

# INGENIERÍA CONCEPTUAL, BÁSICA, DE DETALLE Y SIMULACIÓN PARA EL SISTEMA DE APROVECHAMIENTO DEL ALQUITRÁN EN EL PROCESO DE GASIFICACIÓN UP-DRAFT CON CAPACIDAD DE 50 kg/h UTILIZANDO LOS RSU PARA EL INER

Gutiérrez Gualotuña Eduardo Roberto

Páez Flor Nicolás Marcelo

Rivadeneira Rivera Daniel Alejandro

erguitierrez@espe.edu.ec, nmpaez@espe.edu.ec,

dakar9000@hotmail.com

Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE

Sangolquí-Ecuador

## RESUMEN

Un gasificador es dispositivo en el cual sucede un proceso termoquímico en donde mediante la combustión de una determinada materia prima (Biomasa) se pasa a un proceso de pirolisis para así obtener gases con bajo poder calorífico además de alquitranes y cenizas asimismo el tipo de combustible que se consume dentro de este equipo es amplio y variado, por lo que se busca hacer énfasis en la utilización de residuos sólidos urbanos (RSU) , ya que los RSU en los últimos tiempos se ha vuelto un gran problema ambiental porque así se lleve un proceso de rellenos sanitario con normas ambientales siempre existe contaminación de suelos y agua además también es problema para la sociedad, ya que los botaderos de basura se llenan con rapidez y por lo que se busca obtener una solución para este problema que aqueja a las grandes ciudades de nuestro planeta por lo que al lograr introducir los RSU en el consumo de materia prima del gasificador se lograra obtener una producción de un gas de bajo poder calorífico que se puede utilizar en la

producción de energía eléctrica, así como también la producción de alquitranes los cuales tienen diferentes utilidades como sellantes para techos, en la pavimentación de carreteras e incluso en la industria de la medicina, al igual se puede hacer uso de las cenizas para la fabricación de bloques de construcción que se puede utilizar en la construcción.

### Palabras claves

- Gasificador
- Updraft
- Residuos Sólidos Urbanos
- Alquitrán
- Gasificación

## 1.- INTRODUCCION

El proyecto de diseño y simulación de un sistema de aprovechamiento del alquitrán en el proceso de gasificación up-draft con capacidad de 50 kg/h utilizando los residuos sólidos urbanos, tiene un planteamiento de análisis y estudio que comprende lo siguiente:

En el capítulo 1 se explican los temas relacionados con el uso de este tipo de tecnologías de gasificación, considerando los antecedentes relacionados al proyecto, la definición del problema, el señalamiento de objetivos, así como también la justificación e

importancia del uso de las energías renovables.

El capítulo 2 se explica lo correspondiente a las aplicaciones y utilización de RSU, al igual que lo concerniente al proceso de gasificación. Además, es importante indicar las ventajas y desventajas de la utilización de la gasificación, la misma que pueden ser de carácter social, técnico y tecnológico; cuyos temas deben ser abordados, de manera especial por los expertos que realizan este tipo de implementaciones, tomando en cuenta que estas tecnologías deben ocasionar menor impacto ambiente circundante, además se explica un poco sobre el carácter ambiental haciendo énfasis en que la gasificación no es incineración.

En el capítulo 3 se realiza el porqué de la elección del gasificador, la estequiometría de la reacción, el balance de masas para así conseguir obtener el balance de energía, para poder sacar un volumen con el cual se logre sacar un dimensionamiento para proceder al diseño mecánico del gasificador y el diseño térmico además de esto se hace la selección de los equipos adyacentes entre los que tenemos una tolva, un tornillo sin fin de transporte, el gasificador en sí, un intercambiador de calor y finalmente un tanque separador.

El capítulo 4 se refiere a la simulación del proceso de gasificación en ANSYS para que nos permita ver el proceso de gasificación lo más semejante a la real y así poder observar un perfil de temperaturas dentro del gasificador, además de esto se realizó una simulación en DWSIM para tener un valor referencial de la producción de alquitranes basados en la producción de gases del gasificador

Este proyecto se concluye con el análisis económico financiero para identificar los recursos que se requiere para las etapas de: investigación de campo, bibliográfica, adquisición de materiales locales, importación de componentes, mano de obra, gastos de fabricación y montaje, siendo estos

rubros definidos en los costos directos e indirectos con los cuales se establece el presupuesto de inversión requerido para la ejecución del proyecto. Para finalizar se explica las conclusiones, recomendaciones y propuestas de trabajo futuro.

## 2.- MARCO TEÓRICO

### 2. RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)

#### 2.1. INTRODUCCIÓN

Los residuos sólidos urbanos son aquellos que se originan en la actividad doméstica y comercial de ciudades y pueblos que incluye a todos los materiales sólidos desechados de actividades municipales, industriales o agrícolas, que no son transportados por agua y que han sido rechazados porque no se van a utilizar.

Los residuos son un problema para las sociedades, sobre todo para las grandes ciudades ya que en estas es donde existe mayor producción de residuos, debido a que a la sobrepoblación y el consumismo que se ha incrementado en los últimos tiempos por las personas; esto junto con el ineficiente manejo que se hace con dichos residuos provocando grandes problemas tales como la contaminación, que resume problemas de salud y daño al ambiente.

Se hablara particularmente de los residuos sólidos urbanos que se clasifican de la siguiente manera: (Martínez Lemux, Carballo Abreu, & Arteaga Crespo, 2006)

**Basura:** desechos de alimentos putrescibles (biodegradables).

**Desechos:** residuos sólidos no putrescibles, que incluyen diversos materiales, pudiendo ser combustibles (papel, plástico, textiles, etc.) o no combustibles (vidrio, metal, mampostería, etc.).

