba_2}}{\eta_{bomba_2}} + h_6 \rightarrow h_7 = 615,82 \frac{Kj}{Kg}$$

T7 [°C]	140
P7 [bar]	40
$h_7 \left[\frac{Kj}{Kg} \right]$	615,82
$s_7 \left[\frac{Kj}{Kg \cdot K} \right]$	1,7910
$v_7 \left[\frac{m^3}{Kg} \right]$	0,00109

A continuación, se muestra la Tabla 35. con los resultados obtenidos:

Tabla 35. Resumen de los puntos del ciclo de vapor.

Punto	Situación	T [°C]	P [bar]	h [KJ/Kg]	s [KJ/Kg·K]	v [m3/Kg]	Estado
1	Salida caldera	410,00	40,00	3237,80	6,8048	0,0747500	Vapor sobrecalentado
1'	Entrada turbina	405,00	38,00	3229,57	6,8200	0,0819000	Vapor sobrecalentado
2s	Extracción ideal	145,00	4,15	2712,98	6,8200	0,4408000	Líquido-Vapor
2	Extracción real	156,03	4,15	2764,64	6,9409	0,4600000	Vapor sobrecalentado
3s	Salida turbina ideal	60,06	0,20	2286,86	6,9409	6,6033700	Líquido-Vapor
3	Salida turbina real	60,06	0,20	2373,15	7,2000	6,8832000	Líquido-Vapor
4	Salida aerocondensador	60,06	0,20	251,42	0,8320	0,0010172	Líquido saturado
5	Entrada Precalentador	60,06	4,15	251,95	0,8320	0,0010172	Líquido comprimido
6	Salida Precalentador	140,00	4,15	610,64	1,7910	0,0010851	Líquido comprimido
7	Entrada caldera	140,00	40,00	615,82	1,7910	0,0010851	Líquido comprimido

Fuente: Los autores

Para conocer el caudal de vapor generado en el ciclo de vapor hay que aplicar la fórmula del rendimiento del conjunto horno-caldera.

El rendimiento es el cociente del salto entálpico, que sufre el vapor en la caldera entre la energía suministrada en el horno por la combustión de los residuos, de igual forma, el trabajo a la salida de la caldera dividido entre el trabajo a la entrada de la caldera:

$$\eta_{\text{Horno-Caldera}} = \frac{\dot{W}_{\text{salida_caldera}}}{\dot{W}_{\text{entrada_caldera}}} = \frac{\dot{m}_{\text{vapor}} \cdot (h_1 - h_7)}{\dot{m}_{\text{RSU}} * PCI + W_{\text{aire_primario}} + W_{\text{aire_secundario}}}$$

Ecuación 5. Rendimiento horno-caldera [25]

Despejando el caudal de vapor (\dot{m}_{vapor}) generado, se obtiene:

$$\dot{m}_{\text{vapor}} = \frac{\eta_{\text{Horno-Caldera}} * (\dot{m}_{\text{RSU}} * PCI + W_{\text{aire_primario}} + W_{\text{aire_secundario}})}{(h_1 - h_7)}$$

De donde:

- El rendimiento del horno-caldera ($\eta_{\text{Horno-caldera}}$) se calcula más adelante, (en el balance energético), donde se obtiene un valor de 79,48 %.
- $\dot{m}_{RSU} = 37\,480 \frac{\text{Kg}}{\text{h}}$
- $P.C.I. = 2\,242,13 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}}$
- $W_{\text{aire_primario}} = 945,80 \text{ KW}$
- $W_{\text{aire_secundario}} = 7\,56,64 \text{ KW}$

A partir de estos datos, se calcula el caudal de vapor total del ciclo de vapor:

$$\dot{m}_{\text{vapor}} = \frac{0,7948 * [(37480 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} * 2241,13 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}} * 4,1863 \frac{\text{KJ}}{\text{Kcal}} * \frac{1\text{h}}{3600}) + 945,8\text{KW} + 756,64\text{KW}]}{(3237,8 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} - 615,82 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}})}$$

$$\dot{m}_{\text{vapor}} = 30.124 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} = 108\,445,74 \frac{\text{Kg}}{\text{h}}$$

Para comprobar este valor, existe otra forma de calcular este caudal:

$$\dot{m}_{\text{vapor}} = \frac{W_{\text{horno-caldera}}}{(h1 - h7)}$$

Siendo,

$$W_{\text{horno-caldera}} = W_{\text{suministrada}} - W_{\text{perd_horno-caldera}}$$

$$W_{\text{horno-caldera}} = 99400 \text{ KW} - 20402,75 \text{ KW} = 78\,997,25 \text{ KW}$$

Por tanto:

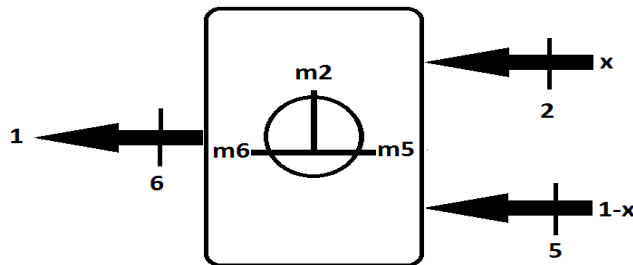
$$\dot{m}_{Vapor} = \frac{78997,25 \text{ KW}}{(3237,8 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} - 615,82 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}})} * \frac{3600 \text{ s}}{1h} = 108\ 463,87 \frac{\text{Kg}}{h}$$

Como se puede observar, los dos resultados son muy similares con un margen de error de 0,017%.

5.4.5 Caudal de extracciones del ciclo de vapor. Para calcular el valor del caudal de la extracción del ciclo de vapor será necesario plantear el balance de masa en el pre-calentador.

Un pre-calentador es un intercambiador de calor abierto agua/vapor, que calentará el agua de alimentación de la caldera que proviene de la extracción de la turbina (\dot{m}_2) hasta una temperatura de 140 °C. El proceso se supondrá adiabático por lo que se despreciarán las variaciones de energía cinética y potencial en estado estacionario, así como las pérdidas de energía por vapor. El esquema del pre-calentador se muestra a continuación en la Figura 16.

Figura 16. Esquema del pre-calentador



Fuente: Los autores

Balance másico:

$$\dot{m}_6 = \dot{m}_2 + \dot{m}_5$$

Balance energético:

$$[h_6 * 1] = [h_2 * x] + [h_5(1 - x)]$$

Despejando x de la ecuación:

$$x = \frac{h_6 - h_5}{h_2 - h_5} = \frac{610,64 - 251,95}{2764,64 - 251,95} = 0,14275$$

$$(1 - x) = (1 - 0,14275) = 0,85725$$

Conociendo el valor de “x”, obtenemos los caudales másicos en el pre-calentador:

$$\dot{m}_6 = \dot{m}_{vapor} = 108\,445,74 \frac{Kg}{h}$$

$$\dot{m}_2 = [x * \dot{m}_{vapor}] = 15\,480,63 \frac{Kg}{h}$$

$$\dot{m}_5 = [(1 - x) * \dot{m}_{vapor}] = 92\,965,11 \frac{Kg}{h}$$

En la Tabla 36., se muestra el caudal de vapor generado y los caudales másicos en el pre-calentador.

Tabla 36. Caudales másicos del ciclo vapor.

	Residuos en masa	Residuos con propiedades de Biotransformación
\dot{m}_{vapor} [Kg/h]	108 445,74	35 535,10
\dot{m}_6 [Kg/h]	108 445,74	35 535,10
\dot{m}_2 [Kg/h]	15 480,63	5 072,63
\dot{m}_5 [Kg/h]	92 965,11	30 462,46

Fuente: Los autores.

5.4.6 Potencia en la turbina. La potencia en la turbina está dada por la expresión:

$$P_{turbina} = [\dot{m}_1 \cdot (h_1 - h_2) + (\dot{m}_1 - \dot{m}_2) \cdot (h_2 - h_3)]$$

Ecuación 6. Potencia turbina [25]

Con los datos calculados anteriormente para las entalpías y las masas, y sabiendo que $m_1=m_6$.

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_6 = 108\,445,74 \frac{Kg}{h}$$

$$P_T = 108445,74 \frac{Kg}{h} \cdot \frac{1h}{3600s} * [(3237,8 - 2764,64) + (1 - 0,14275) \cdot (2764,64 - 2373,15)] \frac{KJ}{Kg}$$

$$P_{turbina} = 24\,363,08\,KW = 24,36\,MW$$

Con este valor, se puede calcular la eficiencia eléctrica, tomando el valor de la energía generada que es calculada en el apartado 5.5.3 del balance de energía.

$$W_{generada} = 23,09\,MW$$

$$\eta_{eléctrica} = \frac{W_{generada}}{P_{turbina}} = \frac{23,09\,MW}{24,36\,MW} = 0,9478$$

Por tanto, la turbina tiene una eficiencia mecánica de aproximadamente 95 %.

En la Tabla 37., se muestra la potencia y la eficiencia mecánica obtenidas en la turbina para los residuos en masa y con propiedades de Biotransformación.

Tabla 37. Potencia en la turbina.

	Residuos en masa	Residuos con propiedades de Biotransformación
$P_{turbina}$ [MW]	24,36	7,99
η mecánica [%]	95	78

Fuente: Los autores.

5.5 BALANCE DE POTENCIAS.

El balance de potencias se realiza con el objetivo de conocer la potencia que pueden generar los residuos, al ser sometidos a un proceso térmico de recuperación energética. La metodología utilizada, en esta parte del capítulo, para identificar la potencia que suministran los residuos así como la disipada durante todo el proceso, fue basada en proyectos realizados en la Universidad Pontificia Comillas de España, en donde los porcentajes de potencia que se disipa durante todo el proceso son valores teóricos y basados en estudios realizados. [29]

Estos porcentajes pueden variar respecto a los que se obtiene en la práctica, pero sirven de orientación en esta parte.

5.5.1 Potencia suministrada. La potencia suministrada, es la aportada por la incineración de los residuos así como la aportada por el aire empleado en dicha combustión.

- **Potencia aportada por el combustible (W_{RSU})**

En la incineración, se produce la transformación de energía química en energía calorífica, de la siguiente forma:

$$W_{RSU} = PCI * Capacidad_de_RSU * 4,1863 \frac{KJ}{Kcal} * \frac{1h}{3600 seg}$$

$$W_{RSU} = 2\,241,13 \frac{Kcal}{Kg} * 37\,480 \frac{Kg}{h} * 4,1863 \frac{KJ}{Kcal} * \frac{1h}{3600 seg} = 97\,677,5 KW$$

$$W_{RSU} = 97,68 MW$$

- **Potencia suministrada por el aire primario ($W_{aire_primario}$)**

El aire primario de combustión es la cantidad de aire necesaria para llevar a cabo la combustión estequiometria.

La cantidad de aire húmedo a introducir en la cámara de combustión se calculó con anterioridad:

$$m_{aire_húmedo} = 6,507 \frac{Kg_{aire_húmedo}}{Kg_{RSU}} \rightarrow m_{aire_estequiometrico} = \frac{6,507}{1,8} = 3,615 \frac{Kg}{Kg_{RSU}}$$

El aire primario entra al horno de incineración a una temperatura de 25 °C. La entalpía del aire a esa temperatura es 25,13 KJ / Kg.

$$W_{aire_primario} = m_{aire_primario} * h_{aire_primario}$$

$$W_{aire_primario} = 3,615 \frac{Kg}{Kg_{RSU}} * 37480 \frac{Kg}{h} * \frac{1h}{3600} * 25,13 \frac{KJ}{Kg} = 945,8 KW$$

- **Potencia suministrada por el aire secundario ($W_{aire_secundario}$)**

El aire secundario es el aire en exceso inyectado en el horno de incineración, la energía suministrada por el mismo será:

$$\begin{aligned} m_{aire_húmedo} &= 6,507 \frac{Kg_{aire_húmedo}}{Kg_{RSU}} \rightarrow m_{aire_estequiometrico} = \frac{6,507}{1,8} * 0,8 \\ &= 2,892 \frac{Kg}{Kg_{RSU}} \end{aligned}$$

El aire secundario entra al horno de incineración a una temperatura de 25 °C. La entalpía del aire a esa temperatura es 25,13 KJ / Kg.

$$W_{aire_segundario} = m_{aire_segundario} * h_{aire_segundario}$$

$$W_{aire_segundario} = 2,892 \frac{Kg}{Kg_{RSU}} * 37480 \frac{Kg}{h} * \frac{1h}{3600} * 25,13 \frac{KJ}{Kg} = 756,64 KW$$

LA POTENCIA TOTAL SUMINISTRADA ($W_{suministrada}$):

$$W_{suministrada} = W_{RSU} + W_{aire_primario} + W_{aire_segundario}$$

$$W_{suministrada} = 97,68 + 0,94 + 0,76 = 99,4 MW$$

5.5.2 Potencia disipada. Se calcula a continuación la potencia disipada en el conjunto horno – caldera y en el resto de los dispositivos del ciclo de vapor para evaluar de esta forma los rendimientos.

5.5.2.1 Potencia disipada en el horno-caldera.

- **Potencia disipada por inquemados ($W_{inquemados}$).**

Se estima que la potencia disipada por inquemados es del (1,2%) de la potencia total suministrada:

$$W_{inquemados} = 99400 KW * (1,2\%) = 1 192,8 KW$$

- **Potencia disipada por escorias y cenizas ($W_{escorias\ y\ cenizas}$).**

Se estima que la potencia disipada por escorias y cenizas es del (1,5%) de la potencia total suministrada:

$$W_{\text{escorias y cenizas}} = 99400 \text{ KW} * (1,5\%) = 1491 \text{ KW}$$

- **Potencia disipada por radiación ($W_{\text{radiación}}$).**

Se estima que la potencia disipada por radiación es del (1%) de la potencia total suministrada:

$$W_{\text{radiación}} = 99400 \text{ KW} * (1\%) = 994 \text{ KW}$$

- **Potencia disipada por los gases de escape ($W_{\text{gases_escape}}$).**

Para estos cálculos se considera que no se pierde potencia desde que los gases salen del horno hasta que entran en la caldera, considerado un aislamiento perfecto.

Los cálculos dependen de la composición de los gases de escape en cada momento. La composición de los residuos que llegan al relleno sanitario es variable, así como las condiciones ambiente y de humedad por tanto también lo será la de los gases de escape después de la combustión.

El calor específico de los gases de escape varía con la presión y la temperatura, pero se despreciará esta variación para el cálculo de la energía disipada en los gases de escape por ser los cálculos meramente orientativos para una composición de residuos concreta. Se toma como valor aproximado, para el calor específico (C_p) el correspondiente a 1 atm y 25 °C. [28]

La temperatura de los gases a la salida de la caldera será de 220°C y la temperatura ambiente de 23 °C.

El salto de entalpia, se calcula multiplicando el calor especifico por la diferencia entre la temperatura de la salida de la caldera y la temperatura ambiente ($C_p \cdot \Delta T$). La potencia disipada por los gases de escape es el producto entre el salto entálpico y el caudal.

En la Tabla 38., se muestra un resumen de los valores de calor específico, salto entálpico, caudal y energía disipada de los gases de combustión.

Tabla 38. Energía disipada en los gases de escape

Compuesto	Cp [KJ/Kg·K]	Salto entalpico [KJ/Kg]	Caudal [Kg/s]	Energía disipada [KW]
CO ₂	0,8452	166,5044	10,27264	1 710,44
H ₂ O	1,8673	367,8581	8,50796	3 129,72
SO ₂	0,6234	122,8098	0,02082	2,56
N ₂	1,0414	205,1558	51,30491	10 525,50
O ₂	0,9198	181,2006	0,01458	2,64
HCL	0,9940	195,8180	6,91506	1 354,09
				16 724,95

Fuente: Los autores

Con esto se obtiene una potencia total de los gases de escape de: 16724,95 KW.

$$W_{gases_escape} = 16\,724,95\text{ KW}$$

LA POTENCIA TOTAL DISIPADA EN EL HORNO-CALDERA
($W_{perd_horno-caldera}$):

$$W_{perd_horno} = 1\,192,8\text{KW} + 1\,491\text{KW} + 994\text{KW} + 16\,724,95\text{KW} = 20\,402,75\text{KW}$$

$$W_{perd_horno-caldera} = 20,4\text{ MW}$$

5.5.2.2 POTENCIA DISIPADA EN EL CICLO DE VAPOR.

- **Potencia disipada por purgas (W_{purgas}).**

Se estima que la potencia disipada por purgas es del (0,3%) de la potencia total suministrada:

$$W_{purgas} = 99\,400\text{ KW} * (0,3\%) = 298,2\text{ KW}$$

- **Potencia disipada por pérdidas auxiliares de vapor (W_{perd_aux}).**

Se estima que la potencia disipada por pérdidas auxiliares de vapor es del (0,95%) de la potencia total suministrada:

$$W_{perd_aux} = 99\,400\text{ KW} * (0,95\%) = 944,3\text{ KW}$$

- **Potencia disipada por pérdidas mecánicas del conjunto turbina-alternador ($W_{perd_mecánicas}$).**

Se estima que la potencia disipada por pérdidas mecánicas es del (1%) de la potencia total suministrada:

$$W_{\text{perd_mecánicas}} = 99\,400 \text{ KW} * (1\%) = 994 \text{ KW}$$

- **Potencia disipada por pérdidas en el condensador ($W_{\text{perd_condensador}}$).**

Se estima que la potencia disipada por pérdidas en el condensador es del (54%) de la potencia total suministrada:

$$W_{\text{perd_condensador}} = 99\,400 \text{ KW} * (54\%) = 53\,676 \text{ KW}$$

LA POTENCIA TOTAL DISIPADA EN EL CICLO DE VAPOR ($W_{\text{perd_ciclo_vapor}}$).

$$W_{\text{perd_ciclo_vapor}} = 298,2\text{KW} + 944,3\text{KW} + 994\text{KW} + 53\,676\text{KW} = 55\,912,5\text{KW}$$

$$W_{\text{perd_ciclo_vapor}} = 55,91 \text{ MW}$$

POTENCIA TOTAL DISIPADA (W_{disipada}).

La potencia total disipada es la suma de las pérdidas en el conjunto horno-caldera y las pérdidas en el ciclo de vapor.

$$W_{\text{disipada}} = W_{\text{perd_horno-caldera}} + W_{\text{perd_ciclo_vapor}}$$

$$W_{\text{disipada}} = 20,4 \text{ MW} + 55,91 \text{ MW} = 76,31 \text{ MW}$$

5.5.3 Potencia generada en el sistema. La potencia generada (W_{generada}) en el sistema será la potencia suministrada ($W_{\text{suministrada}}$), menos la potencia disipada

($W_{disipada}$), tanto en el sistema horno-cadera como en el ciclo de vapor. De este modo obtenemos una potencia de:

$$W_{generada} = W_{suministrada} - W_{disipada}$$
$$W_{generada} = 99,4 \text{ MW} - 76,31 \text{ MW} = 23,09 \text{ MW}$$

5.5.4 Potencia de auto consumo. Se destinará un 15% de la potencia generada en el sistema para el autoconsumo ($W_{auto_consumo}$).

$$W_{auto_consumo} = W_{generada} * (15\%)$$
$$W_{auto_consumo} = 23,09 \text{ MW} * (15\%) = 3,46 \text{ MW}$$

5.5.5 Potencia entregada a la red. La potencia que será entregada a la red (W_{red}) por medio de la subestación será la que queda después de restarle el auto consumo a la potencia generada.

$$W_{red} = W_{generada} - W_{auto_consumo}$$
$$W_{red} = 23,09 \text{ MW} - 3,46 \text{ MW} = 19,63 \text{ MW}$$

5.5.6 Tabla de balance de potencias. En la Tabla 39., se muestra un resumen con todos los valores de las potencias calculadas en el balance de potencias.

Tabla 39. Balance de potencia.

	Residuos en masa	Residuos con propiedades de Biotransformación
W_{RSU} [KW]	97 667,49	34 237,66
$W_{aire_primario}$ [KW]	945,80	391,36
$W_{aire_secundario}$ [KW]	756,64	313,09
$W_{suministrada}$ [KW]	99 379,92	34 942,12
$W_{suministrada}$ [MW]	99,40	34,94
$W_{inquemados}$ [KW]	1 192,80	419,28
$W_{escorias_cenizas}$ [KW]	1 491	524,1
$W_{radiación}$ [KW]	994	349,4
$W_{gases_de_escape}$ [KW]	16 724,95	7 757,46
$W_{perd_horno-caldera}$ [KW]	20 402,75	9 050,24
$W_{perd_horno_caldera}$ [MW]	20,40	9,05
W_{purgas} [KW]	298,2	104,82
$W_{perd_auxiliares_de_vapor}$ [KW]	944,3	331,93
$W_{perd_mecánicas}$ [KW]	994	349,4
$W_{perd_condensador}$ [KW]	53 676	18 867,6
$W_{perd_ciclo_vapor}$ [KW]	55 912,5	19 653,75
$W_{perd_ciclo_vapor}$ [MW]	55,91	19,65
$W_{disipada}$ [MW]	76,31	28,7
$W_{generada}$ [MW]	23,09	6,24
$W_{autoconsumo}$ [MW]	3,46	0,94
W_{red} [MW]	19,63	5,30

Fuente: Los autores.

5.6 RENDIMIENTOS DEL SISTEMA.

Se calcula el rendimiento en cada etapa del proceso para identificar en que zonas se disipa más potencia, y si estos valores están cercanos a los teóricos.

5.6.1 Rendimientos del conjunto horno-caldera. El rendimiento del conjunto horno – caldera se calcula como el cociente entre la potencia que sale del horno y la que entra al mismo.

$$\eta_{\text{Horno-Caldera}} = \frac{W_{\text{suministrada}} - W_{\text{perd_horno-caldera}}}{W_{\text{suministrada}}}$$

$$\eta_{\text{Horno-Caldera}} = \frac{99,40 \text{ MW} - 20,40 \text{ MW}}{99,40 \text{ MW}} = 79.48 \%$$

5.6.2 Rendimiento de la incineración. El rendimiento de la incineración de los RSU se calcula como el cociente entre la potencia generada y la potencia suministrada.

$$\eta_{\text{Incineración}} = \frac{W_{\text{generada}}}{W_{\text{suministrada}}}$$

$$\eta_{\text{Incineración}} = \frac{23,09 \text{ MW}}{99,40 \text{ MW}} = 23.23 \%$$

5.6.3 Rendimiento total del ciclo de vapor. El rendimiento total del ciclo se define como el cociente entre la potencia entregada a la red y la potencia suministrada por la incineración de los residuos.

$$\eta_{Total} = \frac{W_{red}}{W_{suministrada}}$$

$$\eta_{Total} = \frac{19,63 \text{ MW}}{99,40 \text{ MW}} = 19.74 \%$$

5.6.4 Tabla de rendimientos del sistema. A continuación, se muestra en la Tabla 40 un resumen con los rendimientos del sistema:

Tabla 40. Rendimientos del sistema.

