

**ANÁLISIS EXERGÉTICO DE SISTEMAS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA  
ELÉCTRICA CON POTENCIAL USO EN ZONAS NO INTERCONECTADAS DE  
COLOMBIA. ESTUDIO DE CASOS**

**DIANA YULIETH CONTRERAS FLÓREZ  
ANDREA PATRICIA HERNÁNDEZ PINEDA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2016**

**ANÁLISIS EXERGÉTICO DE SISTEMAS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA  
ELÉCTRICA CON POTENCIAL USO EN ZONAS NO INTERCONECTADAS DE  
COLOMBIA. ESTUDIO DE CASOS**

**DIANA YULIETH CONTRERAS FLÓREZ  
ANDREA PATRICIA HERNÁNDEZ PINEDA**

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar el título de  
Ingeniero Químico**

**Director:**

**VIATCHESLAV KAFAROV  
Doctor en Ciencias Sociales**

**Co-director:**

**ANA MARÍA ROSSO CERÓN  
Doctora en Ingeniería Química**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2016**

## DEDICATORIA

*Quiero agradecer a Dios por darme la paciencia y fortaleza para culminar esta importante y soñada etapa de mi vida.*

*Deseo dedicar este trabajo especialmente a mis amados padres Sandra Rocío Flórez Gamboa y Jesús Armando Contreras Silva y agradecerles por su amor, comprensión, apoyo incondicional en mi formación personal y profesional, mi mayor felicidad es compartir mis triunfos con ustedes. Valió la pena, lo logré.*

*A mi hermosa hermana Leydi Viviana, mi segunda mamá, gracias por preocuparse en cada paso de mi vida, desearme lo mejor de corazón y aguantar mi genio y caprichos. Te amo hermanita.*

*A mi bello sobrinito Jesús, quien se convirtió en otra motivación para persistir. Te amo mi pequeñito consentido.*

*A mi querida y especial nonita Mélida, muchas gracias por sus palabras sabias y fortalecedoras en los momentos más difíciles que me ayudaron a seguir en pie en este difícil camino. Gracias por creer y confiar siempre en mí.*

*A mis lindas comadrejas Karina Barrera y Karina Reyes gracias por tantas sonrisas y lágrimas compartidas que hicieron que creciera esta sincera amistad. Las quiero mucho desde la distancia.*

*Al hombre que me recalcó la importancia del amor propio, quien confió en cada una de mis capacidades y estuvo acompañándome siempre para afrontar mis miedos. Eres el mejor amigo, confidente y compañero de vida mi Ju lindo. Te adoro.*

*A mi hermanito Daniel, gracias por escucharme y acompañarme en tantos momentos, a Pablito, pokesito y Robert, personitas especiales en mi vida que siempre tendré presente especialmente por tantas travesuras vividas. Los aprecio mucho mis futuros ingenieros.*

*Y cómo no agradecer a mi compañera de proyecto Andrea Hernández por su colaboración, apoyo y paciencia en nuestro último paso, fue un placer coincidir con una persona sencilla y trabajadora.*

**Diana Yulieth Contreras Flórez**

## DEDICATORIA

*En primer lugar, le dedico este proyecto a Dios por ser mi guía. Le agradezco por bendecirme a cada instante y darme paciencia y perseverancia para culminar esta ardua labor.*

*Igualmente les dedico este trabajo a mis padres Cristina Pineda Amorocho y Pedro José Hernández Rodríguez, quienes con su amor infinito y comprensión han sido mi apoyo incondicional y me enseñaron a luchar por mis sueños.*

*A mi hermano César José Hernández Pineda por sus ánimos y consejos tan emotivos que me dieron fuerzas para continuar. A Pablo Valero por escucharme, aconsejarme y apoyarme en cada momento y a todas las personas que estuvieron a mi lado brindándome su ayuda incondicional, sus enseñanzas y experiencias.*

*Finalmente a mi compañera Diana Contreras, con quien compartí este proceso y quien tuvo paciencia y comprensión en cada una de las largas horas de trabajo y que hace parte de este gran logro.*

**Andrea Patricia Hernández Pineda.**

## **AGRADECIMIENTOS**

A la universidad Industrial de Santander, la Escuela de Ingeniería química y su planta docente por su orientación y conocimientos brindados durante nuestra formación académica.

Al Dr. Sc, Viatcheslav Kafarov por darnos la oportunidad de ejecutar este proyecto.