**Especiales:** cascajo de las construcciones, las hojas de los árboles y basura callejera, automóviles abandonados y aparatos viejos.

## 2.2. COMPOSICIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU) A SER UTILIZADA.

Se tomaran los datos de la investigación realizada por (Poletto & Da Silva, 2009) para la Universidad Estatal Paulista, ya que el estudio en la ciudad de Bauru, Brasil es similar a los que parámetros de RSU que se tiene en la ciudad de Quito debido a su composición, nivel económica de la población y población por metro cuadrado, por lo que los datos serán establecidos como referencia para obtener valores de diseño para el gasificador.

La composición del RSU es influenciada por varios factores: número de habitantes, poder adquisitivo, nivel educacional, hábitos y costumbres de la población, condiciones climáticas y estacionales, y cambios en la política económica de un país.

La determinación de la cantidad de RSU producido en una ciudad y sus diversos componentes no es simple, depende de una serie de factores, que mantienen una relación directa con el número de habitantes. De acuerdo con los datos del Instituto Brasileño de Geografía y Estadística (IBGE, 2000), la generación de RSU puede ser estimada de acuerdo a la población. En la Tabla 3 se encuentra la producción de RSU por persona basado en el número de habitantes de una determinada región brasileña.

**Tabla 3.** Índice de producción “per cápita” de RSU en función de la población

Población (hab.)	Producción de RSU (kg/hab.día)
Hasta 100.000	0,4
De 100.001 a 200.000	0,5
De 200.001 a 500.000	0,6

200.001 a 500.000	0,7
Más que 500.001	

**Fuente:** (Poletto & Da Silva, 2009)

El análisis elemental del RSU implica la determinación del porcentaje de Carbono (C), Hidrógeno (H), Oxígeno (O), Nitrógeno (N), Azufre (S), y cenizas. Tal análisis es importante debido tanto al aspecto energético, como la preocupación con la emisión de compuestos clorados durante la incineración. Se encuentra una composición media, obtenida de datos americanos, pero que son utilizados en la mayoría de los trabajos sobre RSU (Tchobanoglous y Theisen, 1996).

Según Silva y Velo (1997), la composición típica aproximada a los RSU depositados en el vertedero sanitario de Bauru se describe en la Tabla 5. Lo se observa es que la mayor parte del RSU está constituida por el residuo de comida (55%) y papel / cartón (21%). El plástico es otro componente importante, pues, además de contribuir con 8,9% en masa también tiene un poder calorífico elevado. Para lo finales del presente trabajo no se considera el porcentaje de vidrios y metales, pues éstos son inertes y no influyen en la estimación del poder calorífico del RSU. Esta hipótesis está incluida en la columna masa seca normalizada, donde el porcentual de masa seca es ponderada dejando de considerarse vidrios y metales.

**Tabla 5.** Composición de los RSU Domésticos- Inorgánicos  
Porcentaje en masa (% - Base seca) - Inorgánicos

Componentes	C	H	O	N	S	Cenizas
Vidrios	0,5	0,1	0,4	<0,1	-	98,9
Metal	4,5	0,6	4,3	<0,1	-	90,5

Cenizas	26,3	3,0	2,0	0,5	0,2	68,0
---------	------	-----	-----	-----	-----	------

cenizas en base húmeda para cada componente del RSU

**Tabla 6.** Composición Típica de los Residuos del Vertedero Sanitario de Bauru.

Componente	Masa Húmeda (%)	Humedad (%)	Masa seca (%)	Masa seca Normatizada (%)
Res. de Comida	55,0	70,0	16,50	32,77
Papel y Cartón	21,0	6,0	19,74	39,21
Textil y Cuero	5,0	10,0	4,50	8,94
Madera	1,1	20,0	0,88	1,75
Plástico	8,9	2,0	8,72	17,33
Vidrio	2,6	2,0	2,55	-
Metales	5,4	2,0	5,29	-
Otros	1,0	5,0	0,95	-
Total	100	-	59,13	100

*Fuente:* (Poletto & Da Silva, 2009)

Se ha estimado el Poder Calorífico Inferior de los RSU generados en el municipio de Bauru, tomándose en consideración la segregación de papeles / cartón y plásticos. Obtenido este parámetro, es de interés realizar una estimación teórica aproximada de la cantidad de energía que podría ser obtenida diariamente en la combustión de los RSU del municipio de Bauru.

A partir de los datos de las Tablas 5 y 6, se genera la Tabla 7, que muestra el porcentaje de Carbono (C), Hidrógeno (H), Oxígeno (O), Nitrógeno (N), Azufre (S), y

**Tabla 7.** Porcentaje de cada elemento de los componentes del RSU – base húmeda

Componente	% en masa – Base Húmeda					Ceniza
	C	H	O	N	S	
Restos de comida	14,4	1,9	11,3	0,8	0,1	1,5
Papel	41,4	5,5	41,9	0,3	0,2	4,7
Plástico	58,8	7,1	22,3	-	-	9,8
Textiles / cuero	49,5	5,9	28,1	4,1	0,1	2,2
Goma	76,4	9,8	-	2	-	9,8
Madera	38,2	4,8	30,4	2,7	0,2	3,6

*Fuente:* (Poletto & Da Silva, 2009)

En la Tabla 8 (Poletto, 2008) se muestra la contribución de cada componente del RSU para el PCI de un kilogramo de RSU, no considerando la segregación de materiales combustibles.