	Residuos en masa	Residuos con propiedades de Biotransformación
η horno-Caldera [%]	79,48	74,10
η Incineración [%]	23,23	17,86
η Total [%]	19,74	15,18

Fuente: Los autores

5.7 CÁLCULOS PARA GENERAR 1MW.

En esta parte del capítulo de cálculos, se pretende pre-dimensionar un ciclo agua/vapor con el que se pueda generar una potencia eléctrica de 1 MW, cumpliendo con los objetivos del proyecto y obteniendo datos que puedan servir de

referencia para posteriores estudios que se realicen en el relleno sanitario “El Carrasco”, con propósito de aprovechar el potencial energético de los R.S.U. que ingresan diariamente en este relleno.

5.7.1 Turbina para el ciclo vapor. Todo se calcula para que el vapor llegue a la turbina en las condiciones de presión y temperatura idóneas para el tipo de turbina seleccionada.

Se pretende generar 1MW de potencia, por lo tanto, se debe escoger una turbina con la se garantice esta potencia. La turbina seleccionada es una turbina de vapor siemens SST-100. Las características técnicas se muestran en la Tabla 41.

Tabla 41. Características técnicas de la turbina Siemens SST-100

Datos Técnicos [Turbina SST-100]	
Potencia de salida	hasta 8.5 MW
Velocidad rotacional	hasta 7,500 rpm
Presión de entrada del vapor	hasta 65 bar / 945 psi
Temperatura de entrada del vapor	480°C / 895°F
Presión de escape	Contrapresión: hasta 10 bar / 145 psi; Condensación: hasta 1 bar / 14.5 psi
Área de escape	0.22 m ² / 2.4 sq.ft

Fuente: Adaptado [30]

Como se observa en las características técnicas de la turbina seleccionada, los datos máximos de presión y temperatura que soporta esta turbina cumplen con las condiciones del ciclo vapor diseñado anteriormente.

El vapor que llega a la turbina, está a una presión de 40 bar, y a una temperatura de 410°C. Y se utilizarán los valores de cada punto del ciclo vapor mostrado en la Tabla 35.

5.7.2 Caudal de vapor en la turbina. Para calcular el caudal de vapor generado del ciclo vapor, es necesario conocer la potencia en la turbina.

Como la potencia que se quiere generada es de 1MW y suponiendo una eficiencia mecánica de la turbina es de 95 %.

$$\eta_{Turbina} = \frac{P_{Generada}}{P_{Turbina}} * 100$$

$$P_{Turbina} = \frac{1000 \text{ KW}}{95} * 100 = 1\ 053 \text{ KW}$$

Con los caudales de las extracciones de la turbina calculados en el pre-calentador, y con el valor de la potencia en la turbina, se puede calcular el caudal de vapor en la turbina mediante la siguiente expresión:

$$P_{turbina} = [\dot{m}_1 \cdot (h_1 - h_2) + (\dot{m}_1 - \dot{m}_2) \cdot (h_2 - h_3)]$$

$$P_{turbina} = \dot{m}_{vapor} \cdot \frac{1h}{3600} [(h_1 - h_2) + (1 - x) \cdot (h_2 - h_3)]$$

$$\dot{m}_{vapor} = \frac{P_{turbina}}{\frac{1h}{3600} [(h_1 - h_2) + (1 - x) \cdot (h_2 - h_3)]}$$

$$\dot{m}_{vapor} = 4\ 687,15 \frac{Kg}{h}$$

Conociendo el valor de \dot{m}_{vapor} , obtenemos los caudales máxicos en el pre-calentador:

$$\dot{m}_6 = \dot{m}_1 = \dot{m}_{vapor} = 4\,687,15 \frac{Kg}{h}$$

$$\dot{m}_2 = [x * \dot{m}_{vapor}] = 669,09 \frac{Kg}{h}$$

$$\dot{m}_5 = \dot{m}_3 = [(1 - x) * \dot{m}_{vapor}] = 4\,018,06 \frac{Kg}{h}$$

5.7.3 Cantidad de R.S.U. necesarios para generar 1MW. La cantidad de R.S.U. que se necesitaran como combustible en el horno de incineración para generar 1 MW de potencia, se calculara mediante la Ecuación 5. Rendimiento horno-caldera.

$$\eta_{Horno-Caldera} = \frac{\dot{W}_{salida_caldera}}{\dot{W}_{entrada_caldera}} = \frac{\dot{m}_{vapor} \cdot (h1 - h7)}{\dot{m}_{RSU} * PCI + W_{aire_primario} + W_{aire_secundario}}$$

$$m_{RSU} = \frac{\dot{m}_{vapor} \cdot (h1 - h7)}{\eta_{Horno-Caldera} \cdot [PCI + (m_{aire_estequiometrico} \cdot h(25^{\circ}C) * (1 + 0,8))]}$$

Se estima que el rendimiento del conjunto horno-caldera será de 80% por tanto:

$$m_{RSU} = 1\,609,34 \frac{Kg}{h}$$

De este modo para generar 1 MW de potencia se necesitarán $1\,609,34 \frac{Kg}{h}$ de residuos en masa.

5.7.4 Flujo másico y volumen total de los gases emitidos. El flujo másico de los gases emitidos en base húmeda será de:

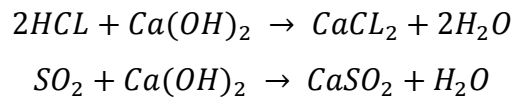
$$m_{gases} = 7,3994 \frac{Kg}{Kg_{RSU}} * 1\,609,34 \frac{Kg}{h} = 1\,1910 \frac{Kg}{h}$$

El volumen total de los gases emitidos en base húmeda es de $5,9280 \frac{Nm^3}{Kg\ RSU}$, por lo que el caudal a la hora será:

$$V_{gases} = 5,9280 \frac{Nm^3}{Kg\ RSU} * 1\ 609,34 \frac{Kg}{h} = 9\ 540 \frac{Nm^3}{h}$$

5.7.5 Neutralización de gases ácidos. Para el tratamiento y eliminación de los gases procedentes de la combustión se utilizará hidróxido cálcico $Ca(OH)_2$ disuelto en agua, que se encargará de neutralizar ácidos tóxicos tales como el azufre y el cloro en el absorbedor. El procedimiento para obtener este compuesto será disolviendo cal viva (CaO) en agua.

Las reacciones químicas de neutralización que se producen son las siguientes:



Una parte del SO_2 se transforma en SO_3 durante el enfriamiento del gas pero esto es irrelevante para el cálculo ya que de todas formas se requiere la misma cantidad de hidróxido para neutralizarlo. La cantidad necesaria de hidrato cálcico vendrá determinada por la composición de los gases de combustión.

El contenido de los gases de combustión en HCL es de $0,0014 \frac{Kg\ HCL}{Kg\ RSU}$, por lo tanto tendremos:

$$0,0014 \frac{Kg\ HCL}{Kg\ RSU} * 1\ 609,34 \frac{Kg\ RSU}{h} * \frac{1\ Kmol}{36,45\ Kg\ HCL} = 0,061813 \frac{Kmol}{h}$$

El contenido de los gases de combustión en SO_2 es de $0,0020 \frac{Kg SO_2}{Kg RSU}$, por lo tanto tendremos:

$$0,0020 \frac{Kg SO_2}{Kg RSU} * 1\,609,34 \frac{Kg RSU}{h} * \frac{1 Kmole}{64 Kg SO_2} = 0,050292 \frac{Kmol}{h}$$

La masa molar del hidróxido de calcio es:

$$M_{Ca(OH)_2} = 40 + 2(1 + 16) = 74 \frac{Kg}{Kmol}$$

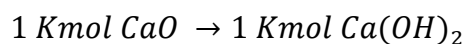
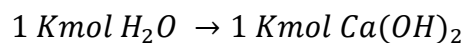
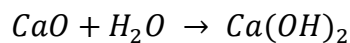
La cantidad de hidrato cálcico vendrá dada por:

$$\dot{m}_{Ca(OH)_2} = \left(\frac{1}{2} \dot{n}_{HCL} + \dot{n}_{SO_2} \right) * M_{Ca(OH)_2}$$

$$\dot{m}_{Ca(OH)_2} = \left(\frac{1}{2} * 0,061813 + 0,050292 \right) \frac{Kmol}{h} * 74 \frac{Kg}{Kmol} = 6,01 \frac{Kg}{h}$$

La cantidad anteriormente calculada es la estequiométrica necesaria. Sin embargo en la práctica, para asegurar que la reacción se produce de forma completa y se consigue la completa eliminación de las sustancias no deseadas, el hidrato cálcico suele pulverizarse con un exceso del 250%, por lo que el flujo másico será de $15,02 \frac{Kg}{h}$.

Como se mencionó anteriormente, el hidróxido cálcico se obtiene como resultado de disolver cal viva (CaO) en agua.



Por lo tanto, se puede concluir que los flujos de cal y agua que deben ser mezcladas serán:

$$\dot{m}_{CaO} = 15,02 \frac{Kg Ca(OH)_2}{h} * \frac{56 Kg CaO}{74 kg Ca(OH)_2} = 11,37 \frac{Kg CaO}{h}$$

$$\dot{m}_{H_2O} = 15,02 \frac{Kg Ca(OH)_2}{h} * \frac{18 Kg H_2O}{74 kg Ca(OH)_2} = 3,65 \frac{Kg H_2O}{h}$$

5.7.6 Diseño del horno de parrilla. El dimensionamiento del horno de parrilla estará condicionado por las limitaciones mecánicas y térmicas. Los datos de los que se parte son los siguientes:

- **PCI (poder calorífico inferior)**

$$PCI_{diseño} = 2\,241,13 \frac{Kcal}{Kg}$$

- **CARGA MECÁNICA**

$$Carga\ mecánica = CM = 1\,609,34 \frac{Kg}{h}$$

- **CARGA TÉRMICA**

$$P_{horno} = PCI * CM$$

$$P_{horno} = 2241,13 \frac{Kcal}{Kg} * 1609,34 \frac{Kg}{h} * 4,1868 \frac{KJ}{Kcal} * \frac{1 h}{3600 s} = 4\,194,64 KW$$

La parrilla será dimensionada de forma que pueda operar en un rango comprendido entre el 110 y el 60 % de la carga térmica de diseño para marcar un margen de seguridad ante posibles imprecisiones y garantizar el correcto funcionamiento. Por debajo de este valor, no se podrá operar el horno ya que el proceso de combustión no se realizará de forma adecuada. La carga mecánica oscilará igualmente entre el

rango definido anteriormente. El poder calorífico de los residuos varía dentro de unos límites ya que como hemos dicho el combustible es diferente dependiendo de diversos factores. Se considera que estos límites son $\pm 20\%$ del PCI de diseño [29]. Por lo tanto, los márgenes de operación del horno serán:

- **PCI**

$$PCI_{m\acute{a}ximo} = 2\,690 \frac{Kcal}{Kg}$$

$$PCI_{m\acute{in}imo} = 1\,793 \frac{Kcal}{Kg}$$

- **CARGA MECÁNICA**

$$Carga\ mec\acute{a}nica\ (m\acute{a}xima) = 1\,770 \frac{Kg}{h}$$

$$Carga\ mec\acute{a}nica\ (m\acute{in}ima) = 965,6 \frac{Kg}{h}$$

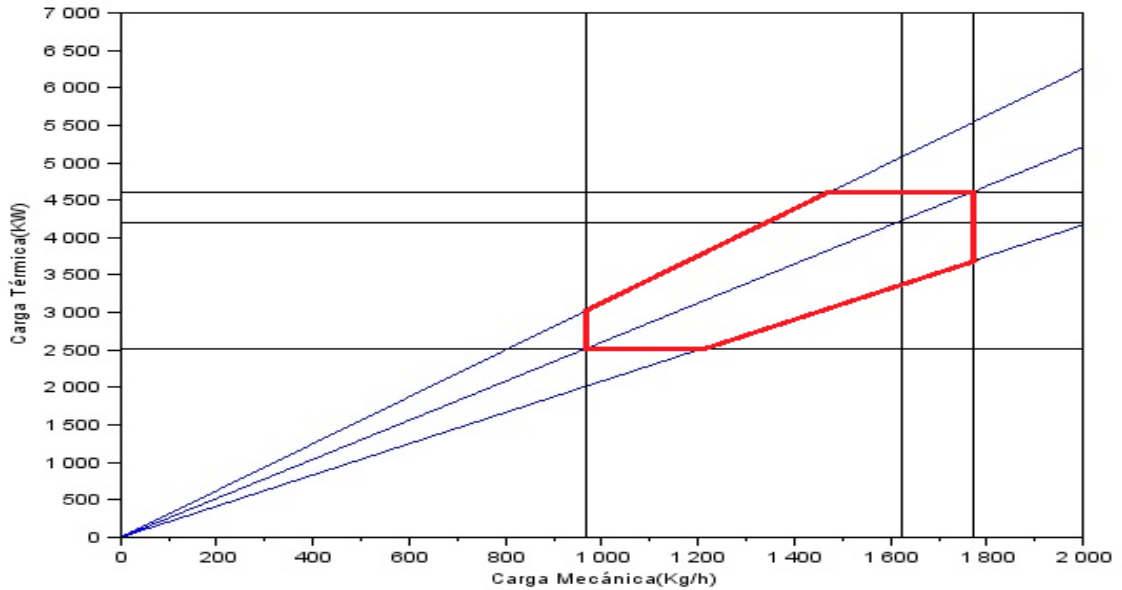
- **CARGA TÉRMICA**

$$P_{horno\ (m\acute{a}ximo)} = 4\,614\ KW$$

$$P_{horno\ (m\acute{in}imo)} = 2\,517\ KW$$

El diagrama de combustión define gráficamente, en función del PCI del residuo, los puntos de funcionamiento de la parrilla y la capacidad de incineración. En la Figura 17 se muestra el diagrama de combustión que se debe tener en cuenta en el diseño del horno.

Figura 17. Diagrama de combustión en la parrilla.



Fuente: Los autores.

La planta puede trabajar de forma perfecta en la línea de 4 190,64 KW, ya que es donde se obtiene el mejor rendimiento y dónde opera horas y días consecutivos. Al tomar una carga del 110%, 4 614,10 KW, o en la zona comprendida entre ambas la planta puede trabajar con un rendimiento algo mayor, pero no puede trabajar más de unas horas seguidas, pues puede traer problemas.

En cambio, si trabaja entre la carga nominal y la del 60%, 2 516,90 KW, la incineradora trabaja en perfectas condiciones, aunque con menor rendimiento.

5.7.7 Balance de potencia para 1MW. El balance de energía se realiza teniendo en cuenta las condiciones anteriormente mencionadas en el apartado 3.5 (Balance de potencia). Los datos que se deben tener en cuenta para el balance de energía son los mostrados en la Tabla 42.

Tabla 42. Datos preliminares balance de energía para 1MW.

	Residuos en masa
R.S.U [Kg/h]	1 609,34
PCI [Kcal/Kg]	2 241,13
m_airehum [Kg aire/Kg RSU]	6,507
h(25°C) [KJ/Kg]	25,13

Fuente: Los autores.

A continuación, se muestra en la Tabla 43., un resumen con todos los valores de las potencias calculadas en el balance de energías para una potencia generada de 1MW.

Tabla 43. Balance de potencia para 1MW.

	Residuos en masa
W_{RSU} [KW]	4 194,14
$W_{aire_primario}$ [KW]	40,61
$W_{aire_secundario}$ [KW]	32,49
$W_{suministrada}$ [KW]	4 267,24
$W_{suministrada}$ [MW]	4,27
$W_{inquemados}$ [KW]	51,21
$W_{escorias_cenizas}$ [KW]	64,01
$W_{radiación}$ [KW]	42,67
$W_{gases_de_escape}$ [KW]	718,15
$W_{perd_horno-caldera}$ [KW]	876,03
$W_{perd_horno_caldera}$ [MW]	0,88
W_{purgas} [KW]	12,80
$W_{perd_auxiliares_de_vapor}$ [KW]	40,54
$W_{perd_mecánicas}$ [KW]	42,67
$W_{perd_condensador}$ [KW]	2 304,31
$W_{perd_ciclo_vapor}$ [KW]	2 400,32
$W_{perd_ciclo_vapor}$ [MW]	2,40
$W_{disipada}$ [MW]	3,28
$W_{generada}$ [MW]	1,00
$W_{autoconsumo}$ [MW]	0,10
W_{red} [MW]	0,90

Fuente: Los autores.

5.7.8 Rendimientos del sistema para 1 MW. A continuación, se muestra en la tabla 44, un resumen con los rendimientos del sistema.

Tabla 44. Rendimientos del sistema para 1 MW.

	Residuos en masa
η horno-Caldera [%]	80,00
η Incineración [%]	23,22
η Total [%]	20,90

Fuente: Los autores.

6. EVALUACIÓN DEL PROYECTO USANDO EL SOFTWARE RETSCREEN.

Este capítulo documenta la información necesaria que se obtiene del capítulo 5, para realizar un estudio que contenga información sobre el potencial energético, las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y un análisis financiero de viabilidad que sirven de orientación para la toma de futuras decisiones referentes al relleno sanitario “El Carrasco”. Los valores mostrados en el programa están sujetos a modificaciones debido al error de precisión o interpretación de las variables, pero sirve como orientación en los distintos temas que son analizados con RETScreen.

6.1 RETScreen.

RETScreen es un software de análisis de proyectos de energía limpia que ayuda a la toma de decisiones en la identificación y evaluación de proyectos potenciales de manera rápida y económica, único en su género, desarrollada con la contribución de numerosos expertos del gobierno canadiense, industria, y académicos.

El software es gratuito y puede ser usado en todo el mundo para evaluar la producción de energía y ahorros, los costos del ciclo de vida, la reducción de emisiones, así como aspectos financieros y de riesgo de varios tipos de tecnologías de energía renovables y eficiencia energética. El software también incluye bases de datos de productos, costos y datos climáticos. Se incluye manual de usuario. [31]

6.1.1 Ventajas y desventajas.

Ventajas

- Requiere relativamente pocos datos de entrada
- Tiene gran cantidad de información climática, de equipos y componentes.
- Es muy sencillo a la hora de evaluar escenarios alternativos.
- Su fundamentación científica es sólida y está muy bien explicada en la documentación.
- Da buenos resultados en forma comparativa (es decir comparando el escenario A con el escenario B).
- Es rápido de comprender y aplicar.
- Existe un paquete de ayudas bien documentado (en inglés y francés).
- Es un software libre.

Desventajas

- No es un software de simulación. Por tal motivo los resultados están representados de forma anual y no global.
- No tiene las finezas de una simulación, ya que aplica métodos bien conocidos en Ingeniería.
- Como aún está en desarrollo, hay módulos que funcionan mejores que otros.

Una herramienta que permita simular, el comportamiento de ciertas variables en un proyecto, es muy ventajosa, cuando las etapas de diseño conceptual y básico están realizadas. Ya que permiten lograr un buen ajuste del diseño en detalle. RETScreen es una herramienta de diseño, que se puede utilizar en la etapa de diseño conceptual y diseño básico, pues permite escoger entre grandes soluciones desde el punto de vista conceptual o de detalle. [32]

6.2 INFORMACIÓN DEL PROYECTO.

En pantalla de inicio del programa RETScreen, se seleccionan los datos que definen el tipo de proyecto que será objeto de análisis. En la Figura 18, se muestra la información preliminar del proyecto.

En esta parte del programa, se selecciona el tipo de proyecto, como nuestro estudio está enfocado solamente a generación de energía eléctrica, escogimos “Generación de electricidad”, con turbina a vapor como tecnología, utilizando el método sugerido (Método 1) y el poder calorífico inferior (PCI) como referencia.

Figura 18. Información del proyecto.

Nombre del Proyecto	Generación de 1 MW
Ubicación del Proyecto	Bucaramanga
Preparado para	Proyecto UIS
Preparado por	Carlos Aguilar
Tipo de proyecto	Generación de electricidad
Tecnología	Turbina a Vapor
Tipo de red	Red-Central
Tipo de análisis	Método 1
Poder calorífico de referencia	Poder Calorífico Inferior (PCI)
Mostrar parámetros	<input checked="" type="checkbox"/>
Idioma	Spanish - Español
Manual de usuario	English - Anglais
Moneda	Colombia
Unidades	Unidades métricas

Fuente: Los autores (RETScreen)

El proyecto está orientado a tener una potencia instalada de 1 MW, dando a que según la UPME en la resolución 281 de 2015, resuelve en el artículo 1°. *“El límite máximo de potencia de la autogeneración a pequeña escala será de un (1) MW, y corresponderá a la capacidad instalada del sistema de generación del autogenerador”*. [33]

Como se mostró en el capítulo 5 de cálculos, el ciclo termodinámico elegido para la generación eléctrica es un ciclo Rankine, el cual está constituido por una turbina de vapor. De esta forma en RETScreen se seleccionó como tecnología una turbina a vapor.

Se ingresan datos básicos del proyecto. Metodología a aplicar. Si se usa poder calorífico superior o inferior como base del combustible. Se escoge el lugar y se cargan los datos climáticos. Recomendaciones: Usar método 1 y PCI. Si se visualizan datos, se pueden modificar.

6.3 CONDICIONES DE REFERENCIA DEL SITIO.

Las condiciones climatológicas donde se puedan aplicar los modelos para energías renovables, cogeneración, y la evaluación de medidas de eficiencia energética para edificios, residencias, y sector institucional, comercial o industrial, se deben tener en cuenta debido a que dichas condiciones afectan de forma directa variables trascendentes.

El programa de RETScreen versión 4, en su descripción cuenta con una base de datos climatológicos que incluye a 4700 estaciones meteorológicas y la integración de datos satelitales de la NASA dentro del mismo software que abarca un gran porcentaje de la totalidad de la superficie habitada sobre el planeta Tierra.

En el siguiente recuadro tomado del software, Figura 19, se muestra la opción para seleccionar la ubicación que proporciona los datos meteorológicos. La referencia más cercana que se encuentra disponible al punto de análisis, que es la ciudad de Bucaramanga, es el municipio de Piedecuesta.