A la ingeniera Ana María Rosso Cerón por su colaboración durante el desarrollo de este trabajo.

Al CIDES, por recibirnos y brindarnos el apoyo necesario para la ejecución de esta investigación.

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN .....	17
1. MARCO TEÓRICO .....	20
1.1 ZONAS NO INTERCONECTADAS (ZNI).....	20
1.2 RECURSOS RENOVABLES .....	20
1.3 SISTEMAS ENERGÉTICOS.....	21
1.4 SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO .....	21
1.5 SISTEMA EÓLICO.....	22
1.6 SISTEMA HÍDRICO .....	22
1.7 SISTEMA DE BIOMASA .....	23
1.8 SISTEMAS DIÉSEL .....	23
1.9 EXERGÍA .....	24
1.10 SUPERPRO DESIGNER .....	26
1.11 ASPEN HYSYS.....	26
2. METODOLOGÍA .....	27
2.1 DESCRIPCIÓN DE LOS CASOS DE ESTUDIO.....	27
2.2 SELECCIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA.....	28
2.3 ANÁLISIS EXERGÉTICO Y CÁLCULO DE LA EFICIENCIA EXERGÉTICA..	30
2.3.1 Eficiencia exergética de los sistemas .....	30
2.4 EXERGÍA DE LOS RECURSOS DE ENERGÍA PRIMARIA .....	31
2.4.1 Exergía del recurso Eólico .....	31
2.4.2 Exergía del recurso solar .....	32
2.4.3 Exergía del recurso hídrico .....	32
2.4.4 Exergía del recurso de biomasa y diésel .....	32

2.5 SIMULACIÓN UTILIZANDO EL SOFTWARE SUPERPRO DESIGNER Y ASPEN HYSYS.....	35
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS .....	37
3.1 LA MACARENA .....	37
3.2 LA MEDIO ATRATO .....	39
3.3 PUERTO GUZMÁN .....	41
3.4 SAN ANDRÉS.....	44
4. CONCLUSIONES .....	46
5. RECOMENDACIONES.....	47
CITAS BIBLIOGRÁFICAS.....	48
BIBLIOGRAFÍA.....	54
ANEXOS.....	60

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Sistema energético .....	25
Figura 2. Pasos de la metodología trabajada en el desarrollo proyecto .....	27
Figura 3. Eficiencia exergética de los sistemas de generación de La Macarena ..	39
Figura 4. Eficiencia exergética de los sistemas de generación de Medio Atrato ..	41
Figura 5. Eficiencia exergética de los sistemas de generación de Puerto Guzmán .....	43
Figura 6. Eficiencia exergética de los sistemas de generación de San Andrés ....	45

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
ANEXO A. Especificaciones para la selección de los recursos primarios.....	60
ANEXO B. Caracterización química de diferentes tipos de biomasa residual .....	62
ANEXO C. Capacidades instaladas.....	63
ANEXO D. Diagramas de procesos de los sistemas de generación de energía...	65
ANEXO E. Comparación diferentes tipos de biomasa .....	68
ANEXO F. Comparaciones de las tecnologías de transformación de biomasa ....	70
ANEXO G. Factores de capacidad y disponibilidad de las tecnologías .....	71
ANEXO H. Energía generada por los recursos primarios .....	72
ANEXO I. Exergía de los recursos.....	74
ANEXO J. Comparaciones de los diferentes tipos de motor de combustión interna .....	78
ANEXO K. Pasos para el sistema diésel en la simulación en Aspen Hysys .....	79
ANEXO L. Pasos para la simulación de gasificación en SuperPro Designer.....	87
ANEXO M. Simulación generación de energía eléctrica con raquis de plátano....	96

## NOMENCLATURA

$A_a$  = Área del aerogenerador [m]

$A$  = Área del panel solar [m<sup>2</sup>]

$C$  = Consumo de combustible [cantidad del recurso/kwh]

$Cap$  = Capacidad instalada [KW]

$D$  = Cantidad de combustible [kg]

$D_f$  = Factor de disponibilidad [h]

$Ex$  = Exergía del recurso [kwh]

$Ex_q$  = Exergía química [kwh]

$F$  = Factor de capacidad

$g$  = Constante gravitatoria [m/s<sup>2</sup>]

$G$  = Cantidad de combustible [gal]

$h$  = Altura [m]

$h_e$  = Entalpía de entrada [kJ]