**Tabla 8.** Contribución de cada componente sin considerar la segregación

Componente	Contribución
Res. de Comida	738
Papel y Cartón	758
Textil y Cuero	237
Madera	38
Plástico	521
Total PCI (kcal/kg de RSU)	2.292

*Fuente:* (Poletto & Da Silva, 2009)

## 2.3. GASIFICACIÓN Y ALQUITRANES EN DICHO PROCESO.

### 2.3.1. GASIFICADOR

El gasificador es esencialmente un reactor termo-químico donde tienen lugar varios procesos físicos y químicos complejos.

La biomasa es secada, calentada, pirolizada, parcialmente oxidada y reducida en este reactor cuando ella fluye a través de él.

**Secado del combustible:** en esta etapa la biomasa pierde agua transformándola en vapor de agua

**Pirolisis:** es donde aparece el gas de síntesis y el alquitrán, ya que por ausencia de oxígeno se ven presentes el H<sub>2</sub> y el CO en proporciones considerables que se pueden utilizar.

**Combustión:** en esta etapa la biomasa se consume en presencia de oxígeno permitiendo su incineración.

**Reducción:** aquí la biomasa es reducida, transformada en cenizas.

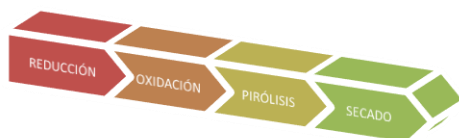


Figura 1. Proceso de gasificación.

*Fuente:* (Rivadeneira, D; 2013)

### 2.3.2. GAS DE SÍNTESIS

Es un combustible gaseoso obtenido a partir de sustancias ricas en carbono sometidas a un proceso termo-químico a altas temperaturas, se designa como gas de síntesis a una mezcla de gases en donde predomina CO y H<sub>2</sub> en proporciones variables y que son adecuadas para síntesis especiales de productos químicos. (Weissermel & Arpe, 1981)

### 2.3.3. ALQUITRÁN

Los denominados alquitranes son, en realidad una extensa familia de hidrocarburos de cadenas largas que comienzan con la serie del antraceno. Su presencia en los procesos de combustión, en particular en la gasificación es fundamental para el trabajo de un gasificador. Desde el punto de vista operacional el gran problema de estos compuestos es que a temperaturas de operación, siempre superior a los 500°C, los alquitranes se hallan en forma de vapor y por tanto su comportamiento es similar a lo de los gases, no obstante cuando debe procederse a su valorización luego de que el gas de síntesis se enfríe, los alquitranes se condensan. La concentración de alquitranes dentro de un gasificador va en función de la temperatura de gasificación, del tiempo de residencia, tipo de reactor utilizado, y de la sustancia que se gasifica. (Castells, 2005)

**Tabla 9.** Rango de temperaturas para formación de alquitranes.

Temperatura (Rango °C)	Reacción Química
100-120	Deshidratación
250	Desoxigenación y desulfuración, disociación molecular de agua y dióxido de carbono. Comienza la liberación de sulfuro de Hidrógeno
340	Rotura de enlaces de compuestos alifáticos. Comienza la liberación de metano y otros compuestos alifáticos ligeros.
380	Rotura de enlaces C-O y C-N
400-600	Descomposición de los materiales bituminosos. Generación de aceites y alquitranes. Carbonización de baja temperatura.
600	Cracking de los materiales bituminosos. Generación de hidrocarburos gaseosos de cadena corta e hidrocarburos aromáticos (derivados del benceno).
>600	Dimerización de las olefinas (etileno) a $\alpha$ -butileno; reacción de etileno a ciclohexano; generación de compuestos aromáticos volátiles.

*Fuente:* (Cueva)

### 2.3.4. RECUPERACIÓN DE ALQUITRANES EN PEQUEÑA ESCALA

Se trata de alquitranes químicamente complejos, que son antisépticos útiles y agentes de preservación. El alquitrán de Estocolmo tiene empleo en la medicina veterinaria, en la construcción de embarcaciones y como pintura o pasta preservadora de la madera. En la actualidad, en el mundo desarrollado, una cantidad de otras sustancias reemplazan la brea de Estocolmo, sin embargo, en el mundo en vía de desarrollo puede haber mercado para la brea de madera como pintura preservadora de la madera o como material para calefacción, y es también posible un cierto empleo como antiséptico. El alquitrán puede ser quemado como combustible, pero por lo general, es más razonable emplear la madera donde fuera posible y no merece el esfuerzo el recolectar la brea para simplemente quemarla, siendo más valiosa para otros usos. (FAO, 1993)

### 2.3.5. RECOLECCIÓN DEL ALQUITRÁN O BREA

Normalmente el alquitrán puede condensarse donde sea que los vapores pasando por conductos metálicos, el calor se dispersa al aire, a través de las paredes metálicas del conducto y la brea se condensa en la superficie interna. El conducto debe ser inclinado o con preferencia vertical para permitir que el alquitrán cuele dentro del receptáculo, porque de otra manera la acumulación del mismo sobre las paredes del conducto actúa como aislante y cesa prácticamente la condensación.