Figura 19. Condiciones de referencia del sitio.



The screenshot shows a software interface titled "Condiciones de referencia del sitio" with a blue link "Seleccionar ubicación de datos meteorológicos". Below this, there is a label "Ubicación de datos meteorológicos" next to a text input field containing "Piedecuesta". At the bottom, there is a "Mostrar datos" button with a checked checkbox.

Fuentes: Los autores (RETSscreen)

Al pulsar "Seleccionar ubicación de datos meteorológicos" se puede encontrar una tabla que muestra información y fuente de donde se toman los datos mostrados. La Figura 20. Muestra, el recuadro que resulta cuando se ha seleccionado el municipio de Piedecuesta, Santander.

Figura 20. Variables climatológicas del lugar deseado.

País - Región: Colombia

Provin./Estado: n/a

Ubicación de datos meteorológicos: Piedecuesta

Latitud: °N 7,0

Longitud: °E -73,1

Elevación: m 1.118

Temperatura de diseño de la calefacción: °C 15,7

Temperatura de diseño del aire acondicionado: °C 26,5

Amplitud de la temperatura del suelo: °C 9,0

Fuente: NASA

	Temperatura del aire	Humedad relativa	Radiación solar diaria - horizontal	Presión atmosférica	Velocidad del Viento	Temperatura del suelo	Días-grado de calentamiento	Días-grado de enfriamiento
	°C	%	kWh/m²/d	kPa	m/s	°C	°C-d	°C-d
Ene	20,6	70,3%	5,33	87,8	1,8	21,9	0	330
Feb	21,7	65,2%	5,39	87,7	1,7	23,6	0	328
Mar	21,7	70,6%	5,36	87,7	1,6	23,6	0	363
Abr	21,4	77,1%	5,17	87,7	1,5	23,0	0	343
May	21,0	79,6%	5,25	87,8	1,5	22,1	0	342
Jun	20,9	75,6%	5,39	87,8	1,7	21,8	0	327
Jul	20,9	69,6%	5,72	87,9	1,7	22,0	0	339
Ago	21,3	67,3%	5,72	87,8	1,5	22,4	0	349
Sep	21,1	72,2%	5,63	87,8	1,4	22,3	0	332
Oct	20,4	80,5%	5,12	87,8	1,4	21,6	0	323
Nov	20,2	82,0%	4,99	87,7	1,4	21,2	0	306
Dic	20,1	78,2%	4,98	87,7	1,7	21,0	0	313
Anual	21,0	74,1%	5,34	87,8	1,6	22,2	0	3.995
Fuente	NASA	NASA	NASA	NASA	NASA	NASA	NASA	NASA

Medido a: m 10 0

Fuente: Los autores (RETScreen)

Los datos mostrados en la Figura 20, se introducen en el proyecto al pulsar el botón verde de aprobación. Estos datos influirán en los modelos establecidos, donde se requieran condiciones ambientales y geográficas de un determinado lugar, se resalta que muchos de esos datos pueden tener aproximaciones en las mediciones tomadas, pero son referencias confiables. En la Figura 21. se puede apreciar un recuadro que organiza los datos y los presenta de forma clara en el análisis a realizar.

Figura 21. Datos meteorológicos insertados por RETScreen.

	Ubicación de datos meteorológicos		Ubicación del Proyecto	
	Unidad			
Latitud	°N	7,0	7,0	
Longitud	°E	-73,1	-73,1	
Elevación	m	1.118	1.118	
Temperatura de diseño de la calefacción	°C	15,7		
Temperatura de diseño del aire acondicionado	°C	26,5		
Amplitud de la temperatura del suelo	°C	9,0		

Mes	Radiación solar							
	Temperatura del aire	Humedad relativa	diaria - horizontal	Presión atmosférica	Velocidad del Viento	Temperatura del suelo	Días-grado de calentamiento	Días-grado de enfriamiento
	°C	%	kWh/m²/d	kPa	m/s	°C	°C-d	°C-d
Enero	20,6	70,3%	5,33	87,8	1,8	21,9	0	330
Febrero	21,7	65,2%	5,39	87,7	1,7	23,6	0	328
Marzo	21,7	70,6%	5,36	87,7	1,6	23,6	0	363
Abril	21,4	77,1%	5,17	87,7	1,5	23,0	0	343
Mayo	21,0	79,6%	5,25	87,8	1,5	22,1	0	342
Junio	20,9	75,6%	5,39	87,8	1,7	21,8	0	327
Julio	20,9	69,6%	5,72	87,9	1,7	22,0	0	339
Agosto	21,3	67,3%	5,72	87,8	1,5	22,4	0	349
Setiembre	21,1	72,2%	5,63	87,8	1,4	22,3	0	332
Octubre	20,4	80,5%	5,12	87,8	1,4	21,6	0	323
Noviembre	20,2	82,0%	4,99	87,7	1,4	21,2	0	306
Diciembre	20,1	78,2%	4,98	87,7	1,7	21,0	0	313
Anual	20,9	74,1%	5,34	87,8	1,6	22,2	0	3.995
Medido a	m				10,0	0,0		

Fuentes: Los autores (RETScreen).

Como se puede apreciar en dicha figura, en el comienzo se aprecia información específica sobre la latitud, longitud, elevación, temperaturas para posible diseño de calefacción o para aire acondicionado, y la temperatura del suelo; datos que permiten la ubicación del proyecto.

Como complemento, se muestran unas mediciones mensuales sobre la temperatura del aire, húmeda relativa, radiación solar diaria horizontal, presión atmosférica, velocidad del viento, temperatura del suelo, días por grados de calentamiento y días por grado de enfriamiento; estas medidas se promedian de forma anual y se tomará cada una de acuerdo a las necesidades en algún proceso de análisis del caso de estudio.

6.4 SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DEL CASO PROPUESTO.

La hoja de Modelo de Energía adopta diferentes formas según el tipo de proyecto que estemos analizando. En la Figura 22, se muestra el modelo de energía proporcionado por RETScreen para nuestro caso de estudio.

Figura 22. Modelo de energía.

Proposed case power system			
Technology	Steam turbine		
Availability	%	100,0%	8.760 h
Fuel selection method	Single fuel		
Fuel type	Food waste		
Fuel rate	COP/t	0,000	
Steam turbine			
Steam flow	kg/h	4.687	
Operating pressure	bar	38	
Saturation temperature	°C	247	
Superheated temperature	°C	405	
Enthalpy	kJ/kg	3.237	
Entropy	kJ/kgK	6,83	
Extraction port		No	
Back pressure			
Temperature	°C	60	
Mixture quality		0,85	
Enthalpy	kJ/kg	2.250	
Theoretical steam rate (TSR)	kg/kWh	3,65	
Steam turbine (ST) efficiency	%	85,0%	
Actual steam rate (ASR)	kg/kWh	4,29	
Summary			
Power capacity	kW	1.093	
Minimum capacity	%	40,0%	
Manufacturer			
Model and capacity			
Electricity exported to grid	MWh	9.575	
Seasonal efficiency	%	80,0%	
Return temperature	°C	60	
Fuel required	GJ/h	17,5	
Heating capacity	kW	0,2	
Electricity export rate	COP/MWh	170.000,00	

Fuentes: Los autores (RETScreen).

La turbina a vapor funcionará de forma continua 24 horas diarias. Por tanto, la disponibilidad de la turbina será de 100% durante 8760 horas al año.

El tipo de combustible utilizado es Biomasa, que en este caso se trata de los residuos sólidos urbanos que son depositados diariamente en el relleno sanitario “El Carrasco”, por tal razón el precio de este combustible es cero.

Los datos técnicos de diseño para la operación de la turbina, son los mismos que se eligieron en el capítulo 3 de cálculos. Con estos datos se muestra que la capacidad de generación eléctrica es de 1 093 KW. Este valor es mayor al que se pretende generar en un 9,3 % lo que demuestra que bajo estas condiciones de diseño se pueden garantizar una potencia instalada de 1MW.

En el caso de la potencia mínima, es el límite de potencia con la que la turbina puede funcionar si presentar daños, según el paquete de ayudas que el software RETScreen ofrece, para turbinas de vapor este porcentaje se puede estimar en un 40%.

La eficiencia estacional, es dato muy importante para los sistemas de cogeneración de energía, en este caso solo se estudió la posibilidad de generación de energía eléctrica, por tal motivo este valor no es trascendental. En el paquete de ayudas que ofrece RETScreen, se muestra que para las calderas de turbinas de vapor esta eficiencia estacional se extiende de 75 a 85 %.

La temperatura de retorno, es la temperatura a presión de salida, del vapor condensado que se extrae de la turbina. En este caso es la temperatura mostrada en el punto 3 del ciclo de vapor mostrado en el capítulo 3 de los cálculos.

Todos los valores mencionados anteriormente sirven para conocer la energía que es exportada a la red y el combustible requerido por hora en base a la temperatura de retorno, el flujo de vapor, la temperatura sobrecalentado y la eficiencia estacional. En cuanto a la tarifa de exportación de electricidad se asume un valor de 170 pesos por KWh. Que equivalen a 170 000 MWh. Este valor fue tomado de precio que se

paga por la generación de energía eléctrica para estratos 4 en el recibo de la ESSA (Electrificadora de Santander S.A.).

En la Tabla 45., se muestra un comparativo de los valores calculados en el capítulo 5 y los hallados en RETScreen. Los resultados muestran que los valores están cercanos y que manejan un margen de error de $\pm 10 \%$.

Tabla 45. Comparativo entre RETScreen y los cálculos.

	RETScreen	Cálculos	Diferencia
Capacidad de generación eléctrica [KW]	1 093	1 000	9,30%
Energía exportada a la red [MWh]	9 575	8 760	9,30%
Combustible requerido [GJ/h]	17,5	15,4	13,60%

Fuente: Los autores.

6.5 ANÁLISIS DE EMISIONES.

El efecto causado por emisión de GEI a la atmósfera es medido por el índice de Poder de Calentamiento Global (GWP). Los tres gases más frecuentemente encontrados en la naturaleza son:

- Dióxido de Carbono (CO₂): *“Gas natural liberado como un producto de la combustión de combustibles fósiles, algunos procesos industriales y cambios en el manejo de usos de suelo. Se considera para el CO₂ el valor base del GWP igual a 1”.* [34]

- Metano (CH₄): *“Gas emitido en la minería de carbón, rellenos sanitarios, ganadería y extracción de gas y petróleo. El CH₄ tiene un GWP igual a 21 (21 veces más potente que el CO₂)”*. [34]
- Óxido Nitroso (N₂O): *“Gas emitido durante la elaboración de fertilizantes y combustión de combustibles fósiles donde el sector transporte es usualmente el contribuyente más significativo. N₂O tiene un GWP igual a 296 (296 veces más potente que el CO₂)”*. [34]

RETSscreen incluye en el modelo de energía un análisis de emisiones en donde se pueden estimar escenarios base de emisiones de gases efecto invernadero (GEI) de acuerdo a la tecnología seleccionada y a valores estandarizados para el potencial efecto invernadero de diferentes combustibles, el cual es definido por el IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Estos estimados incluyen no sólo las emisiones de CO₂ por el uso de combustibles, sino también las emisiones equivalentes de CO₂ procedentes de las emisiones de NO₂.

En esta parte podemos introducir el país donde está ubicado el proyecto, con esto podemos conocer los valores para las eficiencias de conversión de energía asociadas a las plantas de generación típicas que componen el sistema eléctrico de la región, donde se pueden conocer los factores de emisión de GEI y las pérdidas T y D que representan las pérdidas de transmisión y distribución del sistema que según la UPME en promedio representan un 15,4% visto desde la demanda. [35]. En la Figura 23, se muestra el análisis de emisiones que proporciona RETScreen para el caso de estudio.

Figura 23. Análisis de emisiones

Emission Analysis				
Base case electricity system (Baseline)		GHG emission factor (excl. T&D)	T&D losses	GHG emission factor
Country - region	Fuel type	tCO ₂ /MWh	%	tCO ₂ /MWh
Colombia	All types	0,176	15,4%	0,208
Electricity exported to grid	MWh	9.575	T&D losses	15,4%
GHG emission				
Base case	tCO ₂	1.989,0		
Proposed case	tCO ₂	611,6		
Gross annual GHG emission reduction	tCO ₂	1.377,4		
GHG credits transaction fee	%	0,0%		
Net annual GHG emission reduction	tCO ₂	1.377,4	is equivalent to	3.203 Barrels of crude oil not consumed
GHG reduction income				
GHG reduction credit rate	COP/tCO ₂	15000,00		
GHG reduction credit duration	yr	10		
GHG reduction credit escalation rate	%			

Fuente: Los autores (RETSscreen)

La reducción de las emisiones de los gases efecto invernadero que se logra anualmente según RETScreen es de 1 377,4 tCO₂ lo que equivale a 3 203 barriles de petróleo que se dejan de consumir.

En el caso de que se quiera obtener un beneficio adicional con la mitigación de GEI, se puede entrar a negociar en el mercado del carbono, los precios que se logren por esta comercialización serán definidos por la demanda de créditos, la oferta disponible de créditos, y / o la consideración de costos alternativos requeridos para alcanzar las reducciones necesarias en el mercado de carbono.

Tomando en consideración que la venta de carbono es una actividad emergente, no existen indicaciones finales sobre los precios de los créditos de carbono como un bien comercial.

Los precios de los créditos pueden variar entre US\$ 3-10 / tonelada de CO₂ desplazado. Aunque cada proyecto deberá negociar en el mercado del carbono desde sus propios méritos, se sugiere que las primeras evaluaciones financieras estén en este rango, ya que el interés común en el mercado es establecer razones

de liquidez apropiadas y es poco probable que en la actualidad se ofrezcan precios por mayores a los mencionados [36]

Con base a la información mostrada de la fluctuación de los precios para la tasa de créditos de reducción de GEI se estima un valor de US\$ 5 equivalentes a 15 000 pesos colombianos como se muestra en la Figura 21.

“Existe un Mecanismo para un Desarrollo Limpio (MDL), definido en el artículo 12 del Protocolo, permite que un país que en virtud del Protocolo de Kioto haya asumido el compromiso de reducir o limitar las emisiones (Parte del anexo B) ponga en práctica proyectos de reducción de las emisiones en países en desarrollo. A través de tales proyectos se pueden conseguir créditos por reducciones certificadas de las emisiones (Certified Emission Reductions, CERs, por sus siglas en inglés), cada uno de los cuales equivale a una tonelada de CO₂ y que cuenta para el cumplimiento de las metas”. [34]

6.6 ANÁLISIS FINANCIERO.

Esta parte del análisis realizado en RETScreen se divide en tres, en la primera se ingresan los parámetros financieros los cuales fueron adaptados de la UPME, esta información fue obtenida a través de algunos desarrollos de proyectos, referencias internacionales y de consultores.

- **Tiempo de vida del proyecto:** 20 años [37]
- **Porcentaje de deuda:** en todos los casos se asume un esquema de financiamiento correspondiente a 65% de deuda y 35% de capital. [37]

- **Tasa de interés:** se toma una tasa de interés de DTF+6,5%. [37]
- **Tiempo de la deuda:** 15 años. [37]

Los demás valores como la tasa de inflación (6,77%) y el DTF (6,43%), fueron obtenidos del portal de internet DólarWeb.com [38]

En la segunda parte se ingresan los costos iniciales del proyecto y los costos anuales de operación y mantenimiento. Como este estudio pre factibilidad no tiene como objetivo realizar un estudio económico, se consideró adecuando tomar estos valores de costos de un proyecto con características similares en donde diseñan una planta de incineración de residuos de madera. En este proyecto realizado en la Universidad Rovira i Virgili, por Gerard Almoma Peña. Se obtiene estos valores dando como resultado unos costos iniciales (Costo del proyecto) de €1 798 426,17 que equivalen aproximadamente a 5 395 275 540 pesos colombianos, representados de la Tabla 46.

Tabla 46. Costos iniciales.

Descripción	Precio [€]
Edificación	960 255,84
Sistema de alimentación de combustible	21 573,04
Generación de vapor	54 925,54
Sistema de generación de electricidad	51 152,94
Refrigeración y condensación	72 930,37
Motores y Bombas	8 784,65
Interconexión eléctrica	133 328,99
Iluminación	6 766,22
Instalación eléctrica	29 707,59
Ingeniería y dirección	459 000,00
TOTAL	1 798 425,18

Fuente: Adaptado [22]

En cuanto a los costos de operación y mantenimiento esto son de € 75 600. Que equivalente a 226 800 000 pesos colombianos.

En la tercera parte, se realiza el ingreso de variables económicas en el programa RETScreen, las cuales permiten realizar una evaluación sobre la viabilidad de un proyecto a nivel financiero haciendo uso del concepto de la TIR. En la Figura 24, se muestra el recuadro de viabilidad financiera proporcionado por el software RETScreen

Figura 24. Análisis financiero.

Parámetros financieros		
Tasa de inflación	%	6,8%
Tiempo de vida del proyecto	año	20
Relación de deuda	%	65%
Tasa de interés de la deuda	%	12,93%
Duración de deuda	año	15
Costos iniciales		
Sistema eléctrico de potencia	COP	0
PRECIO DEL PROYECTO	COP	5.395.275.540
Costos iniciales totales	COP	5.395.275.540
Incentivos y donaciones	COP	0
Costos anuales/pagos de deuda		
Costo de O y M (ahorros)	COP	226.800.000
Costo de combustible - caso propuesto	COP	0
Pagos de la deuda - 15 años	COP	540.707.371
Costos anuales totales	COP	767.507.371
Ahorros y renta anuales		
Costo de combustible - caso base	COP	0
Renta por exportación de electricidad	COP	1.627.723.414
Renta por reducción de GEI - 15 años	COP	20.660.332
Total renta y ahorros anuales	COP	1.648.383.746
Viabilidad financiera		
TIR antes de impuestos - capital	%	61,5%
TIR antes - impuestos - activos	%	26,6%
Pago simple de retorno del capital	año	3,8
Repago - capital	año	1,8

Fuentes: Los autores (RETScreen)

La herramienta que proporciona el software RETScreen permite obtener la tasa interna de retorno (TIR) calculada libre de impuestos y la TIR con impuestos ya incluidos en porcentajes.

La TIR “se denomina como la tasa de interés que hace que el Valor Presente Neto (VPN) de una inversión sea igual a cero ($VPN=0$). La tasa interna de retorno es un criterio para la evaluación financiera de proyectos que iguala el valor presente de los flujos de caja esperados con la inversión inicial. La tasa interna de retorno equivale a la tasa de interés producida por un proyecto de inversión con pagos (valores negativos) e ingresos (valores positivos) que ocurren en periodos regulares”. [39]

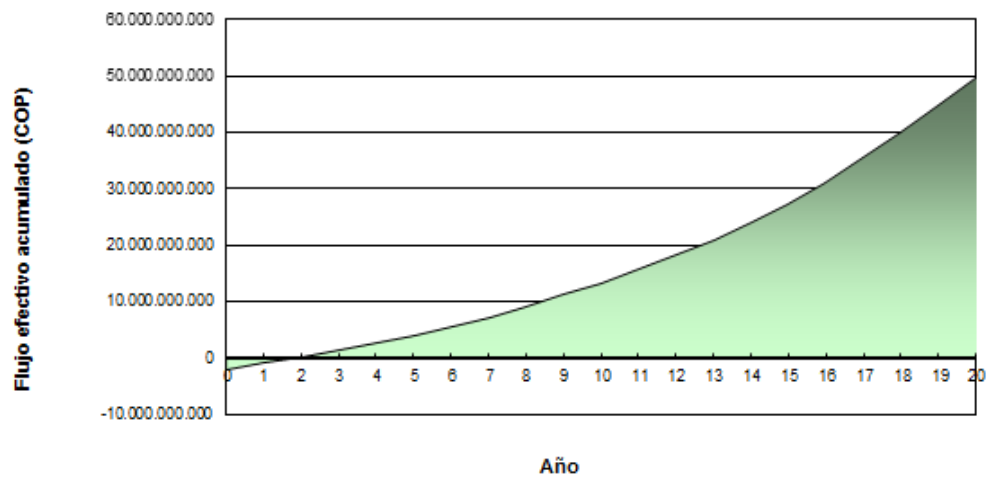
Bajo los supuestos ingresados inicialmente este proyecto es viable gracias a que se obtiene una TIR positiva, Para este caso, se encuentra que la TIR antes de impuestos es de 61,50% y al realizar la inclusión de impuestos y de activos resulta de 26,60% , que en comparación, con la tasa de interés de la deuda de 12,93% es mucho mayor se puede establecer de alguna forma gracias al software que el proyecto es viable desde ciertos criterios establecidos; que en comparación a proyectos similares con casos de estudio como modelos del mismo programa, y que a nivel mundial los valores coinciden, proporcionando la oportunidad de tomar decisiones y analizar la viabilidad a nivel financiero.

Adicionalmente, el software proporciona el año en que el proyecto se recupera la inversión inicial aproximadamente en un año y diez meses, que en la gráfica es 1,8 años, que aparece como último dato, y que, a los 3,8 años (tres años y diez meses aproximadamente) se obtiene una ganancia igual a la inversión realizada inicialmente.

En la Figura 25, que se obtiene por el software RETScreen, se puede comprobar de forma aproximada que la inversión se recupera durante el tiempo devida del

proyecto, hasta llegar a veinte años donde el valor del flujo efectivo acumulado aumenta según se proyecta.

Figura 25. Gráfico de flujo de caja acumulado.



Fuente: Los autores (Mediante software RETScreen).

6.7 MICRO RED.

Para transportar y distribuir la electricidad que se produce en las centrales de energía hasta los usuarios finales, se necesitan las redes eléctricas. Estas a su vez, se encuentran relacionadas entre generadores de energía y consumidores de forma unidireccional. [40]

Debido a la necesidad de hacer uso eficiente de la energía, y mejorando el acercamiento entre productores y consumidores aparece el concepto de micro-redes en el entorno de las Smart Grids (redes inteligentes). [40]

6.7.1 Definición. Según la adaptación de la “Revista ElectroIndustria” para el estándar IEEE 1547.4-2011, se define la Microred como *“un sistema eléctrico que posee recursos de Generación Distribuida (GD), múltiples cargas, que opera en modo aislado o interconectado a otra red, puede operar con flujos de potencia bidireccionales y es intencionalmente planeado. Generalmente, las Micro-Redes trabajan con GD basados en Energías Renovables No Convencionales (ERNC), que a través de la electrónica de potencia acondicionan su entrega de energía.”* [40].