$h_s$  = Entalpía de salida [kJ]

$m_e$  = Masa de entrada [kg]

$m_s$  = Masa de salida [kg]

$m_T$  = Masa de reacción [kg]

$\dot{m}_e$  = Flujo másico de entrada [kg/h]

$\dot{m}_s$  = Flujo másico de salida [kg/h]

$m \left( \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} \right)$  = Cambio de la energía cinética del fluido

$mg(Z_2 - Z_1)$  = Cambio en la energía potencial del fluido

$P$  = Presión [Bar]

$PCI$  = Poder Calorífico Inferior [KJ/Kg]

$PCS$  = Poder Calorífico Superior [KJ/Kg]

$P_o(V_2 - V_1)$  = Trabajo PV respecto a la presión externa

$Q_c$  = Caudal [m<sup>3</sup>/s]

$Q$  = Calor transferido [KJ]  
 $r$ =Velocidad de reacción  
 $R$ = Radiación [kwh/m<sup>2</sup>]  
 $T_o$ = Temperatura estándar [K]  
 $T_{sol}$ = Temperatura del Sol [6000K]  
 $T$ = Temperatura del sistema [K]  
 $T_o(S_2 - S_1)$ = Calor transferido de los alrededores  
 $(U_2 - U_1)$  = Cambio de la energía interna  
 $v$  = Velocidad del viento [m/s]  
 $W$ = Trabajo [KJ]  
 $XC$ =Fracción másica del Carbono  
 $XH$ = Fracción másica del hidrógeno  
 $XO$  =Fracción másica del Oxígeno  
 $z_o$  = Altitud del entorno de referencia [m]  
 $\Delta H$ =Entalpía de formación del combustible [KJ/molC]  
 $\rho$  =Densidad del aire [kg/m<sup>3</sup>]  
 $\beta$  = Factor exergético del combustible  
 $\eta$  =Eficiencia exergética  
 $\dot{\eta}$  =Eficiencia termodinámica  
 $\lambda$  = Calor de vaporización [kJ/kg]

## RESUMEN

**TÍTULO:** ANÁLISIS EXERGÉTICO DE SISTEMAS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA CON POTENCIAL USO EN ZONAS NO INTERCONECTADAS DE COLOMBIA. ESTUDIO DE CASOS\*

**AUTORES:** DIANA YULIETH CONTRERAS FLÓREZ\*\*  
ANDREA PATRICIA HERNÁNDEZ PINEDA.

**PALABRAS CLAVES:** Eficiencia exergética, zonas no interconectadas, gasificación de biomasa residual agrícola, generadores diésel, paneles solares fotovoltaicos, pequeñas centrales hídricas, generadores eólicos.

**DESCRIPCIÓN:** El presente trabajo tiene por objetivo realizar un análisis exergético de recursos de energía primaria: solar, hídrico, eólico, biomasa residual agrícola y el convencional diésel, con el fin de evaluar la disponibilidad del recurso y la posible implementación de sistemas de generación que suplan la demanda energética en cuatro casos de estudio de zonas no interconectadas (ZNI) de Colombia: Puerto Guzmán-Putumayo, Medio Atrato-Chocó, La Macarena-Meta, y la isla de San Andrés en el Archipiélago de San Andrés y Providencia.

Para el análisis exergético se inició por determinar la exergía química y física asociada a los recursos energéticos disponibles en las zonas. La exergía química del diésel Fuel oil #2 (combustible utilizado en las ZNI según la CREG) [8] y raquis de plátano (residuo de biomasa con mayor potencial) [12], fueron obtenidas a partir de los datos de la composición elemental, poderes caloríficos inferiores y el consumo específico del combustible. En lo que respecta a los demás recursos, fueron utilizadas las ecuaciones propuestas por Weston [11].

Posteriormente, con la información de la demanda de energía en cada caso, fueron seleccionados diferentes sistemas de generación (con capacidades comerciales) en aras de encontrar la energía que pueden producir (exergía de salida) y si el recurso es suficiente para su implementación. En todos los casos se calculó la eficiencia exergética de los sistemas con el fin de evaluar los de mayor beneficio en cada zona.

Se utilizaron los softwares Aspen Hysys v8.6 y SuperPro Designer 9.5 para determinar la cantidad de diésel y biomasa necesaria para generar la energía deseada en cada caso y compararla con el valor teórico.