Se requieren conductos de metal (acero) lo que requiere habilidad en el trabajo del metal y la disponibilidad de acero adecuado. Los dos tipos de hornos mejor adaptados para la recolección de alquitrán son el tipo metálico transportable y el horno Casamance, o cualquier otro tipo equipado con chimeneas de acero. En todos los casos las chimeneas tienen que ser modificadas, para permitir que el alquitrán condensado se

descargue dentro de algún tipo de recolector. La cantidad de alquitrán que puede recogerse en la práctica no es muy grande, siendo de alrededor de 25-35 kg de alquitrán por cada tonelada de madera seca al aire. (FAO, 1993)

### 2.3.6. PARAMETROS MEDIOAMBIENTALES DE LA GASIFICACIÓN DE LOS RSU

Primero que nada se debe recalcar que “La gasificación no es lo mismo que la incineración de RSU”. (Elstein)

Para poder gasificar RSU se debe tomar en cuenta que los gasificadores no admite ciertos residuos, por lo cual hay que separarlos, es decir que previamente debe existir una fase de separación donde se extraen vidrios, metales, algunos plásticos, cartones, voluminosos, etcétera. Esto deja un alto porcentaje de material orgánico, así como una parte de plásticos y por último una parte de papel, que se puede enriquecer con algo de cauchos que es un material que no se lo utiliza para casi ningún otro proceso. En la primera instancia los RSU se encuentran en presencia de oxígeno, a efectos de que se realice una reacción parecida a la incineración para que se libere energía. Nada más que en este proceso se tiene un porcentaje reducido de oxígeno así al momento de en el que se rompen las moléculas de carbono, azufre, nitrógeno, etcétera, no encuentra oxígeno para mezclarse. Por lo que se forma dióxido de carbono y también hidrógeno suelto. Y la poquita agua que puede producir del residuo por su húmedo esta reacciona para dar monóxido. Es decir, no le alcanza el oxígeno para formar otras sustancias (Elstein).

**Tabla 10.** Tabla de comparación de procesos térmicos.

Gasificació n CO	Elemento s C	Incineración CO <sub>2</sub> H <sub>2</sub> O
------------------------	--------------------	---

$H_2$	H	$NO_x$
$N_2$	N	$SO_2$
$H_2S$	S	$O_2$
HCl	Cl	Alta
Proceso con oxígeno limitado (Atmósfera Reductora)		probabilidad de producción de dioxinas, furanos y hexaclorobenceno
		Proceso con exceso de oxígeno (Atmósfera Oxidante)

Fuente: (Caballero, Experiencia de México con Pirólisis y , 2007)

## 2.4. GASIFICADOR DE CORRIENTE ASCENDENTE O TIRO DIRECTO

El tipo de gasificador más antiguo y sencillo es el de tiro directo o gasificador ascendente que se presenta esquemáticamente en la Figura 4.

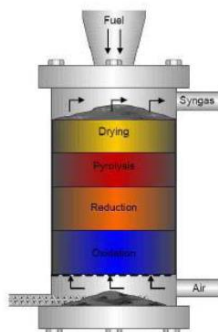


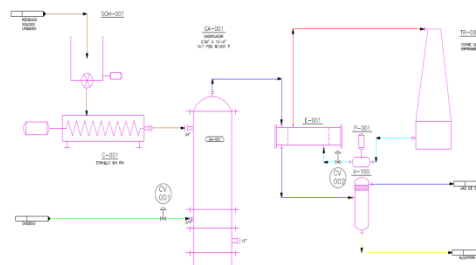
Figura 2. Gasificador de corriente ascendente o tiro directo “updraft”

La toma de aire se encuentra en el fondo y los gases salen por arriba, cerca de la parrilla en el fondo, tienen lugar las reacciones de combustión que van seguidas de reacciones de reducción algo más arriba en el gasificador. En la parte alta del gasificador tiene lugar el calentamiento y pirolisis de la carga, como resultado de la transferencia de

calor, por convección forzada y radiación, de las zonas inferiores. Los alquitranes y productos volátiles producidos durante este proceso son transportados por la corriente de gas. Se remueven las cenizas del fondo del gasificador.

Las principales ventajas de este tipo de gasificador consisten en su simplicidad, alta proporción de carbón vegetal quemado e intercambio interno de calor que motiva unas bajas temperaturas de salida del gas y alta eficiencia del equipo y también la posibilidad de funcionar con muchos tipos de carga (aserrín, cascaras de cereales, etc.). (FAO, 1993).

## 3. Diseño



DISEÑO DE ALQUITRAN		MATERIALES	
ITEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VALOR
001	ALQUITRAN	kg	1000
002	ALQUITRAN	kg	1000
003	ALQUITRAN	kg	1000
004	ALQUITRAN	kg	1000
005	ALQUITRAN	kg	1000
006	ALQUITRAN	kg	1000
007	ALQUITRAN	kg	1000
008	ALQUITRAN	kg	1000
009	ALQUITRAN	kg	1000
010	ALQUITRAN	kg	1000

Figura 3. PI&D del sistema de aprovechamiento del alquitran Fuente: (Rivadeneira, D; 2013)

### 3.1. Diseño de los principales componentes del sistema

#### 3.1.1. Gasificador

Fórmula general de los residuos sólidos urbanos.