En la Figura 26., se representa una microred, donde se utiliza la energía de forma descentralizada y se puede apreciar la independencia a la red eléctrica pública.

Figura 26. Representación de una Microred.



Fuentes: Tomado [41]

6.7.2. Beneficios de las microredes. Las microredes pueden permitir un desarrollo revolucionario donde se benefician principalmente consumidores y medio ambiente. Gracias a que se trata de pequeños sistemas inteligentes de distribución eléctrica y térmica que se autogestionan de forma local, estando conectados o aislados de la red pública. [41]

Beneficios de una microred [42]:

- Se mejora la calidad y confianza en el suministro de energía, gracias al control inteligente que se le puede adicionar a este tipo de redes.
- Les permite a los clientes optimizar su consumo eléctrico y hacer uso de forma eficiente gracias a que el servicio es estable.
- Al integrarse la generación distribuida de fuentes renovables, con una infraestructura adecuada para el transporte de energía eléctrica, se aporta a la sostenibilidad ambiental y se reducen las emisiones de CO₂.
- Existe una mejora en la eficiencia para la distribución de los flujos de energía y flexibilidad en los picos de demanda, permitiendo expansiones de la red a futuro.

6.7.3. Componentes de una microred. La operación de una microred depende de la coordinación y gestión de cada uno de los elementos interconectados, dichos elementos que componen básicamente a estas redes son:

“

- Una red de distribución en baja tensión en la que se conectan una serie de fuentes de energía distribuidas para proporcionar electricidad y calor a un conjunto de consumidores.

- Una infraestructura de comunicación local.
- Un sistema jerárquico de control y gestión.
- Sistemas de almacenamiento de energía.
- Controladores inteligentes para cargar y consumos...” [43].

7. CONCLUSIONES

Se realizó una recopilación de estudios y antecedentes a nivel mundial sobre la utilización de la biomasa que se deposita en los rellenos sanitarios para la generación de energía en forma de electricidad o de calor.

A través de las técnicas vinculadas a la propuesta, se busca reutilizar los residuos de los rellenos sanitarios, planteando como solución viable la combustión de estos desechos para disminuir el volumen para depósito final, lo que permite el funcionamiento del relleno durante mucho más tiempo del que se tiene destinado.

Se logró estimar con 38 [Ton/h] de residuos se obtiene una potencia eléctrica disponible en total de 23 MW, lo cual, garantiza que se puede predimensionar una planta de generación de energía con potencia instalada de 1MW mediante el uso de 1,6 [Ton/h] de biomasa; permitiendo pensar en una implementación futura mediante una microred para transportar la energía necesaria que cubra la demanda de la empresa operadora de aseo y las plantas que funcionan en su interior.

El resultado de los cálculos obtenidos estimando la energía disponible en su totalidad y parcialmente en el relleno sanitario “El Carrasco” muestra que el potencial energético disponible allí, permite pensar en una implementación futura para el uso de la biomasa depositada como una fuente para generar energía eléctrica.

El potencial energético disponible en el relleno sanitario “El Carrasco” es muy inferior al compararse con el proporcionado por las principales plantas generadoras

térmicas o hídricas del país, pero se puede establecer como punto de partida al considerar a los desechos sólidos urbanos como una opción energética a futuro.

El tema de la generación con residuos sólidos urbanos, es un campo poco explorado en Colombia, debido a esto, la normativa actual para las microredes y generación con fuentes de energía alternativa está en proceso de evolución.

Se establece el proceso de combustión de residuos sólidos urbanos como un método de valorización energética, que permite una adecuada gestión de los residuos, logra que se disminuya la cantidad de desechos que ingresan en los rellenos sanitarios. Por otra parte, se logran grandes beneficios como el auto abastecimiento de energía eléctrica, la posibilidad de obtener ingresos adicionales de la venta de la energía eléctrica, aumentar la vida útil de los rellenos sanitarios, generar incentivos económicos y contribuye de forma adecuada con la protección del medio ambiente.

La valorización energética de los residuos mediante el proceso de combustión es objeto de debate por “el supuesto impacto ambiental que producen”. Aunque este método puede emitir gases de efecto invernadero si no se lleva a cabo de forma adecuada y cumpliendo ciertos criterios como someter a los gases de escape a un proceso de depuración previo a su salida a la atmósfera. A pesar de que la combustión de los residuos sólidos urbanos genera CO₂, éste se considera como parte del ciclo natural del carbono en la tierra. Las plantas toman CO₂ del aire para crecer, luego de cumplir un ciclo de vida los residuos son desechados (residuos de comida y residuos forestales), estos son aprovechados y devuelven al aire cuando son quemadas, de manera que no generan un aumento neto de CO₂.

El uso de la biomasa como energía renovable constituye un gran interés a nivel mundial, y vale la pena que Colombia se realicen esfuerzos en políticas que permitan la viabilidad de nuevos estudios técnicos en el que el autoabastecimiento energético a partir de este combustible, motive al desarrollo de la industria y las zonas rurales, y que además puedan contribuir al crecimiento del SIN a través de la integración de estas fuentes que ofrecen una energía que cumple los parámetros técnicos nacionales. Por consiguiente, aprovechar el potencial que tiene el país para la implementación de energías renovables toma mayor importancia ya que se pueden disminuir las emisiones de GEI y al tiempo contribuye con el desarrollo del país.

Con los valores calculados del poder calorífico de los residuos que son depositados en el relleno sanitario “El Carrasco” se determinó que es cercano al de otros combustibles alternativos como el bagazo de caña y residuos forestales, pero al compararlo con los combustibles tradicionales como el carbón se observa que está muy por debajo. Pero lo que hace atractivo al uso de los residuos sólidos urbanos como combustible es su costo casi nulo, la disponibilidad que se garantiza siempre el suministro y el bajo impacto ambiental que representa al compararlo con los combustibles tradicionales.

La potencia generada cuando se incineran todos los residuos que ingresan en un día normal al relleno sanitario “El Carrasco”, es la mitad de la potencia instalada en grandes ingenios azucareros como el ingenio PROVIDENSIA, esto demuestra el gran potencial que se desperdicia cuando estos residuos son tirados sin ningún tipo de valorización energética. Esto motiva a que en el caso de la industria se esté buscando soluciones alternativas que permitan aprovechar estos residuos y así disminuir sus costos de electricidad de manera sostenible. De esta misma manera

las empresas encargadas del tratamiento de los residuos sólidos urbanos pueden verse beneficiada implementando este tipo de tecnología como la incineración, que están asociadas principalmente con tecnologías maduras igualmente utilizadas en las plantas térmicas que utilizan combustible convencional.

Mediante el uso del software RETScreen se realiza la verificación y evaluación los resultados que permiten optimizar el uso de los recursos. Abarcando temas como pre factibilidad técnica, en donde se comprobaron valores encontrados en el capítulo 3 como algunos datos termodinámicos del ciclo de vapor, capacidad de generación eléctrica y producción de vapor, análisis de emisiones de GEI y un breve análisis financiero donde se pudo observar la viabilidad del proyecto conociendo la gráfica del flujo de caja acumulado.

CITAS

- [1] DIRECTIVA 2009/28/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 23 de abril de 2009 relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables
- [2] DIRECTIVA 2008/98/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 19 de noviembre de 2008 sobre los residuos
- [3] HYMAN, Mark. Guía Para La Elaboración De Estragáis Nacionales De Gestión De Residuos, Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, PNUMA, 2013.
- [4] PALOMINO GUZMÁN, Santiago. Valorización Energética De Residuos, GUZIMA S.L., España, 2008. [En línea]. Disponible: http://api.eoi.es/api_v1_dev.php/fedora/asset/eoi:45969/componente45967.pdf. [Último acceso: 19 Noviembre 2015].
- [5] Convenio interadministrativo suscrito entre el Área Metropolitana de Bucaramanga y la Universidad Industrial De Santander, Plan De Gestión Integral De Residuos Sólidos Del Área Metropolitana De Bucaramanga (PGIRS), Diagnostico técnico y operativo. Bucaramanga Colombia, 2013. P. 101.
- [6] FERNÁNDEZ GONZÁLEZ, Jesús. Barreras Para El Desarrollo Del Empleo De Los Biocombustibles Sólidos Y Líquidos, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid España, Diciembre 2002.
- [7] CARTA GONZÁLEZ, José Antonio. CALERO PÉREZ, Roque. COLMENAR SANTOS, Antonio. CASTRO GIL, Manuel Alonso. CENTRALES DE ENERGÍAS RENOVABLES: Generación eléctrica con energías renovables, Madrid: Pearson Educación. S.A, 2009.
- [8] CENGEL, Yunus. BOLES, Michael. TERMODINÁMICA, Séptima Edición, Capítulo 10. México: McGraw-Hill, 2009.
- [9] CHIO, Juan Carlos. El Carrasco seguirá operando por 24 meses más: alcaldes. En: Vanguardia, 26 septiembre 2015. [En línea]. - Disponible: <http://www.vanguardia.com/>. [Último acceso: 9 Diciembre 2015].

- [10] Proactiva Chicamocha SA ESP, Ampliación disposición en El Carrasco, Resolución 0190 de 2013.
- [11] Declaratoria de emergencia sanitaria en Bucaramanga sería demandada. En: El Tiempo, 30 septiembre, 2015. [En Línea] – Disponible: <http://www.eltiempo.com/>. [Ultimo acceso: 9 diciembre 2015]
- [12] FERNÁNDEZ, Yolanda, Planta de incineración de residuos, Spittelau (Austria), traducido de una versión inglesa la Experiencia seleccionada en el Concurso de Buenas Prácticas catalogado como BEST, Dubai, 1996. Disponible: <http://habitat.aq.upm.es/dubai/96/bp014.html>. [Ultimo acceso: 15 Diciembre 2015]
- [13] PUIG VENTOSA, Ignacio. CALA, María. La incineración de residuos en cifras, Análisis socio-económico de la incineración de residuos municipales en España, julio de 2010.
- [14] REMESA, Planta de Residuos de Mielilla S.A., Quienes somos, La planta. página oficial de internet, Disponible: http://www.remesa.es/index.php?option=com_content&view=article&id=98&Itemid=578&lang=es, [Ultimo acceso: enero 10 de 2016]
- [15] Herwig Schuster, Plantas Incineradoras de Residuos en Austria, Informe de Greenpeace, Viena, Junio de 1999.
- [16] Empresa de aseo de Bucaramanga EMAB S.A. ESP., Situación actual relleno sanitario El Carrasco, Bucaramanga. Colombia. Bucaramanga, 2012.
- [17] SYSAV CONVERSIÓN DE RESIDUOS EN ENERGÍA CHP EN MALMÖ, SUECIA tomado de STATE OF GREEN. Referencia web Disponible: <https://stateofgreen.com/en/profiles/ramboll/solutions/waste-to-energy-chp-sysav-in-malmoe-sweden>, [Ultimo acceso: febrero 15 de 2016]
- [18] ALTA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA DE BIOMASA EFICIENTES, State of green. Disponible: https://stateofgreen.com/en/solutions#/15__3832__51, [Ultimo acceso: febrero 15 de 2016]
- [19] WASTE-TO-ENERGY CHP, EGE EN OSLO NORUEGA, state of grenn. Disponible: <https://stateofgreen.com/en/solutions>, [Ultimo acceso: febrero 17 de 2016]

- [20] RODRÍGUEZ DEVIS, Julio Mario. Energía, sus perspectivas, su conversión y utilidades en Colombia. Programa Universitario de Investigación en Energía – libro de PUIE y Empresa de energía de Bogotá S.A. E.S.P., Universidad Nacional de Colombia.
- [21] Documento (BREF), Mejores Técnicas Disponibles de referencia europea para Incineración de Residuos (MTD), Serie Prevención y Control Integrados de la Contaminación (IPPC), Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, Secretaría General Técnica-Centro de Publicaciones, MADRID, 2011.
- [22] ALMOMA PEÑA, Gerard , Diseño de una central eléctrica de Biomasa de 1MW ampliable a 2MW, Tesis de Pregrado, Universidad Rovira I Virgili, Tarragona España, Junio de 2010.
- [23] CALVO FUENTES, Antonio. La enciclopedia del medio ambiente urbano, Cerro alto, 1997.
- [24] G. Tchobanoglous, H. Theisen, y R. Eliassen. Desechos sólidos principios de ingeniería y administración. Serie: Ambiente y los recursos naturales renovable AR-16, Traducción: Armando Cubillos, Mérida Venezuela, 1982.
- [25] ÁLVAREZ VEGA, Juan. Planta De Aprovechamiento Energético De La Fracción Combustible De Los Residuos Sólidos Urbanos Con Producción De Energía Eléctrica. Proyecto de Pregrado, Universidad Pontificia Comillas, Madrid España, Junio 2008.
- [26] CAMBRA IBÁÑEZ, José Francisco, ARIAS ERGUETA, Pedro Luis, GUEMEZ BILBAO, María Belén y BARRIO CAGIGAL, Victoria Laura. Procedimiento Para La Obtención De Hidrogeno A Partir De Gas Natural. Patente, universidad del país vasco, España, diciembre 2006.
- [27] IDEAM. Atlas Climatológico de Colombia. Colombia, Diciembre 2005.
- [28] FAIRES, Virgil Moring y SIMMANG, Clifford Max. Termodinámica, sexta edición, Apéndice B-17, Página 632. México: UTEHA, 1983.
- [29] FERNÁNDEZ MARTÍNEZ, Alejandro. Planta De Incineración De Residuos Sólidos Urbanos Con Tecnología De Parrilla Y Recuperación Energética. Proyecto de Pregrado, Universidad Pontificia Comillas, Madrid España, Septiembre 2007.

- [30] SIEMENS, «SIEMENS ENERGY,» [En línea]. Disponible: <http://www.energy.siemens.com/>. [Último acceso: 14 Febrero 2016].
- [31] EGIDO, Miguel A y CAMINO, María. Guía de Normas y Protocolos Técnicos para la Electrificación Rural con Energías Renovables. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid España, 2008
- [32] ROMÁN, Roberto. RETScreen: Un programa para Sistemas Energéticos. Universidad de Chile- Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Chile, mayo 2012.
- [33] Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME). RESOLUCIÓN 281 DE 2015. Colombia, 5 de junio 2015.
- [34] BANCOLDEX (Banco de Comercio Exterior de Colombia). Guía en Cambio Climático y Mercados de Carbono. Cartagena Colombia.
- [35] Subdirección de Planeación Energética-UPME. Plan De Expansión de Referencia Generación – Transmisión 2010-2024. Bogotá Colombia, Noviembre de 2010.
- [36] BUN-Fundación Red de Energía. Reducción de Emisiones de Carbono-UNA GUÍA PARA EMPRESARIOS DE ENERGÍA RENOVABLE. Financiamiento de Empresas de Energía Renovable en América Central (FENERCA).
- [37] Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME). Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia. CONVENIO ATN/FM-12825-CO, Bogotá Colombia, 2015
- [38] DolarWeb, [En línea]. Disponible: <http://dolar.wilkinsonpc.com.co/>. [Último acceso: 20 Junio 2016].
- [39] VECINO ARENAS, Carlos Enrique. Fundamentos de Ingeniería Económica. Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas, Escuela de Estudios Industriales y Empresariales, Ediciones UIS, Primera Edición, Colombia, Agosto de 2010.
- [40] DIAZ, Matías. Ph.D.(c), M.Sc. & Ingeniero Civil Electricista. Innovación en sistemas eléctricos, Electrónica de Potencia e Integración de Energías Renovables. Documento adaptado del estándar IEEE 1547.4 Guide for Design, Operation, and

Integration of Distributed Resource Island Systems with Electric Power Systems, Revista Electroindustria, publicado en septiembre de 2013. Disponible: <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=2132>.

[Último acceso: domingo 17 de abril de 2016]

[41] Hibridación eólica/solar/generación. Electrificación zonas rurales aisladas en Colombia. [En línea]. Disponible:

http://www.energrecol.com/energia_eolica/hibridacion_wind_solar/index.htm.

[Último acceso: domingo 17 de abril de 2016]

[42] Smart Grids. Ventajas de una Smart Grid. [En línea]. Disponible:

http://www.endesaeduca.com/Endesa_educa/recursos-interactivos/smart-city/smart-grid [Último acceso: lunes 18 de abril de 2016]

[43] Introducción a las Microrredes. Centro Nacional de Energías Renovables (CENER) de Navarra, España. [En línea] Disponible: <http://www.cener.com/es/areas-de-investigacion/departamento-de-integracion-en-red-de-energias-renovables/infraestructuras-y-recursos-tecnicos/atenea-microgrid-cener/introduccion-a-las-microrredes/>. [Último acceso: lunes 18 de abril de 2016]

BIBLIOGRAFIA

ALMOMA PEÑA, Gerard , Diseño de una central eléctrica de Biomasa de 1MW ampliable a 2MW, Tesis de grado Ingeniería Técnica Industrial Eléctrica. Tarragona, ES: Universitat Rovira I Virgili. Escola Tècnica Superior Enginyeria, Departamento de Ingeniería Electrónica, Eléctrica y Automática, Junio 2010.

CENGEL, Yunus. BOLES, Michael. Termodinámica. 7ed. Capítulo 10. México: McGraw-Hill, 2009.

EMPRESA DE ASEO DE BUCARAMANGA – EMAB. Situación actual del relleno sanitario “El Carrasco”. Bucaramanga: EMAB S.A, 2012.

FERNÁNDEZ MARTÍNEZ, Alejandro. Planta De Incineración de residuos sólidos urbanos con tecnología de parrilla y recuperación energética. Proyecto de grado Ingeniero Industrial. Madrid: Universidad Pontificia Comillas, Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI), Septiembre 2007.

MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y MEDIO RURAL Y MARINO. Mejores Técnicas Disponibles de referencia europea para Incineración de Residuos: Documento BREF. Serie Prevención y Control Integrados de la Contaminación (IPPC). [en línea] [Madrid: España] Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino Secretaría General Técnica, 2011. [citado: 15 Dic. 2015] Disponible en Internet: http://www.prtr-es.es/Data/images/MTD_Incineracion_residuos_ES.pdf

ANEXOS

ANEXO A. CATALÓGO DE TURBINAS A VAPOR DE SIEMENS



Turbinas de vapor industriales

La gama integral de productos de 2 a 250 MW

Answers for energy.

SIEMENS

Aplicaciones

Las turbinas de vapor industriales de Siemens posibilitan una generación eficiente de electricidad y mejoran la rentabilidad de procesos industriales.

Sectores

- Empresas energéticas
- Productores independientes de electricidad (IPP)
- Industria química
- Petroquímica / refinerías
- Madereras, papeleras
- Minería, metalúrgica y siderurgia, acerías
- Industria procesadora, cementera
- Industria azucarera, de etanol y de aceite de palma
- Industria de alimentos y bebidas

Campos de aplicación

- Plantas de ciclo combinado
- Plantas de cogeneración (electricidad y calor)
- Plantas de recuperación de calor
- Centrales energéticas de biomasa
- Plantas incineradoras de basura
- Centrales termo-solares
- Plantas geotérmicas
- Accionamientos mecánicos
- Barcos / plataformas marítimas

Ventajas más importantes

- Alto rendimiento, eficiencia
- Gran fiabilidad y disponibilidad
- Soluciones comprobadas a medida del cliente
- Diseño compacto
- Puesta en servicio y mantenimiento sencillos



SST-100 (hasta 8,5 MW)



SST-150 (hasta 20 MW)



SST-200 (hasta 10 MW)



SST-300 (hasta 50 MW)



SST-400 (hasta 65 MW)



SST-500 (hasta 100 MW)



SST-600 (hasta 100 MW)



SST-700 (hasta 175 MW)



SST-800 (hasta 150 MW)



SST-900 (hasta 250 MW)

Turbinas de vapor industriales

La gama integral de productos de 2 a 250 MW



SST-100

Hasta 8,5 MW

La SST-100 es una turbina de carcasa simple, con reductor para accionamiento de generador; prefabricada incluyendo los álabes como solución económica. Se utiliza principalmente para aplicaciones industriales.

Datos técnicos

- Potencia entregada de hasta 8,5 MW
- Presión de entrada de hasta 65 bar
- Temperatura de entrada de hasta 480 °C
- Velocidad de giro de hasta 7.500 rpm
- Presión del vapor de salida: contrapresión de hasta 10 bar o condensación de hasta 1 bar
- Área de escape 0,22 m²

Dimensiones típicas

Longitud 8 m
Ancho 3,7 m
Altura 3,4 m

Características

- Contrapresión/Condensación
- Diseño de la unidad como paquete
- Escape radial
- Diseño simple, rotor rígido
- Sistema de aceite integrado en la base de la estructura
- Tuberías de aceite y vapor separadas



SST-150

Hasta 20 MW

La SST-150 es una turbina de carcasa simple, que acciona el generador hasta 1.500 ó 1.800 rpm y tiene un diseño en paquete sobre bastidor (skid). Para generar energía, aporta elevada eficiencia junto con una configuración muy compacta.

Datos técnicos

- Potencia entregada de hasta 20 MW
- Presión de entrada de hasta 103 bar
- Temperatura de vapor de entrada de hasta 505 °C
- Velocidad de giro de hasta 13.300 rpm
- Toma de hasta 25 bar
- Extracción controlada de hasta 16 bar
- Presión del vapor de salida: contrapresión de hasta 10 bar o condensación de hasta 0,25 bar
- Área de escape 0,28 – 1,6 m²

Dimensiones típicas

Longitud 12 m
Ancho 4 m
Altura 5 m

Características

- Contrapresión/Condensación
- Diseño de la unidad en paquete
- Módulos de turbina prefabricados, periféricos modulares
- Extracción controlada simple
- Escape radial
- Tuberías de aceite y vapor separadas



SST-200

Hasta 10 MW

La SST-200 es una turbina de carcasa simple, con reductor o accionamiento directo apto tanto para accionamientos de generador como mecánicos. Se emplea para aplicaciones industriales y de generación de energía.