Finalmente, el sistema diésel reportó la eficiencia exergética más alta, seguidas por los sistemas de generación de biomasa, eólico, solar e hídrico respectivamente.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico –Químicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Viatcheslav Kafarov, Doctorado en Ciencias Técnicas. Co-director: Ana María Rosso Cerón, Doctorado en Ingeniería Química

## ABSTRACT

**TITLE:** EXERGY ANALYSIS OF ELECTRIC POWER GENERATION SYSTEMS POTENTIAL TO BE USED IN NON-INTERCONNECTED ZONES OF COLOMBIAN (ZNI). STUDY OF CASES.\*

**AUTHORS:** DIANA YULIETH CONTRERAS FLÓREZ\*\*  
ANDREA PATRICIA HERNÁNDEZ PINEDA.

**KEYWORDS:** Exergetic efficiency, ZNI, gasification and agricultural waste biomass generation, diesel generators, solar photovoltaic, small hydro plants, wind generators.

### DESCRIPTION

The main aim of this paper is an exergy analysis of primary energy resources such as: solar, water and wind energy, agricultural residual biomass and conventional diesel. This process is done in order to assess the availability of the resource and the possible implementation of generation systems that can supply the energy demand in four case studies of the following non-interconnected areas (ZNI) of Colombia: Puerto Guzmán-Putumayo, Medio Atrato-Chocó, La Macarena-Meta, and the island of San Andres located in the Archipelago of San Andres and Providencia.

The first step in the exergy analysis is to determine the chemical and physical exergy associated to the available energy resources in the zones. The chemical exergy of the diesel fuel Oil #2 that is used in ZNI according to CREG) [8] and the "Raquis de Plátano" which is the biomass residue with greater potential, according to a previous research [12], lower calorific powers and specific fuel consumption were obtained from the data elemental composition. Regarding the other sources, equations proposed by Weston [11] proposals is used.

Later, different generation systems with commercial skills were selected according to the energy demand information collected in each case. This process was done in order to find the energy that can generate exergy output and to know if the resource is sufficient for its implementation. In all cases, the exergetic efficiency of the systems is calculated in order to evaluate the most beneficial ones in each zone.

The software Aspen Hysys v8.6 and Super-Pro Designer 9.5 is used to determine the amount of diesel and biomass needed to generate the desired energy in each case and compare it with the theoretical value.

Finally, the diesel system reported the highest exergy efficiency, followed by the systems of biomass, wind, solar generation and water respectively.

---

\* Degree work

\*\* Physical-chemical Faculty of Engineering. School of Chemical Engineering. Director: Viatcheslav Kafarov, Doctor of Technical Sciences. Co-director: Ana Maria Rosso Ceron, PhD in Chemical Engineering

## INTRODUCCIÓN

La demanda energética a nivel mundial ha sido abastecida mediante energías convencionales que incluyen el uso de combustibles fósiles como carbón, petróleo y gas natural que han presentado desventajas como la liberación de cantidades significativas de gases de efecto invernadero a la atmósfera, ocasionando un impacto ambiental considerable y la disminución de su disponibilidad a través del tiempo.

Por esta razón se ha venido desarrollando e implementando el uso de fuentes renovables para la generación de energía eléctrica que contribuyan con el crecimiento de una región determinada y principalmente que busquen satisfacer las necesidades básicas de la población, sin dejar a un lado el aporte positivo a la preservación del medio ambiente.

En términos energéticos Colombia cuenta con un potencial hídrico de 90000 MW [9] que puede ser empleado para generación de energía eléctrica en todo el país. Así mismo, existe un valor de radiación y brillo solar alto en regiones como La Guajira que supera los 6,0 KWh/m<sup>2</sup>/día, comparado con el máximo mundial que es de aproximadamente 6,8 KWh/m<sup>2</sup>/día.

Con respecto al recurso eólico las velocidades de vientos alisios prevalecen en ciertas regiones del país de acuerdo con la estación del año principalmente en la Península de la Guajira con una velocidad de 9,8 m/s, lugar en donde está construido el único parque de generación de energía eólica, el Jepírachi, con una capacidad instalada de 19,5 MW [17], pero existen más sectores en el país con disponibilidad de vientos para la explotación de este recurso [15].