Tabla 11. Fórmula general de los RSU

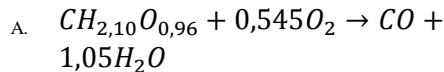
	C	H	O
$\Sigma$	27,2	4,77	34,75
$\frac{\Sigma}{PM}$	2,27	4,77	2,17

$\int \rightarrow C$	1	2,10	0,96
<b><math>CH_{2,10}O_{0,96}</math></b>			

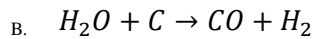
Fuente: (Rivadeneira, D; 2013)

### 3.2. PROCESOS QUÍMICOS EN EL GASIFICADOR

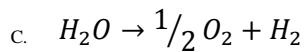
Combustión de residuos urbanos



Combustión de carbón



Electrólisis



**Balace de masa para el gasificador**

**Flujos de entrada**

La entrada de residuos urbanos más carbón para poder quemar es de:

$$50 \text{ kg/h } CH_{2,10}O_{0,96}$$

+

$$21,29 \text{ kg/h } C$$

---


$$71,29 \text{ kg/h } CH_{2,10}O_{0,96} + C$$

Mediante hidrólisis se obtendrá  $29,47 \text{ kg/h } O_2$  necesario para la combustión y  $3,68 \text{ kg/h } H_2$ , con un requerimiento de  $33,15 \text{ kg/h } H_2O$ .

**Flujos de salida**

El proceso resultante dará, a la salida del gasificador:

CO

$$47,32 \text{ kg } CO$$

$$\begin{array}{r} + \\ 49,69 \text{ kg } CO \\ \hline 97,01 \text{ kg/h } CO \end{array}$$

$H_2$

$$3,54 \text{ kg } H_2$$

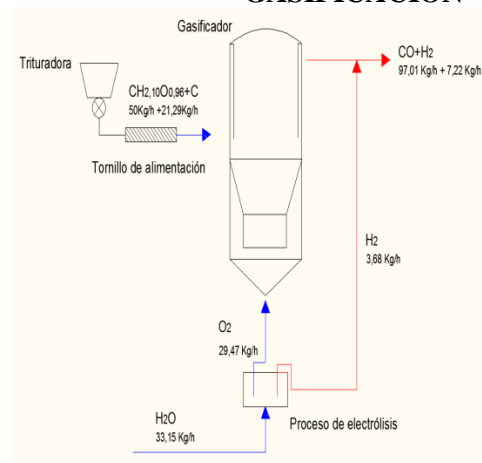
+

$$3,68 \text{ kg } H_2$$

---


$$7,22 \text{ kg/h } H_2$$

### 3.3. FLUJO GRAMA DEL PROCESO DE GASIFICACIÓN



Flujos de entrada

Flujos de salida

**Figura 4.** Flujograma de proceso

Fuente: (Rivadeneira, D; 2013)

### 3.4. BALANCE DE ENERGÍA

Es la capacidad de la materia para producir energía, pudiendo adoptar distintas formas, todas ellas inter convertibles directa o indirectamente unas en otras.

El balance de energía viene de la "Ley de la conservación de la energía" (Primera Ley de La Termodinámica), es decir "La energía no se crea ni se destruye, solo se transforma". El balance de energía es aplicado para determinar la cantidad de



energía que es intercambiada y acumulada dentro de un sistema.

La basura como se analizó en el Capítulo 2, tiene un PCI

$$\text{Total PCI (kcal/kg de RSU)} = 2292$$

Transformando a  $\frac{kJ}{kg}$

$$\frac{2,292 \text{ kcal}}{kg} * \frac{4,19kJ}{kcal} = 9603,48 \frac{kJ}{kg}$$

El PCI del carbón vegetal es  $31400 \frac{kJ}{kg}$  (Onsanger)

Utilizando la ecuación

$$Q = \dot{m} * Hr$$

Donde

$Q$   
= Calor en la cámara de combustión [kW]

$\dot{m}$  = Flujo masico  $\left[\frac{kg}{s}\right]$

$Hr$  = Poder calorico inferior  $\left[\frac{kJ}{kg}\right]$

Para la basura

$$Q = 1,388x10^{-2} * 9603,48 = 133,38 [kW]$$

Para el carbón

$$Q = 5,9138x10^{-3} * 31400 = 185,69 [kW]$$

La energía aportada por los materiales al gasificador es de 319,076 [kW]

El PCI del H<sub>2</sub> es

$$\frac{29000 \text{ kcal}}{kg} * \frac{4,19kJ}{kcal} = 121510 \frac{kJ}{kg}$$

$$Q = 9,83x10^{-4} * 121510 = 119,48 [kW]$$

$$Q_t = Q_{sal} - Q_{ent}$$

$$Q = -199,59 [kW]$$

### 3.5. DIMENSIONAMIENTO DEL GASIFICADOR

La eficiencia de conversión en el gasificador de biomasa esta alrededor del 80%. (Basu, 2010)

Relación de balance para el componente A

$$\begin{matrix} \nearrow 0 & \nearrow 0 \\ \text{Entra} - \text{Sale} + \text{Genera} = \text{Produce} \end{matrix}$$

Expresando el balance del componente A en función del volumen se tiene:

$$\begin{cases} V \rightarrow 0 \\ t = 0 \rightarrow F_{AO} = F_A \end{cases}$$

$$\begin{matrix} \nearrow 0 & \nearrow 0 \\ F_{jo} - F_j + \int_0^V r dV = \frac{dF}{dt} \end{matrix}$$

Resolviendo analíticamente la ecuación diferencial:

$$V = \frac{F_{AO} - F_A}{-r_A}$$

Dónde:

$V$  = Volumen del reactor [cm<sup>3</sup>]

$r_A$  = Velocidad de reacción  $\left[\frac{1}{min}\right]$

$F_A$   
= Flujo molar a la salida del reactor  $\left[\frac{mol}{min}\right]$

$F_{AO}$   
= Flujo molar a la entrada del reactor  $\left[\frac{mol}{min}\right]$

La velocidad de reacción es:

$$-r_A = k * C_A$$

Dónde:

$C_A$  = Concentración  $\left[\frac{mol}{cm^3}\right]$

$r_A$  = Velocidad de reacción  $\left[\frac{1}{min}\right]$

$$k = \text{Constante de velocidad de la reacción} \left[ \frac{\text{cm}^3}{\text{mol} * \text{min}} \right]$$

La concentración de la reacción es:

$$CA * \dot{V} = F_A$$

Dónde:

$$\dot{V} = \text{Flujo volumétrico} \left[ \frac{\text{cm}^3}{\text{min}} \right]$$

$$CA = \text{Concentración de la mezcla} \left[ \frac{\text{mol}}{\text{cm}^3} \right]$$

$$F_A = \text{Flujo molar a la salida del reactor} \left[ \frac{\text{mol}}{\text{min}} \right]$$

Despejando la concentración y se obtiene:

$$CA = \frac{F_A}{\dot{V}}$$

Se tiene la fórmula de la conversión:

$$x = \frac{F_{AO} - F_A}{F_{AO}}$$

Dónde:

$$x = \text{Porcentaje de conversión} [\%]$$

$$F_{AO} = \text{Flujo molar a la entrada del reactor} \left[ \frac{\text{mol}}{\text{min}} \right]$$

$$F_A = \text{Flujo molar a la salida del reactor} \left[ \frac{\text{mol}}{\text{min}} \right]$$

Resolviendo la ecuación se obtiene:

$$F_A = F_{AO} - x * F_{AO}$$

$$F_A = 0,12 * F_{AO}$$

Y el volumen del reactor es:

$$V = \frac{F_{AO} - 0,2 * F_{AO}}{-\left(k * \frac{0,2 * F_{AO}}{\dot{V}}\right)}$$

Donde se tiene como resultado 1200000 cm<sup>3</sup> que transformados a m<sup>3</sup>

$$V = 1,2 \text{ m}^3$$

### 3.6. DISEÑO MECÁNICO DEL GASIFICADOR UP-DRAFT

#### 3.6.1. ESPESOR DEL CILINDRO DEL GASIFICADOR

$$t = \frac{Pd * (Re + CA)}{Sd * E + 0,4 * Pd} + CA$$

Dónde:

$t$  = Espesor de la pared (pulg)

$Pd$  = Presión de diseño (Psi)

$Re$  = Radio externo (pulg)

$Sd$  = Esfuerzo máximo permisible del material (Psi)

$E$  = Eficiencia de la soldadura

Con los datos anteriores se obtiene que el espesor de la tubería sea de 11,88 mm (0,468"), con lo cual se elige el espesor nominal comercial de 12,7 mm (0,5") el mínimo en el mercado.

#### 3.6.2. ESPESOR DE LA CABEZA TORIESFÉRICA DEL GASIFICADOR

$$t = \frac{Pd * (L + CA) * M}{2 * Sd * E + Pd * (M - 0,2)} + CA$$

$$M = \frac{1}{4} * \left[ 3 + \sqrt{\frac{L_{max}}{r}} \right]$$

Dónde:

$t$  = Espesor de la pared (pulg)

$Pd$  = Presión de diseño (Psi)

$Re$  = Radio externo (pulg)

$Sd$  = Esfuerzo máximo permitido del material (Psi)

$E$  = Eficiencia de la soldadura

$M = \text{Factor } m(\text{adimensional})$

$L = \text{Radio externo del plato}(\text{pulg})$

Con los datos anteriores se obtiene que el espesor de la cabeza sea de 4,39 mm (0,173”), con lo cual se elige el espesor nominal comercial de 9,525 mm (0,375”) el mínimo en el mercado.

### 3.6.3.ESPESOR DE LAS CONEXIONES EN EL GASIFICADOR

$$t = \frac{Pd * (Re + CA)}{Sd * E + 0,4 * Pd} + CA$$

Dónde:

$t = \text{Espesor de la pared}(\text{pulg})$

$Pd = \text{Presión de diseño}(\text{Psi})$

$Re = \text{Radio externo}(\text{pulg})$

$Sd = \text{Esfuerzo máximo permitido del material}(\text{Psi})$

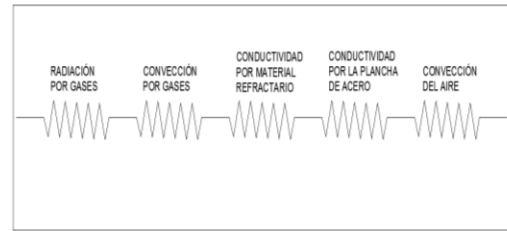
$E = \text{Eficiencia de la soldadura}$

**Tabla 12.** Especificación de las tuberías a ser utilizadas

Descripción	Designación de las aberturas	Especificación de la tubería
Salida del gas de síntesis	N1	6 NPS SCH 40s t=0,375
Entrada de RSU+C	N2	12 NPS SCH 30 t=0,33
Entrada de oxígeno	N3	¾ NPS SCH 80s t=0,154
Salida de Escoria	N4	12 NPS SCH30 t=0,33

**Fuente:** (Rivadeneira, D; 2013)

## 3.7. DISEÑO TÉRMICO DEL GASIFICADOR UP-DRAFT.



**Figura 4.** Diagrama de Resistencia Térmica  
**Fuente:** (Rivadeneira, D; 2013).

### 3.7.1.DETERMINACIÓN DE LA RADIACIÓN DE LOS GASES.

$$Q = \epsilon_2 * A_2 * \alpha * (t_G - t_2)$$

Dónde:

$\epsilon_2 = \text{Emisividad de la superficie receptora}$

$A_2 = \text{Área de la superficie receptora}$

$\alpha = \text{Coeficiente de radiación}$

$t_G = \text{Temperatura del gas } (^{\circ}\text{C})$

$t_2 = \text{Temperatura de la superficie receptora } (^{\circ}\text{C})$

$$Q = 4,3995[\text{kW}]$$

### 3.7.2.COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSPORTE DE CALOR

Este coeficiente debe ser el menor posible, para de esta manera aprovechar al máximo el calor disponible dentro del gasificador y para limitar el flujo de calor a través de las paredes de la cámara de

combustión, se ha dispuesto de material refractario y plancha metálica.

$$q = \frac{(\Delta T)_{global}}{\Sigma R_t} = \frac{T_i - T_o}{\Sigma R_t}$$

Donde la energía térmica es por:

Resistencia térmica por convección:

$$R_c = \frac{r_2}{r_1 * h_i} + \frac{1}{h_o}$$

Donde

$r_2$  = radio externo del material refractario

$r_1$  = radio interno del material refractario

$h_i$  = coeficiente de convección interno

$h_o$  = coeficiente de convección externo

Resistencia térmica por conducción:

$$R_{co} = \frac{r_1 * \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{kr} + \frac{r_3 * \ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)}{ka}$$

Donde

$r_2$  = Radio externo del material refractario

$r_1$  = Radio interno del material refractario

$r_4$  = Radio externo del acero

$r_3$  = Radio interno del acero

$kr$

= Conductividad térmica del cemento refractario

$ka$  = Conductividad térmica del acero

### 3.8. CALOR QUE SE DISIPA EN EL GASIFICADOR

Para  $r_1$  se tomara un espesor como marca las normas TULAS de 100 mm para el material refractario.

Ecuación

$$\left( \frac{r_2}{r_1 * h_i} + \frac{r_1 * \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{kr} + \frac{r_3 * \ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)}{ka} + \frac{1}{h_o} \right) * \pi * D * L * (\Delta T) = Q$$

Resolviendo

$$Q = 402,626 + 4,3995 = 407,03 \text{ kW}$$

### 3.9. CÁLCULO DE LA VARIACIÓN DE LA PRESIÓN EN EL REACTOR

Se puede calcular la caída de presión de la corriente gaseosa a través del lecho móvil, a partir de la ecuación de Ergun (Strassburger et al, 1969). (Trinks y Mawhinney, 1972), sobre la base de que la velocidad superficial de la fase sólida es despreciable frente a la velocidad superficial de la fase gaseosa. Por ello se consideró como un lecho fijo a los efectos del cálculo de la caída de presión. (Valderrama, 1998)

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{150 * \mu_f * v_o * (1 - \epsilon)^2}{D_p^2 * \epsilon^3} + \frac{1.75 * \rho_f * v_o^2 * (1 - \epsilon)}{D_p \epsilon^3}$$

Dónde:

$\mu_f$  = Viscosidad del fluido, [Pa \* s]

$v_o$   
= Velocidad superficial de fluidización, [m/s]

$D_p$  = Diámetro de la partícula, [m]

$\epsilon$  = Porosidad, [adimensional]

$\rho_f$  = densidad del fluido,  $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

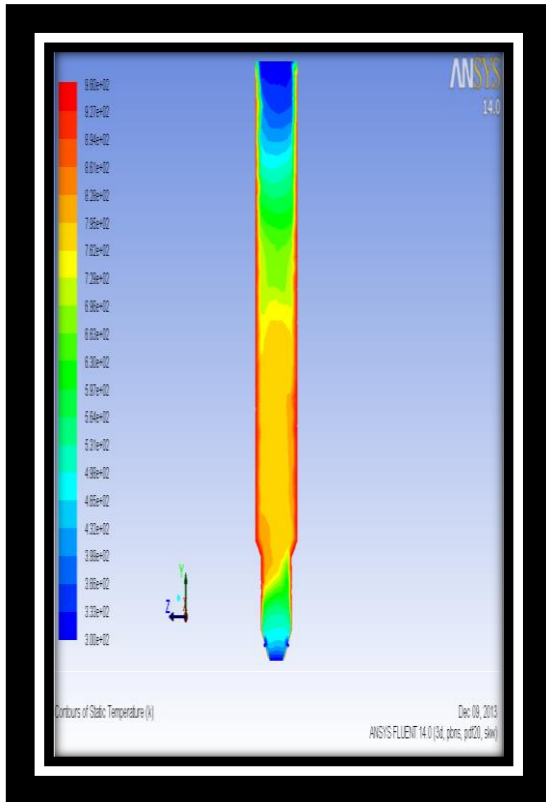
$\Delta P$  = Caída de presión, [Pa]

$L$  = Longitud del lecho, [m]