Datos técnicos

- Potencia entregada de hasta 10 MW
- Presión de entrada de hasta 110 bar
- Temperatura de entrada de hasta 520 °C
- Extracción controlada de hasta 16 bar y hasta 350 °C
- Toma de hasta 60 bar
- Presión del vapor de salida: contrapresión de hasta 16 bar o condensación de hasta 0,25 bar
- Área de escape 0,17 – 0,34 m²

Dimensiones típicas

Longitud 4 m*
Ancho 2 m*
Altura 2,5 m*

Características

- Contrapresión/Condensación
- Diseño de la unidad en paquete
- Prediseño extenso
- Alta velocidad, escape superior/inferior
- Trayecto de vapor a la medida del cliente
- Corto plazo de entrega

*sólo bastidor (skid) de turbinas



SST-300

Hasta 50 MW

La SST-300 es una turbina de carcasa simple, con reductor para accionamiento de generador. Tiene un diseño compacto y flexible con alto grado de estandarización. Se emplea para aplicaciones de generación de energía.

Datos técnicos

- Potencia entregada de hasta 50 MW
- Presión de entrada de 120 bar
- Temperatura de entrada de 520 °C
- Velocidad de giro de hasta 12.000 rpm
- Extracción controlada de hasta 45 bar y hasta 400 °C
- Toma de hasta 60 bar
- Presión del vapor de salida: contrapresión de hasta 16 bar o condensación de hasta 0,3 bar
- Área de escape 0,28 – 1,6 m²

Dimensiones típicas

Longitud 12 m
Ancho 4 m
Altura 5 m

Características

- Contrapresión/Condensación
- Módulos de turbina prefabricados, periféricos modulares
- Dos extracciones controladas
- Escape radial/axial
- Extracción controlada de hasta 16 bar
- Diseño de la unidad en paquete
- Trayecto de vapor a la medida del cliente
- Corto plazo de entrega



SST-400

Hasta 65 MW

La SST-400 es una turbina de carcasa simple, con reductor para accionamiento de generador. Tiene un diseño compacto y flexible con alto grado de estandarización. Se emplea para aplicaciones industriales y de generación de energía.

Datos técnicos

- Potencia entregada de hasta 65 MW
- Presión de entrada de hasta 140 bar
- Temperatura de entrada de hasta 540 °C
- Velocidad de giro de 3.000 – 8.000 rpm
- Extracción controlada de hasta 45 bar y hasta 450 °C
- Toma de hasta 60 bar
- Presión del vapor de salida: contrapresión de hasta 25 bar o condensación de hasta 0,3 bar
- Área de escape 1,3 – 3,0 m²

Dimensiones típicas

Longitud 18 m
Ancho 8,5 m
Altura 5,5 m

Características

- Contrapresión/Condensación
- Módulos de turbina prefabricados, periféricos modulares
- Dos extracciones controladas, escape radial/axial
- Extracción controlada de hasta 16 bar
- Diseño en semipaquete de la unidad
- Trayecto de vapor a la medida del cliente
- Corto plazo de entrega



SST-500

Hasta 100 MW

La SST-500 es una turbina de carcasa simple, con reductor o accionamiento directo. Es adecuada tanto para accionamientos de generador como mecánicos para soportar grandes caudales volumétricos. Se utiliza típicamente con carcasa de baja presión en aplicaciones de dos cilindros.

Datos técnicos

- Potencia entregada de hasta 100 MW
- Presión de entrada de hasta 30 bar
- Temperatura de entrada de hasta 400 °C
- Velocidad de giro de hasta 15.000 rpm
- Hasta 2 tomas, a varios niveles de presión
- Área de escape 2 x 0,175 – 3,5 m²

Dimensiones típicas

Longitud 19 m
Ancho 6 m
Altura 5 m

Características

- Turbina de condensación de doble flujo
- Módulos de turbina normalizados, periféricos modulares
- Controlada por estrangulador
- Altamente caracterizada a cada aplicación
- Trayecto de vapor a la medida del cliente



SST-600

Hasta 100 MW

La SST-600 es una turbina de carcasa simple, con reductor o accionamiento directo; apta tanto para accionamientos de generador como mecánicos. Se emplea en aplicaciones a medida para los procesos más complejos en industria y generación de energía.

Datos técnicos

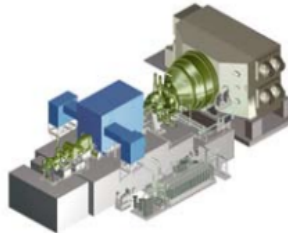
- Potencia entregada de hasta 100 MW
- Presión de entrada de hasta 140 bar
- Temperatura de entrada de hasta 540 °C
- Velocidad de giro de 3.000 – 15.000 rpm
- Extracción controlada doble de hasta 65 bar
- Hasta 5 tomas, a varios niveles de presión
- Presión del vapor de salida: contrapresión de hasta 55 bar o condensación
- Área de escape 0,175 m² – 3,5 m²

Dimensiones típicas

Longitud 19 m
Ancho 6 m
Altura 5 m

Características

- Contrapresión/Condensación
- Módulos de turbina normalizados, periféricos modulares
- Carcasa interior diseñada para altos parámetros de vapor
- Posible segunda inyección de vapor
- Diseño en paquete de la unidad
- Escape radial/axial
- Altamente caracterizada a cada aplicación
- Trayecto de vapor a medida del cliente



SST-700

Hasta 175 MW

La SST-700 es una turbina de dos carcasas consistente en dos módulos: un módulo de AP (alta presión) con reductor y otro de BP (baja presión). Se utiliza para aplicaciones de generación de energía, especialmente en ciclo combinado o centrales termo-solares. Cada módulo se puede usar independientemente o combinado en una configuración ideal.

Datos técnicos

- Potencia entregada de hasta 175 MW
- Presión de entrada (con recalentamiento) de hasta 165 bar
- Temperatura de entrada (con recalentamiento) de hasta 585 °C
- Temperatura de recalentamiento de hasta 415 °C
- Velocidad de giro de 3.000 – 13.200 rpm
- Extracción controlada de hasta 40 bar y hasta 415 °C
- Hasta 7 tomas; hasta 120 bar
- Presión del vapor de salida: contrapresión de hasta 40 bar o condensación de hasta 0,6 bar
- Presión del vapor de escape (recalentado) de hasta 3 bar
- Área de escape 1,7 – 11 m²

Dimensiones típicas

Longitud 22 m*
Ancho 15 m*
Altura 6 m*

*incluyendo condensador

Características

- Contrapresión/Condensación
- Módulos de turbina prefabricados
- Posible disposición paralela
- AP como unidad de contrapresión, BP como cola de condensación
- Trayecto de vapor a medida del cliente
- Extracción simple en tubo de comunicación
- Escape radial/axial
- Aplicaciones de recalentamiento



SST-800

Hasta 150 MW

La SST-800 es una turbina de carcasa simple de accionamiento directo con diseño de reflujo para aplicaciones de generador. Se emplea en aplicaciones a la medida para los procesos más complejos en industria y generación de energía.

Datos técnicos

- Potencia entregada de hasta 150 MW
- Presión de entrada de hasta 140 bar
- Temperatura de entrada de hasta 540 °C
- Velocidad de giro de 3.000 – 3.600 rpm
- Extracción controlada doble de hasta 45 bar
- Hasta 6 tomas, a varios niveles de presión
- Presión en el escape de hasta 14 bar
- Área de escape 1,1 – 5,6 m²

Dimensiones típicas

Longitud 20 m
Ancho 8,5 m
Altura 6 m

Características

- Contrapresión/Condensación
- Módulos de turbina normalizados, periféricos modulares
- Carcasa interior para parámetros altos de vapor
- Escape axial/radial
- Diseño de la unidad en paquete
- Altamente caracterizada para cada aplicación
- Trayecto de vapor a medida del cliente



SST-900

Hasta más de 250 MW

La SST-900 es una turbina de carcasa simple para generadores bipolares para generación de energía y la industria. La SST-900 RH es una turbina de dos carcassas para aplicaciones de recalentamiento.

Datos técnicos

- Potencia entregada de hasta 250 MW y superior
- Presión de entrada (con recalentamiento) de hasta 165 bar
- Temperatura de entrada (con recalentamiento) de hasta 585 °C
- Temperatura de recalentamiento de hasta 580 °C
- Velocidad de giro de 3.000 – 3.600 rpm; AP hasta 13.200 rpm
- Hasta 7 tomas; hasta 60 bar
- Extracción controlada de hasta 55 bar y hasta 480 °C
- Presión del vapor de salida: contrapresión de hasta 16 bar o condensación de hasta 0,6 bar
- Presión del vapor de escape (recalentado) de hasta 3 bar
- Área de escape 1,7 – 11 m²

Dimensiones típicas

Longitud 20,5 m*

Ancho 11 m*

Altura 10 m*

*Incluyendo condensador

Características

- Contrapresión / Condensación
- Módulos de turbina prefabricados
- Dos extracciones controladas
- Extracción controlada de hasta 16 bar
- Válvula de mariposa en la carcasa de la turbina
- Escape radial / axial
- Aplicaciones de recalentamiento
- Trayecto de vapor a medida del cliente



Publicado por y copyright © 2009:

Siemens AG
Energy Sector
Freyeslebenstrasse 1
91058 Erlangen, Alemania

Siemens AG
Energy Sector
Oil & Gas Division
Wolfgang-Reuter-Platz
47053 Duisburg, Alemania

Siemens AG
Lutherstrasse 51
02826 Görlitz, Alemania

Siemens Energy Inc.
10730 Telge Road
Houston, Texas 77095, USA

Para más información, sírvanse contactar con
nuestro centro de atención al cliente.

Teléfono: +49 180 524 70 00

Fax: +49 180 524 24 71

(Con recargo, depende del proveedor)

Correo electrónico: support.energy@siemens.com

Oil & Gas Division
N.º de pedido: E50001-W410-A101-V3-7800
Impreso en Alemania
Dispo 34806, c4bs 7477 P WS 09092.5

Impreso en papel blanqueado sin cloro elemental.

Reservados todos los derechos.

Las marcas comerciales mencionadas en este
documento son propiedad de Siemens AG,
sus filiales o respectivos propietarios.

Sujeto a modificaciones sin previo aviso.

Este documento contiene descripciones generales sobre
las posibilidades técnicas que pueden, pero no tienen
que darse en el caso individual. Por ello, las prestaciones
deseadas se determinarán en cada caso al cerrar el
contrato.

ANEXO B. UPME Resolución 281 de 2015

RESOLUCIÓN 281 DE 2015

(junio 5)

Diario Oficial No. 49.534 de 5 de junio de 2015

Unidad de Planeación Minero-Energética

Por la cual se define el límite máximo de potencia de la autogeneración a pequeña escala.

El Director General de la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME), en ejercicio de sus facultades legales,

CONSIDERANDO:

Que la Ley 1715 de 2014, “Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional”, estableció el marco legal y los instrumentos para la promoción, desarrollo y utilización de las Fuentes No Convencionales de Energía (FNCE), en especial las de carácter renovable, en el Sistema Interconectado Nacional mediante su integración al mercado eléctrico;

Que la misma ley, en su artículo 5°, numeral 2, definió la autogeneración a gran escala como la autogeneración cuya potencia máxima supera el límite establecido por la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME); y en el numeral 3 del mismo artículo, definió la autogeneración a pequeña escala como la autogeneración cuya potencia máxima no supera dicho límite;

Que el literal b) del numeral 3 del artículo 6° de la Ley 1715 de 2014 establece la función a la UPME de “*Definir el límite máximo de potencia de la Autogeneración a Pequeña Escala*”;

Que el artículo 3° del Decreto número 2469 de 2014, “por el cual se establecen los lineamientos de política energética en materia de entrega de excedentes de autogeneración”, expedido por el Ministerio de Minas y Energía, definió un período de seis (6) meses para que la UPME establezca “...*el límite máximo de potencia de la autogeneración a pequeña escala, el cual se podrá actualizar si las variables que se tuvieron en cuenta para su determinación cambian significativamente. Este tendrá en cuenta criterios técnicos y económicos y no podrá ser superior al límite mínimo de potencia establecido por regulación para que una planta de generación pueda ser despachada centralmente*”;

Que la UPME realizó análisis técnicos y económicos consignados en el Documento “Análisis para la definición del límite máximo de potencia de la autogeneración a pequeña escala en el Sistema Interconectado Nacional (SIN)”, y que estos sirvieron de base para la definición del límite de que trata la presente resolución;

Que en mérito de lo expuesto,

RESUELVE:

Artículo 1°. El límite máximo de potencia de la autogeneración a pequeña escala será de **un (1) MW**, y corresponderá a la capacidad instalada del sistema de generación del autogenerador.

Artículo 2°. La presente resolución rige a partir de su publicación en el *Diario Oficial*.

Publíquese y cúmplase.

Dada en Bogotá, D. C., a 5 de junio de 2015.

El Director General,

Jorge Alberto Valencia Marín.

ANEXO C. TABLAS TERMODINÁMICAS

Tablas y Diagramas

TERMODINÁMICOS



3. TABLA: Vapor y Agua Saturado (Según la temperatura)

Temp (°C)	Presión (bar)	v' (m ³ /kg)	v'' (m ³ /kg)	h' (kJ/kg)	h'' (kJ/kg)	s' (kJ/kgK)	s'' (kJ/kgK)
0.01	0.0061120	0.0010002	206.2	0	2501.6	0	9.1575
1.0000	0.0065709	0.0010001	192.44	4.1767	2502.7	0.015260	9.1291
2.0000	0.0070599	0.0010001	179.76	8.3918	2504.6	0.030607	9.1027
3.0000	0.0075808	0.0010001	168.01	12.604	2506.4	0.045888	9.0765
4.0000	0.0081355	0.0010001	157.12	16.813	2508.2	0.061103	9.0505
5.0000	0.0087258	0.0010001	147.01	21.020	2510.1	0.076254	9.0248
6.0000	0.0093536	0.0010001	137.63	25.224	2511.9	0.091342	8.9993
7.0000	0.010021	0.0010001	128.92	29.426	2513.7	0.10637	8.9741
8.0000	0.010730	0.0010002	120.83	33.627	2515.6	0.12133	8.9491
9.0000	0.011483	0.0010003	113.30	37.825	2517.4	0.13624	8.9243
10.000	0.012282	0.0010003	106.30	42.021	2519.2	0.15109	8.8998
11.000	0.013130	0.0010004	99.787	46.216	2521.0	0.16587	8.8754
12.000	0.014028	0.0010005	93.719	50.409	2522.9	0.18061	8.8513
13.000	0.014981	0.0010007	88.064	54.601	2524.7	0.19528	8.8274
14.000	0.015990	0.0010008	82.793	58.792	2526.5	0.20990	8.8037
15.000	0.017058	0.0010009	77.875	62.981	2528.3	0.22446	8.7803
16.000	0.018188	0.0010011	73.286	67.170	2530.2	0.23897	8.7570
17.000	0.019384	0.0010013	69.001	71.357	2532.0	0.25343	8.7339
18.000	0.020647	0.0010014	64.998	75.544	2533.8	0.26783	8.7111
19.000	0.021983	0.0010016	61.256	79.729	2535.6	0.28218	8.6884
20.000	0.023393	0.0010018	57.757	83.914	2537.4	0.29648	8.6660
21.000	0.024882	0.0010021	54.483	88.098	2539.3	0.31073	8.6437
22.000	0.026453	0.0010023	51.418	92.282	2541.1	0.32493	8.6217
23.000	0.028111	0.0010025	48.548	96.465	2542.9	0.33908	8.5998
24.000	0.029858	0.0010028	45.858	100.65	2544.7	0.35318	8.5781
25.000	0.031699	0.0010030	43.337	104.83	2546.5	0.36722	8.5566
26.000	0.033639	0.0010033	40.973	109.01	2548.3	0.38123	8.5353
27.000	0.035681	0.0010035	38.754	113.19	2550.1	0.39518	8.5142
28.000	0.037831	0.0010038	36.672	117.37	2551.9	0.40908	8.4933
29.000	0.040092	0.0010041	34.716	121.55	2553.7	0.42294	8.4725
30.000	0.042470	0.0010044	32.878	125.73	2555.5	0.43675	8.4520
31.000	0.044969	0.0010047	31.151	129.91	2557.3	0.45052	8.4316
32.000	0.047596	0.0010050	29.526	134.09	2559.2	0.46424	8.4113
33.000	0.050354	0.0010054	27.998	138.27	2561.0	0.47792	8.3913
34.000	0.053251	0.0010057	26.560	142.45	2562.8	0.49155	8.3714
35.000	0.056290	0.0010060	25.205	146.63	2564.5	0.50513	8.3517
36.000	0.059479	0.0010064	23.929	150.81	2566.3	0.51867	8.3321
37.000	0.062823	0.0010068	22.727	154.99	2568.1	0.53217	8.3127
38.000	0.066328	0.0010071	21.593	159.17	2569.9	0.54562	8.2935
39.000	0.070002	0.0010075	20.524	163.35	2571.7	0.55903	8.2745
40.000	0.073849	0.0010079	19.515	167.53	2573.5	0.57240	8.2555
41.000	0.077878	0.0010083	18.563	171.71	2575.3	0.58573	8.2368
42.000	0.082096	0.0010087	17.664	175.89	2577.1	0.59901	8.2182
43.000	0.086508	0.0010091	16.814	180.07	2578.9	0.61225	8.1998
44.000	0.091124	0.0010095	16.011	184.25	2580.6	0.62545	8.1815
45.000	0.095950	0.0010099	15.252	188.43	2582.4	0.63861	8.1633
46.000	0.10099	0.0010104	14.534	192.62	2584.2	0.65173	8.1453
47.000	0.10627	0.0010108	13.855	196.80	2586.0	0.66481	8.1275
48.000	0.11177	0.0010112	13.212	200.98	2587.8	0.67785	8.1098
49.000	0.11752	0.0010117	12.603	205.16	2589.5	0.69085	8.0922

Temp (°C)	Presión (bar)	v' (m³/kg)	v'' (m³/kg)	h' (kJ/kg)	h'' (kJ/kg)	s' (kJ/kgK)	s'' (kJ/kgK)
50.000	0.12352	0.0010121	12.027	209.34	2591.3	0.70381	8.0748
51.000	0.12978	0.0010126	11.481	213.52	2593.1	0.71673	8.0576
52.000	0.13631	0.0010131	10.963	217.71	2594.8	0.72961	8.0404
53.000	0.14312	0.0010136	10.472	221.89	2596.6	0.74245	8.0234
54.000	0.15022	0.0010141	10.006	226.07	2598.3	0.75526	8.0066
55.000	0.15762	0.0010146	9.5643	230.26	2600.1	0.76802	7.9898
56.000	0.16533	0.0010151	9.1448	234.44	2601.8	0.78075	7.9732
57.000	0.17336	0.0010156	8.7466	238.62	2603.6	0.79344	7.9568
58.000	0.18171	0.0010161	8.3683	242.81	2605.3	0.80610	7.9404
59.000	0.19041	0.0010166	8.0089	246.99	2607.1	0.81871	7.9242
60.000	0.19946	0.0010171	7.6672	251.18	2608.8	0.83129	7.9081
61.000	0.20888	0.0010177	7.3424	255.37	2610.6	0.84384	7.8922
62.000	0.21867	0.0010182	7.0335	259.55	2612.3	0.85634	7.8764
63.000	0.22885	0.0010188	6.7396	263.74	2614.0	0.86882	7.8607
64.000	0.23943	0.0010193	6.4598	267.93	2615.8	0.88125	7.8451
65.000	0.25042	0.0010199	6.1935	272.12	2617.5	0.89365	7.8296
66.000	0.26183	0.0010204	5.9399	276.30	2619.2	0.90602	7.8142
67.000	0.27368	0.0010210	5.6984	280.49	2621.0	0.91835	7.7990
68.000	0.28599	0.0010216	5.4682	284.68	2622.7	0.93064	7.7839
69.000	0.29876	0.0010222	5.2488	288.87	2624.4	0.94291	7.7689
70.000	0.31201	0.0010228	5.0395	293.07	2626.1	0.95513	7.7540
71.000	0.32575	0.0010234	4.8400	297.26	2627.8	0.96733	7.7392
72.000	0.34000	0.0010240	4.6496	301.45	2629.5	0.97949	7.7246
73.000	0.35478	0.0010246	4.4680	305.64	2631.2	0.99161	7.7100
74.000	0.37009	0.0010252	4.2945	309.84	2632.9	1.0037	7.6955
75.000	0.38595	0.0010258	4.1289	314.03	2634.6	1.0158	7.6812
76.000	0.40239	0.0010265	3.9708	318.22	2636.3	1.0278	7.6670
77.000	0.41941	0.0010271	3.8197	322.42	2638.0	1.0398	7.6528
78.000	0.43703	0.0010277	3.6752	326.62	2639.7	1.0517	7.6388
79.000	0.45527	0.0010284	3.5372	330.81	2641.3	1.0637	7.6249
80.000	0.47414	0.0010291	3.4052	335.01	2643.0	1.0756	7.6111
81.000	0.49367	0.0010297	3.2789	339.21	2644.7	1.0874	7.5973
82.000	0.51387	0.0010304	3.1581	343.41	2646.4	1.0993	7.5837
83.000	0.53476	0.0010311	3.0425	347.61	2648.0	1.1111	7.5702
84.000	0.55635	0.0010317	2.9318	351.81	2649.7	1.1229	7.5567
85.000	0.57867	0.0010324	2.8258	356.01	2651.3	1.1346	7.5434
86.000	0.60173	0.0010331	2.7244	360.22	2653.0	1.1463	7.5302
87.000	0.62556	0.0010338	2.6271	364.42	2654.6	1.1580	7.5170
88.000	0.65017	0.0010345	2.5340	368.63	2656.3	1.1696	7.5040
89.000	0.67558	0.0010352	2.4447	372.83	2657.9	1.1813	7.4910
90.000	0.70182	0.0010360	2.3591	377.04	2659.5	1.1929	7.4781
91.000	0.72890	0.0010367	2.2770	381.25	2661.2	1.2044	7.4653
92.000	0.75684	0.0010374	2.1982	385.46	2662.8	1.2160	7.4526
93.000	0.78568	0.0010381	2.1227	389.67	2664.4	1.2275	7.4400
94.000	0.81541	0.0010389	2.0502	393.88	2666.0	1.2389	7.4275
95.000	0.84608	0.0010396	1.9806	398.09	2667.6	1.2504	7.4151
96.000	0.87771	0.0010404	1.9137	402.30	2669.2	1.2618	7.4027
97.000	0.91030	0.0010411	1.8496	406.52	2670.8	1.2732	7.3904
98.000	0.94390	0.0010419	1.7879	410.73	2672.4	1.2846	7.3783
99.000	0.97852	0.0010427	1.7287	414.95	2674.0	1.2959	7.3661
100.00	1.0142	0.0010435	1.6718	419.17	2675.6	1.3072	7.3541

Vapor de Agua Saturado (Según la Presión)

P (bar)	T (C)	v' (m ³ /kg)	v'' (m ³ /kg)	h' (kJ/kg)	h'' (kJ/kg)	s' (kJ/kgK)	s'' (kJ/kgK)
0.01000	6.9696	0.0010001	129.18	29.299	2513.7	0.10591	8.9749
0.01500	13.019	0.0010007	87.959	54.683	2524.7	0.19556	8.8270
0.02000	17.495	0.0010014	66.987	73.428	2532.9	0.26056	8.7226
0.02500	21.077	0.0010021	54.240	88.420	2539.4	0.31182	8.6420
0.03000	24.079	0.0010028	45.653	100.98	2544.8	0.35429	8.5764
0.03500	26.672	0.0010035	39.466	111.82	2549.5	0.39061	8.5211
0.04000	28.960	0.0010041	34.791	121.39	2553.7	0.42239	8.4734
0.04500	31.012	0.0010047	31.131	129.96	2557.4	0.45069	8.4313
0.05000	32.874	0.0010053	28.185	137.75	2560.7	0.47620	8.3938
0.05500	34.581	0.0010059	25.762	144.88	2563.8	0.49945	8.3599
0.06000	36.159	0.0010065	23.733	151.48	2566.6	0.52082	8.3290
0.06500	37.627	0.0010070	22.009	157.61	2569.3	0.54060	8.3007
0.07000	39.000	0.0010075	20.524	163.35	2571.7	0.55903	8.2745
0.07500	40.290	0.0010080	19.233	168.75	2574.0	0.57627	8.2501
0.08000	41.509	0.0010085	18.099	173.84	2576.2	0.59249	8.2273
0.08500	42.663	0.0010089	17.095	178.67	2578.3	0.60780	8.2060
0.09000	43.761	0.0010094	16.199	183.25	2580.2	0.62230	8.1858
0.09500	44.807	0.0010098	15.396	187.63	2582.1	0.63607	8.1668
0.10000	45.806	0.0010103	14.670	191.81	2583.9	0.64920	8.1488
0.20000	60.058	0.0010172	7.6480	251.42	2608.9	0.83202	7.9072
0.30000	69.095	0.0010222	5.2284	289.27	2624.5	0.94407	7.7675
0.40000	75.857	0.0010264	3.9930	317.62	2636.1	1.0261	7.6690
0.50000	81.317	0.0010299	3.2400	340.54	2645.2	1.0912	7.5930
0.60000	85.926	0.0010331	2.7317	359.91	2652.9	1.1454	7.5311
0.70000	89.932	0.0010359	2.3648	376.75	2659.4	1.1921	7.4790
0.80000	93.486	0.0010385	2.0871	391.71	2665.2	1.2330	7.4339
0.90000	96.687	0.0010409	1.8694	405.20	2670.3	1.2696	7.3943
1.0000	99.606	0.0010432	1.6939	417.50	2674.9	1.3028	7.3588
1.0000	99.606	0.0010432	1.6939	417.50	2674.9	1.3028	7.3588
1.5000	111.35	0.0010527	1.1593	467.13	2693.1	1.4337	7.2230
2.0000	120.21	0.0010605	0.88568	504.70	2706.2	1.5302	7.1269
2.5000	127.41	0.0010672	0.71866	535.34	2716.5	1.6072	7.0524
3.0000	133.52	0.0010732	0.60576	561.43	2724.9	1.6717	6.9916
3.5000	138.86	0.0010786	0.52418	584.26	2732.0	1.7274	6.9401
4.0000	143.61	0.0010836	0.46238	604.65	2738.1	1.7765	6.8955
4.5000	147.90	0.0010882	0.41390	623.14	2743.4	1.8205	6.8560
5.0000	151.83	0.0010925	0.37481	640.09	2748.1	1.8604	6.8207
5.5000	155.46	0.0010967	0.34260	655.76	2752.3	1.8970	6.7886
6.0000	158.83	0.0011006	0.31558	670.38	2756.1	1.9308	6.7592
6.5000	161.98	0.0011044	0.29259	684.08	2759.6	1.9623	6.7322
7.0000	164.95	0.0011080	0.27277	697.00	2762.8	1.9918	6.7071
7.5000	167.75	0.0011114	0.25551	709.24	2765.6	2.0195	6.6836
8.0000	170.41	0.0011148	0.24034	720.86	2768.3	2.0457	6.6616
8.5000	172.94	0.0011180	0.22689	731.95	2770.8	2.0705	6.6409
9.0000	175.35	0.0011212	0.21489	742.56	2773.0	2.0940	6.6213
9.5000	177.66	0.0011242	0.20410	752.74	2775.1	2.1165	6.6027
10.000	179.88	0.0011272	0.19436	762.52	2777.1	2.1381	6.5850
10.000	179.88	0.0011272	0.19436	762.52	2777.1	2.1381	6.5850
11.000	184.06	0.0011330	0.17745	781.03	2780.6	2.1785	6.5520
12.000	187.96	0.0011385	0.16326	798.33	2783.7	2.2159	6.5217
13.000	191.60	0.0011438	0.15119	814.60	2786.5	2.2508	6.4936
14.000	195.04	0.0011489	0.14078	829.97	2788.8	2.2835	6.4675
15.000	198.29	0.0011539	0.13171	844.56	2791.0	2.3143	6.4430
16.000	201.37	0.0011587	0.12374	858.46	2792.8	2.3435	6.4199
17.000	204.31	0.0011634	0.11667	871.74	2794.5	2.3711	6.3981
18.000	207.11	0.0011679	0.11037	884.47	2795.9	2.3975	6.3775
19.000	209.80	0.0011724	0.10470	896.71	2797.2	2.4227	6.3578
20.000	212.38	0.0011767	0.099585	908.50	2798.3	2.4468	6.3390
21.000	214.86	0.0011810	0.094938	919.87	2799.3	2.4699	6.3210

P (bar)	T (C)	v' (m ³ /kg)	v'' (m ³ /kg)	h' (kJ/kg)	h'' (kJ/kg)	s' (kJ/kgK)	s'' (kJ/kgK)
22.000	217.25	0.0011852	0.090698	930.87	2800.1	2.4921	6.3038
23.000	219.56	0.0011894	0.086815	941.53	2800.8	2.5136	6.2872
24.000	221.79	0.0011934	0.083244	951.87	2801.4	2.5343	6.2712
25.000	223.95	0.0011974	0.079949	961.91	2801.9	2.5543	6.2558
26.000	226.05	0.0012014	0.076899	971.67	2802.3	2.5736	6.2409
27.000	228.08	0.0012053	0.074066	981.18	2802.7	2.5924	6.2264
28.000	230.06	0.0012091	0.071429	990.46	2802.9	2.6106	6.2124
29.000	231.98	0.0012129	0.068968	999.51	2803.1	2.6283	6.1988
30.000	233.85	0.0012167	0.066664	1008.3	2803.2	2.6455	6.1856
32.000	237.46	0.0012241	0.062475	1025.4	2803.1	2.6787	6.1602
34.000	240.90	0.0012314	0.058761	1041.8	2802.9	2.7102	6.1360
36.000	244.18	0.0012385	0.055446	1057.6	2802.4	2.7403	6.1129
38.000	247.33	0.0012456	0.052467	1072.8	2801.7	2.7691	6.0908
40.000	250.35	0.0012526	0.049776	1087.5	2800.8	2.7968	6.0696
45.000	257.44	0.0012696	0.044059	1122.2	2797.9	2.8615	6.0197
50.000	263.94	0.0012864	0.039446	1154.6	2794.2	2.9210	5.9737
55.000	269.97	0.0013029	0.035642	1185.1	2789.7	2.9762	5.9307
60.000	275.58	0.0013193	0.032448	1213.9	2784.6	3.0278	5.8901
65.000	280.86	0.0013356	0.029727	1241.4	2778.9	3.0764	5.8516
70.000	285.83	0.0013519	0.027378	1267.7	2772.6	3.1224	5.8148
75.000	290.54	0.0013682	0.025330	1292.9	2765.9	3.1662	5.7793
80.000	295.01	0.0013847	0.023526	1317.3	2758.7	3.2081	5.7450
85.000	299.27	0.0014013	0.021923	1340.9	2751.0	3.2483	5.7117
90.000	303.34	0.0014181	0.020490	1363.9	2742.9	3.2870	5.6791
95.000	307.25	0.0014352	0.019199	1386.2	2734.4	3.3244	5.6473
100.00	311.00	0.0014526	0.018030	1408.1	2725.5	3.3606	5.6160
110.00	318.08	0.0014885	0.015990	1450.4	2706.3	3.4303	5.5545
120.00	324.68	0.0015263	0.014264	1491.5	2685.4	3.4967	5.4939
130.00	330.85	0.0015665	0.012780	1531.5	2662.7	3.5608	5.4336
140.00	336.67	0.0016097	0.011485	1571.0	2637.9	3.6232	5.3727
150.00	342.16	0.0016570	0.010338	1610.2	2610.7	3.6846	5.3106
160.00	347.35	0.0017094	0.0093088	1649.7	2580.8	3.7457	5.2463
170.00	352.29	0.0017693	0.0083709	1690.0	2547.5	3.8077	5.1787
180.00	356.99	0.0018398	0.0075017	1732.1	2509.8	3.8718	5.1061
190.00	361.47	0.0019268	0.0066773	1777.2	2466.0	3.9401	5.0256
200.00	365.75	0.0020400	0.0058652	1827.2	2412.3	4.0156	4.9314
210.00	369.83	0.0022055	0.0049961	1887.6	2338.6	4.1064	4.8079
210.00	369.83	0.0022055	0.0049961	1887.6	2338.6	4.1064	4.8079
210.00	369.83	0.0022055	0.0049961	1887.6	2338.6	4.1064	4.8079

4. TABLA: Vapor sobrecalentado

P=0.1 bar Tsat=45.81°C					P=0.5 bar Tsat=81.317°C				P=1 bar Tsat=99.606°C			
T (°C)	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg·K)	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg·K)	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg·K)
Tsat	14,670	2437,2	2583,9	8,1488	3,2400	2483,2	2645,2	7,5930	1,6939	2505,6	2674,9	7,3588
50	14,867	2443,3	2592,0	8,1741	3,4187	2511,5	2682,4	7,6953	1,6959	2506,2	2675,8	7,3610
100	17,196	2515,5	2687,5	8,4489	3,8897	2585,7	2780,2	7,9413	1,9367	2582,9	2776,6	7,6148
150	19,513	2587,9	2783,0	8,6892	4,3562	2660,0	2877,8	8,1592	2,1724	2658,2	2875,5	7,8356
200	21,826	2661,3	2879,6	8,9049	4,8206	2735,1	2976,1	8,3568	2,4062	2733,9	2974,5	8,0346
250	24,136	2736,1	2977,4	9,1015	5,2840	2811,6	3075,8	8,5386	2,6388	2810,6	3074,5	8,2172
300	26,446	2812,3	3076,7	9,2827	6,2094	2968,9	3279,3	8,8659	3,1027	2968,3	3278,6	8,5452
400	31,063	2969,3	3279,9	9,6094	7,1338	3132,6	3489,3	9,1566	3,5655	3132,2	3488,7	8,8361
500	35,680	3132,9	3489,7	9,8998	8,0576	3303,1	3706,0	9,4201	4,0279	3302,8	3705,6	9,0998
600	40,296	3303,3	3706,3	10,1630	8,9812	3480,6	3929,7	9,6625	4,4900	3480,4	3929,4	9,3424
700	44,911	3480,8	3929,9	10,4060	9,9047	3665,2	4160,4	9,8882	4,9519	3665,0	4160,2	9,5681
800	49,527	3665,3	4160,6	10,6310	10,8280	3856,8	4398,2	10,1000	5,4137	3856,6	4398,0	9,7800
900	54,142	3856,9	4398,3	10,8430	11,7510	4055,1	4642,7	10,3000	5,8754	4055,0	4642,6	9,9800
1000	58,758	4055,2	4642,8	11,0430	12,6740	4257,4	4891,1	10,4859	6,3370	4257,3	4891,0	10,1659
1100	63,372	4257,5	4891,2	11,2287	13,5970	4467,8	5147,7	10,6662	6,7990	4467,7	5147,6	10,3463
1200	67,987	4467,9	5147,8	11,4091	14,5210	4683,6	5409,6	10,8382	7,2600	4683,5	5409,5	10,5183
1300	72,602	4683,7	5409,7	11,5811								

P=2 bar Tsat=120.21°C					P=3 bar Tsat=133.52°C				P=4 bar Tsat=143.61°C			
T (°C)	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg·K)	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg·K)	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg·K)
Tsat	0,88568	2529,1	2706,2	7,1269	0,60576	2543,2	2724,9	6,9916	0,46238	2553,1	2738,1	6,8955
150	0,95986	2577,1	2769,1	7,2810	0,63401	2571,0	2761,2	7,0791	0,47088	2564,4	2752,8	6,9306
200	1,08050	2654,6	2870,7	7,5081	0,71642	2651,0	2865,9	7,3131	0,53433	2647,2	2860,9	7,1723
250	1,19890	2731,4	2971,2	7,7100	0,79644	2728,9	2967,9	7,5180	0,59520	2726,4	2964,5	7,3804
300	1,31620	2808,8	3072,1	7,8941	0,87534	2807,0	3069,6	7,7037	0,65489	2805,1	3067,1	7,5677
400	1,54930	2967,1	3277,0	8,2236	1,03150	2966,0	3275,5	8,0347	0,77264	2964,9	3273,9	7,9002
500	1,78140	3131,4	3487,7	8,5152	1,18670	3130,6	3486,6	8,3271	0,88936	3129,8	3485,5	8,1933
600	2,01300	3302,2	3704,8	8,7792	1,34140	3301,6	3704,0	8,5914	1,00560	3301,0	3703,2	8,4580
700	2,24430	3479,9	3928,8	9,0220	1,49580	3479,5	3928,2	8,8344	1,12150	3479,0	3927,6	8,7012
800	2,47550	3664,7	4159,8	9,2479	1,65000	3664,3	4159,3	9,0604	1,23730	3663,9	4158,8	8,9273
900	2,70660	3856,3	4397,6	9,4598	1,80420	3856,0	4397,3	9,2724	1,35300	3855,7	4396,9	9,1394
1000	2,93750	4054,8	4642,3	9,6599	1,95820	4054,5	4642,0	9,4726	1,46860	4054,3	4641,7	9,3396
1100	3,16800	4257,0	4890,7	9,8458	2,11210	4256,8	4890,4	9,6585	1,58400	4256,5	4890,2	9,5256
1200	3,39900	4467,5	5147,3	10,0262	2,26610	4467,2	5147,1	9,8389	1,69960	4467,0	5146,8	9,7060
1300	3,63000	4683,2	5409,3	10,1982	2,42010	4683,0	5409,0	10,0110	1,81510	4682,8	5408,8	9,8780

T (°C)	P=5 bar Tsat=151.83°C			
	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg·K)
Tsat	0,37481	2560,7	2748,1	6,8207
200	0,42503	2643,3	2855,8	7,0610
250	0,47443	2723,8	2961,0	7,2724
300	0,52261	2803,2	3064,6	7,4614
350	0,57015	2883,0	3168,1	7,6346
400	0,61730	2963,7	3272,3	7,7955
500	0,71094	3129,0	3484,5	8,0892
600	0,80409	3300,4	3702,5	8,3543
700	0,89696	3478,5	3927,0	8,5977
800	0,98966	3663,6	4158,4	8,8240
900	1,08230	3855,4	4396,6	9,0362
1000	1,17480	4054,0	4641,4	9,2364
1100	1,26720	4256,3	4889,9	9,4224
1200	1,35960	4466,8	5146,6	9,6029
1300	1,45210	4682,5	5408,6	9,7749

T (°C)	P=6 bar Tsat=158.83°C			
	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg·K)
Tsat	0,31558	2566,8	2756,1	6,7592
200	0,35212	2639,3	2850,6	6,9683
250	0,39390	2721,2	2957,6	7,1832
300	0,43442	2801,4	3062,0	7,3740
350	0,47427	2881,6	3166,1	7,5481
400	0,51374	2962,5	3270,8	7,7097
500	0,59200	3128,2	3483,4	8,0041
600	0,66976	3299,8	3701,7	8,2695
700	0,74725	3478,1	3926,4	8,5131
800	0,82457	3663,2	4157,9	8,7395
900	0,90178	3855,1	4396,2	8,9518
1000	0,97893	4053,7	4641,1	9,1521
1100	1,05590	4256,1	4889,6	9,3381
1200	1,13300	4466,5	5146,3	9,5185
1300	1,21010	4682,3	5408,3	9,6906

T (°C)	P=8 bar Tsat=143.61°C			
	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg·K)
Tsat	0,24034	2576,0	2768,3	6,6616
200	0,26088	2631,0	2839,7	6,8176
250	0,29320	2715,9	2950,4	7,0401
300	0,32416	2797,5	3056,9	7,2345
350	0,35442	2878,6	3162,2	7,4106
400	0,38428	2960,2	3267,6	7,5734
500	0,44332	3126,6	3481,3	7,8692
600	0,50185	3298,7	3700,1	8,1354
700	0,56011	3477,2	3925,3	8,3794
800	0,61820	3662,4	4157,0	8,6061
900	0,67619	3854,5	4395,5	8,8185
1000	0,73411	4053,2	4640,5	9,0189
1100	0,79190	4255,6	489,1	9,2050
1200	0,84970	4466,1	5145,9	9,3855
1300	0,90760	4681,8	5407,9	9,5575

T (°C)	P=10 bar Tsat=179.88°C			
	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg·K)
Tsat	0,19436	2582,7	2777,1	6,5850
200	0,20602	2622,2	2828,3	6,6955
250	0,23275	2710,4	2943,1	6,9265
300	0,25799	2793,6	3051,6	7,1246
350	0,28250	2875,7	3158,2	7,3029
400	0,30661	2957,9	3264,5	7,4669
500	0,35411	3125,0	3479,1	7,7641
600	0,40111	3297,5	3698,6	8,0310
700	0,44783	3476,2	3924,1	8,2755
800	0,49438	3661,7	4156,1	8,5024
900	0,54083	3853,9	4394,8	8,7150
1000	0,58721	4052,7	4639,9	8,9155
1100	0,63350	4255,1	4888,6	9,1017
1200	0,67980	4465,6	5145,4	9,2822
1300	0,72610	4681,3	5407,4	9,4543

T (°C)	P=12 bar Tsat=187.92°C			
	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg·K)
Tsat	0,16326	2587,8	2783,7	6,5217
200	0,16934	2612,9	2816,1	6,5909
250	0,19241	2704,7	2935,6	6,8313
300	0,21386	2789,7	3046,3	7,0335
350	0,23455	2872,7	3154,2	7,2139
400	0,25482	2955,5	3261,3	7,3793
500	0,29464	3123,4	3476,9	7,6779
600	0,33394	3296,3	3697,0	7,9455
700	0,37297	3475,3	3922,9	8,1904
800	0,41184	3661,0	4155,2	8,4176
900	0,45059	3853,3	4394,0	8,6303
1000	0,48928	4052,2	4639,4	8,8310
1100	0,52780	4050,0	4888,0	9,0172
1200	0,56650	5254,6	5144,9	9,1977
1300	0,60510	4680,9	5407,0	9,3698

T (°C)	P=14 bar Tsat=195.04°C			
	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg·K)
Tsat	0,14078	2591,8	2788,8	6,4675
200	0,14303	2602,7	2803,0	6,4975
250	0,16356	2698,9	2927,9	6,7488
300	0,18232	2785,7	3040,9	6,9552
350	0,20029	2869,7	3150,1	7,1379
400	0,21782	2953,1	3258,1	7,3046
500	0,25216	3121,8	3474,8	7,6047
600	0,28597	3295,1	3695,4	7,8730
700	0,31951	3474,4	3921,7	8,1183
800	0,35287	3660,2	4154,3	8,3457
900	0,38614	3852,7	4393,3	8,5587
1000	0,41933	4051,7	4638,8	8,7594
1100	0,45240	4254,1	4887,5	8,9157
1200	0,48550	4464,7	5144,4	9,1262
1300	0,51860	4680,4	5406,5	9,2984

		P=16 bar Tsat=201.37°C			
T (°C)	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg·K)	
Tsat	0,12374	2594,8	2792,8	6,4199	
225	0,13293	2645,1	2857,8	6,5537	
250	0,14190	2692,9	2919,9	6,6753	
300	0,15866	2781,6	3035,4	6,8863	
350	0,17459	2866,6	3146,0	7,0713	
400	0,19007	2950,7	3254,9	7,2394	
500	0,22029	3120,1	3472,6	7,5409	
600	0,24999	3293,9	3693,9	7,8100	
700	0,27940	3473,5	3920,5	8,0557	
800	0,30865	3659,5	4153,3	8,2834	
900	0,33780	3852,1	4392,6	8,4965	
1000	0,36687	4051,2	4638,2	8,6974	
1100	0,39580	4253,7	4887,0	8,8837	
1200	0,42480	4464,2	5143,9	9,0643	
1300	0,45380	4679,9	5406,0	9,2364	

		P=18 bar Tsat=207.11°C			
T (°C)	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg·K)	
Tsat	0,11037	2597,2	2795,9	6,3775	
225	0,11678	2637,0	2847,2	6,4824	
250	0,12502	2686,7	2911,7	6,6087	
300	0,14025	2777,4	3029,9	6,8246	
350	0,15460	2863,6	3141,8	7,0120	
400	0,16849	2948,3	3251,6	7,1814	
500	0,19551	3118,5	3470,4	7,4845	
600	0,22200	3292,7	3692,3	7,7543	
700	0,24821	3472,6	3919,4	8,0004	
800	0,27426	3658,8	4152,4	8,2284	
900	0,30020	3851,5	4391,9	8,4416	
1000	0,32606	4050,7	4637,6	8,6426	
1100	0,35180	4253,2	4886,4	8,8290	
1200	0,37760	4463,7	5143,9	9,0096	
1300	0,40340	4679,5	5405,6	9,1818	