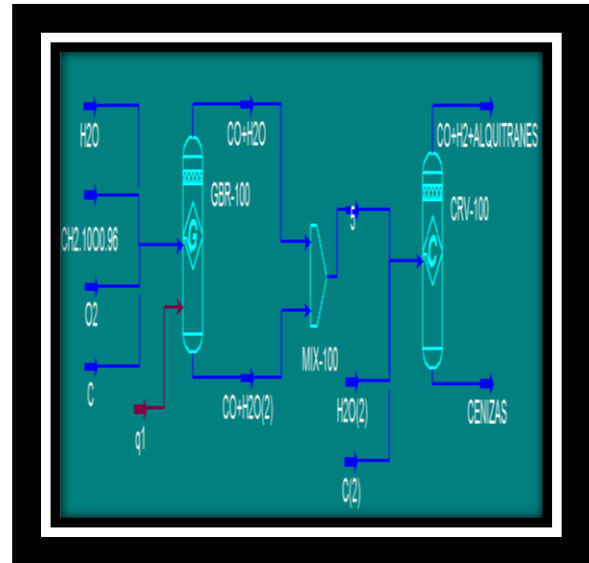
Resolviendo

$$\Delta P = 0,0004 \text{ atm}$$

## 5.- SIMULACIONES Y RESULTADOS



**Figura 5.** Resultado final del perfil de temperaturas obtenido en ANSYS.  
Fuente: (Rivadeneira, D; 2013)



**Figura 6.** Diagrama de la simulación en DWSIM.

**Fuente: (Rivadeneira, D; 2013)**

Según el artículo científico escrito por (Zapata Meneses & Augusto Estrada, 2004) hacen referencia a varios ensayos en un gasificador entre los que se prueba residuos, de varios tipos como madera y gas natural arrojando resultados que se compararon para obtener una producción de alquitrán aproximada del gasificador diseñado.

Con esta comparación se da a notar que el gasificador diseñado tendrá una producción de alquitrán de alrededor del 0,39 kmol/h.

## 6. CONCLUSIONES

- Debido a la poca información existente concerniente a los RSU en el Ecuador, el estudio se basó información de la Universidad Paulista en Brasil que hace referencia a la composición química de los RSU, que se asemeja en gran forma a la realidad que se vive en Quito con respecto a los residuos de la población, y así, partir con los cálculos del gasificador.

- La posibilidad de que en el momento de gasificar los RSU se obtengan gases nocivos para el medio ambiente, fue descartado gracias a una investigación del Tecnológico de Monterrey (Caballero, 2007) en donde se experimentó gasificando este tipo de desechos y se obtuvo los siguientes resultados: como es un proceso que tiene ausencia de oxígeno no se producen emisiones al medio ambiente de Dioxinas, Furanos y Hexaclorobenceno (ver tabla 10), ya que este tipo de elementos se forman al momento de incinerar los RSU en la presencia de oxígeno.
- En la simulación en ANSYS se observa que se alcanzó las temperaturas requeridas para la formación de alquitranes.
- Los 0,39 kmol/h de producción se lo multiplico con el peso molecular de la una formula aparente del alquitrán obteniendo así 15kg/h
- El análisis financiero del proyecto demuestra que es económicamente viable, ya que el periodo de recuperación es de tres años y existe ganancia en este año, además de que muestra un valor beneficio - costo de C 0,29 de ganancia por cada dólar gastado por producción.

## 7. BIBLIOGRAFIA

- ANSYS. (s.f.). *fluent\_13.0\_lecture07-heat-transfer*. Recuperado el 26 de 11 de 2013, de imechanica:  
[http://imechanica.org/files/fluent\\_13.0\\_lecture07-heat-transfer.pdf](http://imechanica.org/files/fluent_13.0_lecture07-heat-transfer.pdf)
- ANSYS. (s.f.). *radiativo Ecuación de Transferencia*. Recuperado el 2013 de 11 de 14, de ANSYS:  
<http://aerojet.engr.ucdavis.edu/fluent/help/html/ug/node576.htm#eq-rte>
- ASCAMM. (2007). Obtenido de  
<http://ascammtraining.blogspot.com/2007/10/tolerancias-de-corte.html>

- Barreras, M. y. ((1996).). *La Combustión* (Vol. Universidade de Engenharia Técnica de Barcelona). Barcelona: Ed. Cenac .
- Basu, P. (2010). *Biomass Gasification and Pyrolysis*. Burlington: British .
- BiomassTechnologyGroup. (2012). *Your partner in bioenergy*. Recuperado el 22 de 08 de 2013, de btg:  
[\[www.btgworld.com/technologies/gasification.html\]](http://www.btgworld.com/technologies/gasification.html)
- Caballero, P. (2007). *Experiencia de México con Pirólisis y .* Recuperado el 18 de 12 de 2013, de cec:  
[http://www.cec.org/Storage/148/17397\\_Caballero1.pdf](http://www.cec.org/Storage/148/17397_Caballero1.pdf)
- Caballero, P. (2007). *Experiencia de México con Pirólisis y Gasificación para el manejo de residuos*. Recuperado el 18 de 12 de 2013, de CEC:  
[http://www.cec.org/Storage/148/17397\\_Caballero1.pdf](http://www.cec.org/Storage/148/17397_Caballero1.pdf)
- Cabanilla, A. (s.f.). *Gasificación de biomasa*. Recuperado el 28 de 04 de 2013, de upcomilla:  
<http://www.upcomillas.es/catedras/crm/report07/ppts/I%20Andr%C3%A9s%20Cabanillas%20CIEMAT.pdf>
- Castells, X. E. (2005). Tratamiento y valorización energética de residuos. En X. E. Castells, *Tratamiento y valorización energética de residuos* (pág. 440). Madrid: Díaz de Santos.
- CEMIOPERU. (2008). Obtenido de  
<http://cemioperu.tripod.com/fresadoras.html>
- CIDAUT, U.-F. (s.f.). *Ecuaciones Generales de la Mecánica de FLuidos*. Recuperado el 13 de 11 de 2013, de UVA:  
[https://www5.uva.es/guia\\_docente/uploads/2012/389/51453/1/Documento2.pdf](https://www5.uva.es/guia_docente/uploads/2012/389/51453/1/Documento2.pdf)