		P=20 bar Tsat=212.38°C			
T (°C)	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg·K)	
Tsat	0,09959	2599,1	2798,3	6,3390	
225	0,10381	2628,5	2836,1	6,4160	
250	0,11150	2680,2	2903,2	6,5475	
300	0,12551	2773,2	3024,2	6,7684	
350	0,13860	2860,5	3137,7	6,9583	
400	0,15121	2945,9	3248,3	7,1292	
500	0,17568	3116,9	3468,2	7,4337	
600	0,19961	3291,5	3690,7	7,7043	
700	0,22326	3471,6	3918,2	7,9509	
800	0,24674	3658,0	4151,5	8,1790	
900	0,27012	3850,9	4391,1	8,3925	
1000	0,29342	4050,2	4637,0	8,5936	
1100	0,31660	4252,7	4885,9	8,7800	
1200	0,33980	4459,3	5142,9	8,9607	
1300	0,36310	4679,0	5405,1	9,1329	

		P=25 bar Tsat=223.95°C			
T (°C)	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg·K)	
Tsat	0,079949	2602,1	2801,9	6,2558	
225	0,080260	2604,8	2805,5	6,2629	
250	0,087053	2663,3	2880,9	6,4107	
300	0,098937	2762,2	3009,6	6,6459	
350	0,109790	2852,5	3127,0	6,8424	
400	0,120120	2939,8	3240,1	7,0170	
450	0,130150	3026,2	3351,6	7,1767	
500	0,139990	3112,8	3462,7	7,3254	
600	0,159310	3288,5	3686,8	7,5979	
700	0,178350	3469,3	3915,2	7,8455	
800	0,197210	3656,2	4149,2	8,0743	
900	0,215970	3849,4	4389,3	8,2882	
1000	0,234660	4048,9	4635,6	8,4896	
1100	0,253200	4251,5	4884,6	8,6762	
1200	0,271800	4462,1	5141,7	8,8569	
1300	0,290500	4677,8	5404,0	9,0291	

		P=30 bar Tsat=233.85°C			
T (°C)	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg·K)	
Tsat	0,066666	2603,2	2803,2	6,1856	
225					
250	0,07063	2644,7	2856,5	6,2893	
300	0,08118	2750,8	2994,3	6,5412	
350	0,09056	2844,4	3116,1	6,7449	
400	0,09938	2933,5	3231,7	6,9234	
450	0,10789	3021,2	3344,8	7,0856	
500	0,11620	3108,6	3457,2	7,2359	
600	0,13245	3285,5	3682,8	7,5103	
700	0,14841	3467,0	3912,2	7,7590	
800	0,16420	3654,3	4146,9	7,9885	
900	0,17988	3847,9	4387,5	8,2028	
1000	0,19549	4047,7	4634,1	8,4045	
1100	0,21098	4250,3	4883,3	8,5912	
1200	0,22652	4460,9	5140,5	8,7720	
1300	0,24206	4676,6	5402,8	8,9442	

		P=35 bar Tsat=242.86°C			
T (°C)	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg·K)	
Tsat	0,05706	2602,9	2802,6	6,1243	
225					
250	0,05876	2624,0	2829,7	6,1764	
300	0,06845	2738,8	2978,4	6,4484	
350	0,07680	2836,0	3104,8	6,6601	
400	0,08456	2927,2	3223,2	6,8427	
450	0,09198	3016,1	3338,0	7,0074	
500	0,09920	3104,5	3451,6	7,1593	
600	0,11325	3282,5	3678,9	7,4356	
700	0,12702	3464,7	3909,3	7,6854	
800	0,14061	3652,5	4144,6	7,9156	
900	0,15410	3846,4	4385,7	8,1303	
1000	0,16751	4046,4	4632,7	8,3324	
1100	0,18080	4249,2	4881,9	8,5192	
1200	0,19415	4459,8	5139,3	8,7000	
1300	0,20749	4675,5	5401,7	8,8723	

		P=40 bar		Ts _{sat} =250.35°C	
T (°C)		v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg·K)
Tsat		0,049776	2601,7	2800,8	6,0696
275		0,054607	2668,9	2887,3	6,2312
300		0,058870	2726,2	2961,7	6,3639
350		0,066473	2827,4	3093,3	6,5843
400		0,073431	2920,7	3214,5	6,7714
450		0,080043	3011,0	3331,2	6,9386
500		0,086442	3100,3	3446,0	7,0922
600		0,098859	3279,4	3674,9	7,3705
700		0,110980	3462,4	3906,3	7,6214
800		0,122920	3650,6	4142,3	7,8523
900		0,134760	3844,8	4383,9	8,0674
1000		0,146520	4045,1	4631,2	8,2697
1100		0,158170	4248,0	4880,6	8,5467
1200		0,169870	4458,6	5138,1	8,6376
1300		0,181560	4674,3	5400,5	8,8100

		P=45 bar		Ts _{sat} =257.44°C	
T (°C)		v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg·K)
Tsat		0,044059	2599,7	2797,9	6,0197
275		0,047333	2651,3	2864,3	6,1429
300		0,051378	2713,0	2944,2	6,2854
350		0,058423	2818,6	3081,5	6,5153
400		0,064772	2914,2	3205,6	6,7070
450		0,070756	3005,8	3324,2	6,8770
500		0,076521	3096,0	3440,4	7,0323
600		0,087662	3276,4	3670,9	7,3127
700		0,098500	3460,0	3903,3	7,5646
800		0,109160	3648,8	4140,0	7,7962
900		0,119720	3843,3	4382,1	8,0118
1000		0,130200	4043,9	4629,8	8,2144
1100		0,140560	4264,8	4879,3	8,4015
1200		0,150980	4457,5	5136,9	8,5825
1300		0,161390	4673,1	5399,4	8,7549

		P=50 bar		Ts _{sat} =263.94°C	
T (°C)		v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg·K)
Tsat		0,039446	2597,0	2794,2	5,9737
275		0,041439	2632,3	2839,5	6,0571
300		0,045346	2699,0	2925,7	6,2110
350		0,051969	2809,5	3069,3	6,4516
400		0,057837	2907,5	3196,7	6,6483
450		0,063323	3000,6	3317,2	6,8210
500		0,068583	3091,7	3434,7	6,9781
600		0,078704	3273,3	3666,8	7,2605
700		0,088518	3457,7	3900,3	7,5136
800		0,098158	3646,9	4137,7	7,7458
900		0,107690	3841,8	4380,2	7,9618
1000		0,117150	4042,6	4628,3	8,1648
1100		0,126480	4245,6	4878,0	8,3520
1200		0,135870	4456,3	5135,7	8,5331
1300		0,145260	4672,0	5398,2	8,7055

		P=60 bar		Ts _{sat} =275.58°C	
T (°C)		v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg·K)
Tsat		0,032448	2589,9	2784,6	5,8901
300		0,036189	2668,4	2885,5	6,0703
350		0,042251	2790,4	3043,9	6,3357
400		0,047419	2893,7	3178,2	6,5432
450		0,052166	2989,9	3302,9	6,7219
500		0,056671	3083,1	3423,1	6,8826
550		0,061021	3175,2	3541,3	7,0307
600		0,065265	3267,2	3658,7	7,1693
700		0,073545	3453,0	3894,3	7,4246
800		0,081648	3643,2	4133,1	7,6582
900		0,089641	3838,8	4376,6	7,8751
1000		0,097560	4040,1	4625,4	8,0786
1100		0,105360	4243,3	4875,4	8,2661
1200		0,113210	4454,0	5133,3	8,4474
1300		0,121060	4669,6	5396,0	8,6199

		P=70 bar		Ts _{sat} =285.83°C	
T (°C)		v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg·K)
Tsat		0,027378	2581,0	2772,6	5,8148
275		0,029492	2633,5	2839,9	5,9337
300		0,035262	2770,1	3016,9	6,2304
350		0,039958	2879,5	3159,2	6,4502
400		0,044187	2979,0	3288,3	6,6353
450		0,048157	3074,3	3411,4	6,8000
500		0,051966	3167,9	3531,6	6,9506
600		0,055665	3260,9	3650,6	7,0910
700		0,062850	3448,3	3888,2	7,3486
800		0,069855	3639,5	4128,4	7,5836
900		0,076750	3835,7	4373,0	7,8014
1000		0,083571	4037,5	4622,5	8,0055
1100		0,090270	4240,9	4872,8	8,1933
1200		0,097030	4451,7	5130,9	8,3747
1300		0,103770	4667,3	5393,7	8,5473

		P=80 bar		Ts _{sat} =295.01°C	
T (°C)		v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg·K)
Tsat		0,023526	2570,5	2758,7	5,7450
275		0,024279	2592,3	2786,5	5,7937
300		0,029975	2748,3	2988,1	6,1321
350		0,034344	2864,6	3139,4	6,3658
400		0,038194	2967,8	3273,3	6,5579
450		0,041767	3065,4	3399,5	6,7266
500		0,045172	3160,5	3521,8	6,8799
600		0,048463	3254,7	3642,4	7,0221
700		0,054828	3443,6	3882,2	7,2821
800		0,061011	3635,7	4123,8	7,5184
900		0,067082	3832,6	4369,3	7,7371
1000		0,073079	4035,0	4619,6	7,9419
1100		0,078960	4238,6	4870,3	8,1300
1200		0,084890	4449,5	5128,5	8,3115
1300		0,090800	4665,0	5391,5	8,4812

		P=90 bar		Tsat=303.34°C	
T (°C)	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg*K)	
Tsat	0,020490	2558,5	2742,9	5,6791	
325	0,023284	2647,6	2857,1	5,8738	
350	0,025816	2724,9	2957,3	6,0380	
400	0,029960	2849,2	3118,8	6,2876	
450	0,033524	2956,3	3258,0	6,4872	
500	0,036793	3056,3	3387,4	6,6603	
550	0,039885	3153,0	3512,0	6,8164	
600	0,042861	3248,4	3634,1	6,9605	
650	0,045755	3343,4	3755,2	7,0953	
700	0,048589	3438,8	3876,1	7,2229	
800	0,054132	3632,0	4119,1	7,4606	
900	0,059562	3829,6	4365,7	7,6802	
1000	0,064918	4032,4	4616,7	7,8855	
1100	0,070160	4236,3	4867,7	8,0740	
1200	0,075440	4447,2	5126,2	8,2556	
1300	0,080720	4662,7	5389,2	8,4284	

		P=100 bar		Tsat=311°C	
T (°C)	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg*K)	
Tsat	0,018030	2545,2	2725,5	5,6160	
325	0,019877	2611,6	2810,3	5,7596	
350	0,022440	2699,6	2924,0	5,9459	
400	0,026436	2833,1	3097,4	6,2141	
450	0,029782	2944,5	3242,3	6,4219	
500	0,032811	3047,0	3375,1	6,5995	
550	0,035654	3145,4	3502,0	6,7585	
600	0,038378	3242,0	3625,8	6,9045	
650	0,041018	3337,9	3748,1	7,0408	
700	0,043597	3434,0	3870,0	7,1693	
800	0,048629	3628,2	4114,5	7,4085	
900	0,053547	3826,5	4362,0	7,6290	
1000	0,058390	4029,9	4613,8	7,8349	
1100	0,063120	4234,0	4865,1	8,0237	
1200	0,067890	4444,9	5123,8	8,2055	
1300	0,072650	4460,5	5387,0	8,3783	

		P=125 bar		Tsat=327.81°C	
T (°C)	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg*K)	
Tsat	0,013496	2505,6	2674,3	5,4638	
325	0,016138	2624,8	2826,6	5,7130	
350	0,020030	2789,6	3040,0	6,0433	
400	0,023019	2913,7	3201,4	6,2749	
450	0,025630	3023,2	3343,6	6,4650	
500	0,028033	3126,1	3476,5	6,6317	
550	0,030306	3225,8	3604,6	6,7828	
600	0,032490	3324,1	3730,2	6,9227	
650	0,034612	3422,0	3854,6	7,0539	
700	0,038724	3618,7	4102,8	7,2967	
800	0,042720	3818,9	4352,9	7,5194	
900	0,046641	4023,5	4606,5	7,7269	
1000	0,050450	4228,2	4858,8	7,9165	
1100	0,054300	4439,3	5118,0	8,0987	
1200	0,058130	4654,8	5381,4	8,2717	

		P=150 bar		Tsat=342.52°C	
T (°C)	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg*K)	
Tsat	0,010338	2455,6	2610,7	5,3106	
350	0,011481	2520,9	2693,1	5,4437	
400	0,015671	2740,6	2975,7	5,8819	
450	0,018477	2880,7	3157,9	6,1434	
500	0,020827	2998,4	3310,8	6,3480	
550	0,022945	3106,2	3450,4	6,5230	
600	0,024921	3209,3	3583,1	6,6796	
650	0,026804	3310,1	3712,1	6,8233	
700	0,028621	3409,8	3839,1	6,9572	
800	0,032121	3609,2	4091,1	7,2037	
900	0,035503	3811,2	4343,7	7,4288	
1000	0,038808	4017,1	4599,2	7,6378	
1100	0,042000	4222,6	4952,6	7,8283	
1200	0,045230	4433,8	5112,3	8,0108	
1300	0,048450	4649,1	5376,0	8,1840	

		P=175 bar		Tsat=354.67°C	
T (°C)	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg*K)	
Tsat	0,007929	2390,5	2529,3	5,1431	
325	0,012463	2684,3	2902,4	5,7211	
350	0,015204	2845,4	3111,4	6,0212	
400	0,017385	2972,4	3276,7	6,2424	
450	0,019305	3085,8	3423,6	6,4266	
500	0,021073	3192,5	3561,3	6,5890	
550	0,022742	3295,8	3693,8	6,7366	
600	0,024342	3397,5	3823,5	6,8734	
650	0,027405	3599,7	4079,3	7,1236	
700	0,030348	3803,4	4334,5	7,3511	
800	0,033215	4010,7	4592,0	7,5616	
900	0,035970	4216,9	4846,4	7,7531	
1000	0,038760	4428,3	5106,6	7,9360	
1100	0,0415400	4643,5	5370,5	8,1093	

		P=200 bar		Tsat=365.75°C	
T (°C)	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg*K)	
Tsat	0,005865	2295,0	2412,3	4,9314	
325	0,009950	2617,9	2816,9	5,5525	
350	0,012721	2807,2	3061,7	5,9043	
400	0,014793	2945,3	3241,2	6,1446	
450	0,016571	3064,7	3396,1	6,3389	
500	0,018185	3175,3	3539,0	6,5075	
550	0,019695	3281,4	3675,3	6,6593	
600	0,021133	3385,1	3807,8	6,7990	
650	0,023869	3590,1	4067,5	7,0531	
700	0,026483	3795,7	4325,4	7,2829	
800	0,029020	4004,3	4584,7	7,4950	
900	0,031450	4211,3	4840,2	7,6874	
1000	0,033910	4422,8	5101,0	7,8707	
1100	0,036360	4638,0	5360,1	8,0442	

P=250 bar				
T (°C)	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg·K)
375	0,001978	1799,9	1849,4	4,0344
400	0,006005	2428,5	2578,6	5,1400
425	0,007886	2607,8	2805,0	5,4707
450	0,009176	2721,2	2950,6	5,6759
500	0,011143	2887,3	3165,9	5,9642
550	0,012736	3020,8	3339,2	6,1816
600	0,014140	3140,0	3493,5	6,3637
650	0,015430	3251,9	3637,7	6,5242
700	0,016643	3359,9	3776,0	6,6702
800	0,018922	3570,7	4043,8	6,9322
900	0,021075	3780,2	4307,1	7,1668
1000	0,023150	3991,5	4570,2	7,3820
1100	0,025120	4200,2	4828,2	7,5765
1200	0,025120	4412,0	5089,9	7,7605
1300	0,029100	4626,9	5354,4	7,9342

P=300 bar				
v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg·K)	
0,001792	1738,1	1791,8	3,9313	
0,002798	2068,9	2152,8	4,4757	
0,005299	2452,8	2611,8	5,1473	
0,006737	2618,9	2821,0	5,4421	
0,008690	2824,0	3084,7	5,7956	
0,010175	2974,5	3279,7	6,0402	
0,011445	3103,4	3446,7	6,2373	
0,012589	3221,7	3599,4	6,4074	
0,013653	3334,3	3743,9	6,5598	
0,015628	3551,2	4020,0	6,8300	
0,017473	3764,6	4288,8	7,0695	
0,019240	3978,6	4555,8	7,2880	
0,020903	4189,2	4816,3	7,4845	
0,022589	4401,3	5079,8	7,6692	
0,024266	4616,0	5344,0	7,8432	

P=350 bar				
v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg·K)	
0,001701	1702,8	1762,4	3,8724	
0,002105	1914,9	1988,6	4,2143	
0,003434	2253,3	2373,4	4,7751	
0,004957	2497,5	2671,0	5,1945	
0,006933	2755,3	2997,9	5,6331	
0,008348	2925,8	3218,0	5,9092	
0,009523	3065,6	3398,9	6,1228	
0,010565	3190,9	3560,7	6,3030	
0,011523	3308,3	3711,6	6,4622	
0,013278	3531,5	3996,3	6,7409	
0,014904	3748,9	4270,6	6,9853	
0,016450	3965,8	4541,5	7,2069	
0,017895	4178,3	4804,6	7,4057	
0,019360	4390,7	5068,3	7,5910	
0,020815	4605,1	5333,6	7,7653	

P=400 bar				
T (°C)	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg·K)
375	0,001641	1677,0	1742,6	3,8290
400	0,001911	1854,9	1931,4	4,1145
425	0,002538	2097,5	2199,0	4,5044
450	0,003692	2364,2	2511,8	4,9448
500	0,005623	2681,6	2906,5	5,4744
550	0,006985	2875,0	3154,4	5,7857
600	0,008089	3026,8	3350,4	6,0170
650	0,009053	3159,5	3521,6	6,2078
700	0,009930	3282,0	3679,1	6,3740
800	0,011521	3511,8	3972,6	6,6612
900	0,012980	3733,3	4252,5	6,9106
1000	0,014360	3952,9	4527,3	7,1355
1100	0,015642	4167,4	4793,1	7,3365
1200	0,016940	4380,1	5057,7	7,5224
1300	0,018229	4594,3	5323,5	7,6969

P=500 bar				
v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg·K)	
0,001560	1638,6	1716,6	3,7642	
0,001731	1787,8	1874,4	4,0029	
0,002009	1960,2	2060,7	4,2746	
0,002487	2160,3	2284,7	4,5896	
0,003890	2528,1	2722,6	5,1762	
0,005118	2769,5	3025,3	5,5563	
0,006108	2947,1	3252,5	5,8245	
0,006957	3095,6	3443,4	6,0373	
0,007717	3228,7	3614,6	6,2178	
0,009072	3472,2	3925,8	6,5225	
0,010296	3702,0	4216,8	6,7819	
0,011441	3927,3	4499,4	7,0131	
0,012496	4145,7	4770,5	7,2184	
0,013561	4359,1	5037,2	7,4058	
0,014616	4572,8	5303,6	7,5808	

P=600 bar				
v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg·K)	
0,001503	1609,7	1699,9	3,7149	
0,001633	1745,2	1843,2	3,9317	
0,001816	1892,9	2001,8	4,1630	
0,002086	2055,1	2180,2	4,4140	
0,002952	2393,2	2570,3	4,9356	
0,003955	2664,5	2901,9	5,3517	
0,004833	2866,8	3156,8	5,6527	
0,005591	3031,3	3366,7	5,8867	
0,006265	3175,4	3551,3	6,0814	
0,007456	3432,6	3880,0	6,4033	
0,008519	3670,9	4182,0	6,6725	
0,009504	3901,9	4472,2	6,9099	
0,010409	4124,1	4748,6	7,1195	
0,011317	4338,2	5017,2	7,3083	
0,012215	4551,4	5284,3	7,4837	

5. TABLA : Agua – Líquido comprimido

T	P = 50 bar (263,99)				P = 100 bar (311,06)				P = 150 bar (342,24)			
	v	u	h	s	v	u	h	s	v	u	h	s
Sat.	0,0012859	1147,8	1154,1	2,9202	0,0014524	1393	1407,6	3,3596	0,0016581	1585,6	1610,5	3,6848
0	0,0009977	0,04	5,04	0,0001	0,0009952	0,09	10,04	0,0002	0,0009928	0,15	15,05	0,0004
20	0,0009995	83,65	88,65	0,2956	0,0009972	83,36	93,33	0,2945	0,000995	83,06	97,99	0,2934
40	0,0010056	166,95	171,97	0,5705	0,0010034	166,35	176,38	0,5686	0,0010013	165,76	180,78	0,5666
60	0,0010149	250,23	255,3	0,8285	0,0010127	249,36	259,49	0,8258	0,0010105	248,51	263,67	0,8232
80	0,0010268	333,72	338,85	1,072	0,0010245	332,29	342,83	1,0688	0,0010222	331,48	346,81	1,0656
100	0,001041	417,52	422,72	1,303	0,0010385	416,12	426,5	1,2992	0,0010361	414,74	430,28	1,2955
120	0,0010576	501,8	507,09	1,5233	0,0010549	500,08	510,64	1,5189	0,0010522	498,4	514,19	1,5145
140	0,0010768	586,76	592,15	1,7343	0,0010737	584,68	595,42	1,7292	0,0010707	582,66	598,72	1,7242
160	0,0010988	672,62	678,12	1,9375	0,0010953	670,13	681,08	1,9317	0,0010918	667,71	684,09	1,926
180	0,001124	759,63	765,25	2,4341	0,0011199	756,65	767,84	2,1276	0,0011159	753,76	770,5	2,121
200	0,001153	848,1	853,9	2,3255	0,001148	844,5	856	2,3178	0,0011433	841	858,2	2,104
220	0,0011866	938,4	944,4	2,5128	0,0011805	934,1	945,9	2,5039	0,0011748	929,9	947,5	2,4958
240	0,0012264	1031,4	1037,5	2,6979	0,0012187	1026	1038,1	2,6872	0,0012114	1020,8	1039	2,6771
260	0,0012749	1127,9	1134,5	2,883	0,0012645	1121,1	1133,7	2,8699	0,001255	1114,6	1133,4	2,8576
280					0,0013216	1220,9	1234,7	3,0548	0,0013084	1212,5	1232,1	3,0393
300					0,0013972	1328,4	1342,3	3,2469	0,001377	1316,6	1337,3	3,226
320									0,0014724	1431,1	1453,2	3,4247
340									0,0016311	1567,5	159,9	3,6546

Agua. Líquido comprimido (cont.)

T	P = 200 bar (365,81)				P = 300 bar				P = 500 bar			
	v	u	h	s	v	u	h	s	v	u	h	s
Sat.	0,002036	1785,6	18265	4,0139								
0	0,0009904	0,19	20,01	0,0004	0,0009856	0,25	29,82	0,0001	0,0009766	0,2	49,03	0,0014
20	0,0009928	82,77	102,62	0,2923	0,0009886	82,17	111,84	0,2899	0,0009804	81	130,02	0,2848
40	0,0009992	165,17	185,16	0,5646	0,0009951	164,04	193,89	0,5607	0,0009872	161,86	211,21	0,5527
60	0,0010084	247,68	267,85	0,8206	0,0010042	246,06	276,19	0,8154	0,009962	242,98	292,79	0,8053
80	0,0010199	330,4	350,8	1,0624	0,0010156	328,3	358,77	1,0561	0,0010073	324,34	374,7	1,044
100	0,0010337	413,39	434,06	1,2917	0,001029	410,78	441,56	1,2844	0,0010201	405,88	456,89	1,2703
120	0,0010496	496,76	517,76	1,5102	0,0010445	493,59	524,93	1,5018	0,0010348	487,65	539,39	1,4857
140	0,0010678	580,69	602,04	1,7193	0,0010621	576,88	608,75	1,7098	0,0010515	569,77	622,35	1,6915
160	0,0010885	665,35	687312	1,9204	0,0010821	660,82	693,28	1,9096	0,0010703	652,41	705,92	1,8891
180	0,001112	750,95	773,2	2,1147	0,0011047	745,59	778,79	2,1024	0,0010912	735,69	790,25	2,0794
200	0,0011388	837,7	860,5	2,3031	0,0011302	831,4	865,3	2,2893	0,0011146	819,7	875,5	2,2634
220	0,0011693	925,9	949,3	2,487	0,0011159	918,3	953,1	2,4711	0,0011408	904,7	961,7	2,4419
240	0,0012046	1016	1040	2,6674	0,0011192	1006,9	1042,6	2,649	0,0011702	990,7	1049,2	2,6158
260	0,0012462	1108,6	1133,5	2,8459	0,0012303	1097,4	1134,3	2,8243	0,0012034	1078,1	1138,2	2,786
280	0,0012965	1204,7	1230,6	3,0248	0,0012755	1190,7	1229	2,9986	0,0012415	1167,2	1229,3	2,9537
300	0,0013596	1306,1	1333,3	3,2071	0,0013304	1287,9	1327,8	3,1741	0,001286	1256,7	1323	3,12
320	0,0014437	1415,7	1444,6	3,3979	0,0013997	1390,7	1432,7	3,3539	0,0013388	1353,3	1420,2	3,2868
340	0,0015684	1539,7	1571	3,6075	0,001492	1501,7	1546,5	3,5426	0,0014032	1452	1522,1	3,4557
360	0,0018226	1702,8	1739,3	3,8772	0,0016265	1626,6	1675,4	3,7494	0,0014838	1556	1630,2	3,6291
380					0,0018691	1781,4	1837,5	4,0012	0,0015884	1667,2	1746,6	3,8101

ANEXO D. PODER CALORÍFICO DE ALGUNOS COMBUSTIBLES

TABLAS DE PODER CALORÍFICO PARA COMBUSTIBLES TRADICIONALES

Universidad Austral de Chile
 Instituto de Ciencia y Tecnología de los Alimentos (ICYTAL)
 Asignatura : Ingeniería de Servicios (ITCL 286)
 Profesor : Elton F. Morales Blancas

Tabla 1 - Características promedio de algunos combustibles sólidos

COMBUSTIBLE	Rango gravimétrico (%)					Poder calórico (kJ/kg)	
	C	H ₂	O ₂	N ₂	S	Superior	Inferior
Carbón ENACAR bituminoso	78 - 82	6,5 - 7,0	9 - 11	0,8 - 4,0	0,8 - 4,0	29300	27200
Turba (Europa)	40 - 60	5 - 6	25 - 36	1	0,5 - 1	-	18800
Carbón bituminoso (Europa)	68 - 74	6	18 - 25	1	0,5 - 1	24700	20900
Carbón metalúrgico (Europa)	84 - 92	3 - 5	2 - 9	1 - 1,5	1 - 1,5	29500	24300
				Carbón de Magallanes		19700	17200
				Leña seca		-	14600
				Leña verde		-	7500

Tabla 2 - Características promedio de algunos combustibles líquidos

COMBUSTIBLE	Peso Específico (kg/dm ³)	Poder calórico (kJ/kg)	
		Superior	Inferior
Combustible N°6 (F.O. N° 6)	0,973	43970	39780
Combustible N°5 (F.O. N° 5)	0,958	43970	41460
Combustible Diesel	0,845	45640	42700
Kerosene (parafina)	0,8	46482	43340
Gasolina	0,705 - 0,770	-	43550
Metanol (CH ₃ OH)	0,795	-	18840
Etanol (CH ₃ CH ₂ OH)	0,795	-	27430

Tabla 3 - Características promedio de algunos combustibles gaseosos

COMBUSTIBLE	Poder calórico a 0 °C y 760 mmHg	
	Superior (kJ/m ³)	Inferior (kJ/m ³)
Gas natural Magallanes (seco)	--	37271
Gas licuado (Propano - Butano)	--	92131
Gas por cañería Valparaíso y Concepción	--	16751
Gas por cañería Santiago	--	18431
Acetileno (C ₂ H ₂)	54440	52551
Metano (CH ₄)	37270	33501
Propano (C ₃ H ₈)	92130	84701
Butano (C ₄ H ₁₀)	119760	110550

TABLAS DE PODER CALORÍFICO PARA COMBUSTIBLES NO CONVENCIONALES

Termodinámica y Termotecnia

Tablas Tema 3: Combustibles

TABLA 3.1a: PODER CALORÍFICO DE MADERAS Y RESIDUOS AGRÍCOLAS

COMBUSTIBLE	PODER C. MEDIO kJ/kg
Bagazo húmedo	10500
Bagazo seco	19200
Cáscara de cacahuete	17800
Cascarilla de arroz	13800
Celulosa	16500
Corteza escurrida	5900
Cosetas de caña	4600
Madera seca	19000
Madera verde (*)	14400
Paja seca de trigo	12500
Paja seca de cebada	13400
Serrín húmedo	8400
Viruta seca	13400
	P. C. SUPERIOR kJ/kg
Cáscara de almendras	36800
Cáscara de nueces	32000
Cáscara de arroz	15300
Cáscara de pipa de girasol	17500
Cáscara de trigo	15800
Corteza de pino	20400
Corcho	20930
Orujillo de aceituna	17900
Orujo de uva	19126
Papel	17500
Jara (8% humedad)	18900 (P.C.I.)

(*) El poder calorífico de la madera verde disminuye según aumenta la humedad de la misma. En la tabla 3.1b se da el coeficiente por el que hay que multiplicar su poder calorífico para obtener el poder calorífico real.

TABLA 3.1b: Coeficientes de la madera húmeda

MADERA	COEF.	MADERA	COEF.
Alamo negro	0'55	Haya	0'62
Castaño	0'48	Olivo	0'88
Chopo	0'30	Pino marítimo	0'58
Encina	0'68	Pino silvestre	0'49
Enebro	0'50	Roble	0'68

TABLA 3.2: PODER CALORIFICO DEL CARBÓN Y OTROS COMBUSTIBLES SOLIDOS

Combustible	Densidad media kg/m ³	PCI kJ/kg	PCS kJ/kg	Combustible	PCI kJ/kg	PCS kJ/kg
Turba	360	21300	22500	Aglomerados de carbón	31300	35600
Lignito	1050	28400	29600	Carbón de madera	31400	33700
Hulla	1350	30600	31400	Coque	29300	33700
Antracita	875	34300	34700	Coque de petróleo	34100	36500

TABLA 3.3: PODER CALORIFICO DE COMBUSTIBLES LIQUIDOS

Combustible	PCI kJ/kg	PCS kJ/kg	Combustible	PCI kJ/kg	PCS kJ/kg
Aceite de esquistos	-----	38830	Fuel-oil n°1	40600	42695
Alcohol comercial	23860	26750	Fuel-oil n°2	39765	41860
Alquitrán de hulla	-----	37025	Gasóleo ¹⁾	42275	43115
Alquitrán de madera	36420	-----	Gasolina ²⁾	43950	46885
Etanol puro ⁴⁾	26790	29720	Petróleo bruto	40895	47970
Metanol ⁴⁾	19250	-----	Queroseno ³⁾	43400	46500

¹⁾ Densidad a 15 °C, 850 kg/m³

²⁾ Densidad a 20 °C, 730 kg/m³

³⁾ Densidad a 15 °C, 780 kg/m³

⁴⁾ Densidad a 20 °C, 790 kg/m³

TABLA 3.4: PODER CALORIFICO DE COMBUSTIBLES GASEOSOS

Combustible	Densidad kg/m ³	PCI kJ/kg	PCS kJ/kg	Combustible	Densidad kg/m ³	PCI kJ/kg	PCS kJ/kg
Gas natural	(*)	39900	44000	Gas de agua	0'711	14000	16000
Gas de hulla	0'50		46900	Gas ciudad	0'650	26000	28000
Gas de coquería	0'56	31400	35250	Gas de agua carburado	0'776	26400	27200
Gas de aire	----	10000	12000	Propano	506 (l) 1'85 (g)	46350	50450
Hidrógeno	0'0899	120011	141853	Butano	580 (l) 2'4 (g)	45790	49675

(*) Varía según el país de procedencia

(l), (g) Densidad a 20 °C en estado líquido y gaseoso, respectivamente.

P.C. Medio del biogás = 5554 kcal/m³

TABLA 3.7: PODER CALORÍFICO DE COMBUSTIBLES PROCEDENTES DE LA TRANSFORMACIÓN DE RESIDUOS.

COMBUSTIBLE	Densidad (kg/m ³)	PCI	PCS
Aceite de colza	921 (15 °C) 909 (35 °C)	8811 kcal/kg	9389 kcal/kg
Aceite de cardo (cynara)	924	----	33000 kJ/kg
Aceite de girasol	925	----	37100 kJ/kg
Briqueta de polvo de lijado de tapón de corcho aglomerado	1037	----	29807 kJ/kg
Briqueta de polvo de corte de barras de corcho aglomerado	756	----	28761 kJ/kg

**ANEXO E. ANTECEDENTES EN COLOMBIA DE USO DE LA BIOMASACOMO
FUENTE DE GENERACIÓN DE ENERGÍA**

(Ingenio Providencia)

AIRE

USO RACIONAL Y COGENERACIÓN DE ENERGÍA

Nuestro compromiso con respecto a la energía consiste en racionalizar al máximo el consumo y generar energía limpia, es decir, a partir de fuentes renovables como la biomasa (bagazo de caña).

Con la puesta en marcha de la planta de cogeneración de energía eléctrica en 2009, mostramos nuestro interés por mejorar en términos energéticos, priorizando siempre nuestro compromiso ambiental.

En 2010 generamos 208,053 MWH de energía, de los cuales utilizamos 101,808 MWH para nuestro consumo interno y comercializamos 108,111 MWH.

En 2011 cogeneramos 227,394 KWH de los cuales utilizamos 112,636 MWH para consumo interno y comercializamos 103,876 KWH. Esta energía es suficiente para ofrecer el servicio a una ciudad de 350,000 habitantes durante un año.

Podemos afirmar que generamos más energía al año que la hidroeléctrica de Calima. Aún cuando dicha hidroeléctrica tiene una capacidad instalada mucho mayor, no siempre cuenta con el agua necesaria para generar energía de forma permanente.

Además de lograr la autosuficiencia en materia de energía, el proceso de cogeneración de energía a partir de biomasa tiene los siguientes beneficios ambientales:

Reduce el consumo de carbón: pasamos de consumir 6,181 toneladas por mes a 2,036 toneladas/mes.

Disminuye las emisiones de CO₂ y partículas al ambiente.

Aumenta la eficiencia en los procesos por ahorro de vapor

USO DE
CARBÓN



USO DE
BAGAZO

AIRE REDUCCIÓN DE EMISIONES

Respecto al informe de emisiones por fuentes fijas, nos mantenemos por debajo de los estándares de emisiones atmosféricas, razón por la cual no hacemos mediciones periódicas. El próximo muestreo lo llevaremos a cabo en 2015 y lo reportaremos en nuestro informe 2014-2015.

Con el objetivo de fortalecer e incrementar el desarrollo sostenible de nuestra Organización, tenemos objetivos, metas, planes de acción y estrategias sostenibles que garantizan el cuidado permanente de los recursos naturales. Continuamos remplazando cada vez más el uso de combustibles fósiles (carbón) por biomasa (bagazo).

Nuestras acciones se fundamentan en la NTC ISO 14001, certificación con la que contamos desde 2011.



32

INFORME DE
SOSTENIBILIDAD
2012 - 2013


INGENIO PROVIDENCIA S.A.

ANEXO F. GLOSARIO DE LOS DATOS INTRODUCIDOS EN RETSCREEN

Precio del combustible: El modelo calcula la tasa de combustible (precio por unidad de combustible) para el sistema de potencia caso propuesto (ya sea de carga base o de carga intermedia) en base a la tasa de combustible introducida en la sección método de selección de combustible.

Flujo de vapor: Este valor es generalmente a partir de las lecturas del medidor de vapor o diseños de ingeniería de detalle y especificaciones. Alternativamente, la cantidad de agua de alimentación al generador de vapor se puede utilizar para estimar el flujo de vapor.

Presión de operación: El usuario introduce la presión de funcionamiento de la turbina de vapor. Se refieren a las presiones y temperaturas típicas de la turbina de vapor.

Temperatura de sobrecalentado: El usuario introduce la temperatura del vapor sobrecalentado. Esta es la temperatura real del vapor. Para un sistema existente, este valor típicamente se puede determinar usando un sensor de temperatura en el generador de vapor. Si no se requiere vapor sobrecalentado, el usuario introduce la temperatura de saturación calculado por el modelo.

Puerto de extracción: El usuario indica mediante la selección de la lista desplegable si el puerto de extracción está o no incluido. Los puertos de extracción se utilizan para proporcionar calor a una carga de calentamiento a un grado superior al disponible en el puerto de presión de retorno.

Escape de turbina – presión de vapor: El usuario entra en la turbina de vapor la presión o presión de escape.

Eficiencia de turbina de vapor (TV): El usuario introduce el rendimiento de la turbina de vapor (ST). Este valor incluye las pérdidas en la turbina de vapor para las pérdidas de potencia y auxiliares del sistema.

Los valores típicos de turbina de vapor rango de eficiencia 70-80%. Turbinas de vapor grandes suelen tener mayor eficiencia que las pequeñas turbinas de vapor.

Potencia mínima: El usuario introduce la capacidad mínima de energía con la que el equipo de energía puede funcionar en porcentaje de la "capacidad de energía". La capacidad mínima típica es de 25% para motores de pistones, y 40% para turbinas de gas y turbinas de vapor.

Eficiencia estacional: El usuario introduce la eficiencia estacional de la caldera de vapor. Este valor es generalmente menor que la eficiencia de estado estacionario, ya que se calcula sobre una base estacional. En otras palabras, la "eficiencia de estado estacionario" es para condiciones de plena carga, mientras que la "eficiencia estacional" tiene en cuenta las condiciones de carga parcial inferior de eficiencia que se producen durante el año. Los valores típicos de eficiencia estacional para las calderas de turbinas de vapor se extienden de 75 a 85%.

Temperatura de retorno: El usuario introduce la temperatura de retorno (o la temperatura del agua de alimentación) para la turbina de vapor, que es la temperatura del vapor condensado a la presión de salida y puerto de extracción. La temperatura de retorno esta típicamente entre 50 a 90 °C.

Tarifa de exportación de electricidad: El usuario introduce la tasa de exportación de electricidad, que es la tasa pagada por la compañía eléctrica o de otro cliente.

Factor de emisiones GEI (excl. T&D): El usuario puede obtener los factores de emisión de GEI (excluyendo las pérdidas de transmisión y distribución) mediante la selección de un "país - región" y "tipo de combustible" en las dos células adyacentes

a la izquierda. Si aparece un valor en blanco que indica que no hay información disponible para esa selección. El usuario puede cambiar estos valores mediante la introducción de un valor directamente en la celda.

Perdidas T y D (%): El usuario introduce las pérdidas de transmisión y distribución (T & D) (%) del sistema eléctrico del caso base, que incluye todas las pérdidas de energía entre la central y el usuario final. Este valor puede variar en función de la tensión de las líneas de transporte, la distancia desde el sitio de producción de energía para el punto de uso, el uso de pico de energía, la temperatura ambiente y el robo de electricidad.

Las unidades se dan como un porcentaje del total de las pérdidas de electricidad a la electricidad generada. Como primera estimación, es razonable asumir las pérdidas de transmisión y distribución de 6 a 10% en las redes modernas de los países industrializados y del 10 al 20% en redes ubicadas en países en desarrollo.

Derechos de transacción por créditos GEI: El usuario introduce el porcentaje de créditos que tendrán que ser pagados anualmente como un cargo por transacción. Con el fin de obtener créditos para un proyecto de GEI, una parte de los créditos podría tener que ser restada como una tarifa de transacción, que se pagará cada año para la agencia de acreditación (por ejemplo, la Convención Marco) y / o el país de acogida.

Los proyectos en los países menos adelantados están exentos de esta parte de la tasa a fin de promover la distribución equitativa de los proyectos.

Tasa crédito reducción de GEI: El usuario introduce el crédito de reducción de gases de efecto invernadero por tonelada equivalente de CO₂ (t CO₂). Se utiliza en conjunto con la reducción neta de GEI para el cálculo de los ingresos anuales de reducción de GEI.

Los precios de los créditos de reducción de gases de efecto invernadero, por tonelada equivalente de CO₂ (t CO₂), varían ampliamente dependiendo de cómo se genera el crédito y la forma en que serán entregados. Por ejemplo, los precios de los créditos generados a partir de proyectos de MDL¹ pueden ser diferentes a los generados a partir de proyectos de aplicación conjunta. Otros factores que tienen un impacto en el precio pueden incluir: reducción voluntaria u obligatoria de emisiones; compra privada o pública de créditos; créditos comercializados dentro, por ejemplo, la Unión Europea Comercio de Emisiones de gases efecto invernadero (EU ETS², por sus siglas en inglés), otros sistemas nacionales, transnacionales o regionales; tipo de tecnología utilizada para generar las reducciones de emisiones; y otros. A diciembre de 2005, los precios variaban entre \$ US 1 hasta \$ US 35 por tonelada de CO₂.

Duración crédito de reducción del GEI: El usuario introduce la duración crédito de reducción de gases de efecto invernadero (año). Este valor generalmente representa el número de años que el proyecto recibe créditos de reducción de gases de efecto invernadero. Se utiliza para determinar el ingreso de reducción de GEI durante la vida del proyecto.

Para los proyectos del Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), dos opciones están disponibles actualmente para la duración del período de acreditación (i) un período de acreditación fijo de 10 años o (ii) un período de acreditación renovable de 7 años que puede ser renovado dos veces (para una la duración del crédito máximo de 21 años).

Costos iniciales: Los costos iniciales totales representan la inversión adicional total que se debe hacer para que el proyecto propuesto, antes de que comience a

¹ Mecanismo de desarrollo limpio

² the European Union Greenhouse Gas Emission Trading Scheme

generar ahorros y / o ingresos. Los costos iniciales totales son la suma del estudio de viabilidad estimada, desarrollo, ingeniería, sistema eléctrico, sistema de calefacción y las medidas del sistema de refrigeración o de eficiencia energética y el equilibrio del sistema y los costes diversos y son entradas en el cálculo de recuperación de la inversión, el valor presente neto y la deuda del proyecto.

Costos de O y M: El modelo muestra los costos incrementales de operación y mantenimiento o ahorros (valor negativo) de todos los elementos del sistema de energía.

TIR antes de impuesto – capital: El modelo calcula la tasa interna de retorno antes de impuestos (TIR) de los recursos propios (%), lo que representa el verdadero rendimiento de los intereses proporcionada por el capital del proyecto durante su vida antes de impuestos. Se calcula utilizando los antes de impuestos, los flujos de caja anuales y la vida del proyecto. También se conoce como la rentabilidad sobre recursos propios (ROE³, por sus siglas en inglés) o el retorno de la inversión (ROI⁴, por sus siglas en inglés) o la tasa de tiempo de retorno ajustada. Se calcula hallando la tasa de descuento que hace que el valor presente neto de la inversión que será igual a cero. Por lo tanto, no es necesario establecer la tasa de descuento de una organización para utilizar este indicador. Una organización interesada en un proyecto puede comparar la tasa interna de retorno a su tasa de rendimiento requerida (a menudo, el coste de capital). La TIR se calcula sobre una base nominal, es decir, incluyendo la inflación.

TIR antes – impuesto – activos: El modelo calcula la tasa interna de retorno antes de impuestos (TIR) de los activos (%), lo que representa el verdadero rendimiento de los intereses proporcionada por los activos del proyecto durante su vida antes de

³ Return On Equity

⁴ Return On Investment

impuestos. Se calcula utilizando los antes de impuestos, los flujos de caja anuales y la vida del proyecto. También se conoce como la rentabilidad sobre activos (ROA⁵, por sus siglas en inglés). Se calcula hallando la tasa de descuento que hace que el valor presente neto de los activos sea igual a cero. Por lo tanto, no es necesario establecer la tasa de descuento de una organización para utilizar este indicador.

Pago simple de retorno del capital: El modelo calcula la recuperación simple (año), lo que representa la cantidad de tiempo que le toma a un proyecto propuesto para recuperar su propio costo inicial, de los ingresos o los ahorros que genera. La premisa básica del método de recuperación simple es que cuanto más rápidamente el costo de la inversión se puede recuperar, más deseable es la inversión. Por ejemplo, en el caso de la implementación de un proyecto de energía, un periodo de recuperación negativo sería una indicación de que los costos anuales incurridos son mayores que los ahorros anuales generados.

Repago – capital: El modelo calcula el retorno de la inversión de capital, el cual representa la cantidad de tiempo que se necesita para que el dueño de un proyecto recupere su inversión inicial del proyecto generado en efectivo. La recuperación de la inversión de capital considera los flujos de caja del proyecto desde su inicio, así como el apalancamiento (nivel de deuda) del proyecto, lo que hace que sea un mejor indicador de tiempo de los méritos de los proyectos que la simple recuperación de la inversión. El modelo utiliza el número del año y los flujos de efectivo después de impuestos acumulativos con el fin de calcular este valor.

⁵ Return On Assets