De igual manera, los desechos de la producción agroindustrial son recursos potenciales capaces de suplir las necesidades energéticas. Colombia por su posición geográfica cuenta con una amplia zona agrícola que genera una fuente importante de biomasa residual, con un potencial de 11.828 MWh/año de residuos agroindustriales y de cosecha; que puede ser transformado mediante procesos termoquímicos como la combustión, pirólisis y gasificación para la generación de energía [10].

Por otro lado, el sistema energético nacional se divide en zonas interconectadas y no interconectadas. Las primeras son aquellas que están vinculadas al servicio de energía eléctrica a través del Sistema Interconectado Nacional (SIN) y las Zonas No Interconectadas (ZNI) son aquellos municipios o corregimientos que no están unidos al SIN [2] y son el caso clave en el presente estudio dado que carecen de un servicio de energía eléctrica confiable, fundamental para el desarrollo social, económico y cultural de la población.

En las ZNI el ACPM No. 2 (diésel) es el recurso más utilizado para la generación de electricidad a través de grupos electrógenos, no obstante, estos sistemas no son sostenibles debido a los altos costo en transporte de combustible, en infraestructura; y que adicionalmente en la mayoría de ZNI no prestan el servicio las 24 h.

Consecuentemente, para abastecer la demanda energética existente en las ZNI es trascendental evaluar la disponibilidad energética de los recursos renovables locales (hídrico, eólico, solar, biomasa) y compararlos con los utilizados actualmente (el diésel).

En este sentido, el presente trabajo de investigación propone realizar un análisis exergético con el objetivo de dar una valoración y caracterización de los recursos mencionados, a través del criterio de eficiencia exergética determinado mediante

balances de masa, energía y exergía de los sistemas solar fotovoltaico, aerogeneradores, plantas diésel, gasificación de biomasa y pequeñas centrales hídricas, puesto que son potencialmente útiles en la generación de energía de cuatro casos de estudio: Medio Atrato- Chocó, Puerto Guzmán-Putumayo, La Macarena-Meta, y la isla San Andrés-Archipiélago de San Andrés y Providencia.

## **1. MARCO TEÓRICO**

### **1.1 ZONAS NO INTERCONECTADAS (ZNI)**

De acuerdo a la resolución 114 de 1996 de la Comisión de Regulación de Energía y Gas CREG se entiende como zona no interconectada el área geográfica en donde no se presta el servicio público de electricidad a través del Sistema Interconectado Nacional [2] .

Las ZNI ocupan el 66 % del territorio nacional, distribuida en 1.199 localidades con una densidad de población de 3,05 habitantes por km<sup>2</sup>. Habitan 1´800.000 personas, de las cuales sólo el 34% tiene servicio de energía eléctrica [3].

Estas zonas se caracterizan por ser lugares de difícil acceso, donde se concentra población vulnerable y de escasa capacidad de pago, convirtiéndose en una opción no viable para la expansión del SIN.

En su mayoría estas zonas cuentan con un servicio intermitente de energía, en promedio 4 horas diarias, debido a problemas con el transporte de diésel y el costo de las plantas. Por lo tanto, se hace necesaria la estrategia de energización con fuentes renovables [1].

### **1.2 RECURSOS RENOVABLES**

Son aquellos cuya fuente reside en fenómenos de la naturaleza, procesos o materiales susceptibles de ser transformados en energía aprovechable por la

humanidad, y que se regeneran naturalmente, por lo que se encuentran disponibles de forma continua o periódica [4].

Entre los recursos renovables se encuentran la biomasa, el recurso solar, hídrico y eólico, utilizados para producir energía renovable. Para la obtención de electricidad cada una de las energías implica diferentes tipos de tecnologías que utilizan diversos elementos o equipos de transformación para obtener energía en forma de electricidad, fuerza motriz, calor o combustibles [5].

### **1.3 SISTEMAS ENERGÉTICOS**

Para este estudio se define a un sistema energético como la entrada del recurso primario (solar, eólico, hídrico, diésel, biomasa) asociado a la tecnología de transformación (paneles fotovoltaicos, aerogeneradores, pequeñas centrales hidroeléctricas, grupos electrógenos conformados por motores de combustión interna y gasificador) y la salida corresponde a la energía generada que es la electricidad (Anexo D-6).

### **1.4 SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO**

Un sistema solar fotovoltaico está conformado por el recurso solar y la tecnología fotovoltaica, en la que la luz del sol se puede convertir directamente en electricidad mediante celdas fotovoltaicas [1]. El proceso se muestra en el (Anexo D-3)

## 1.5 SISTEMA EÓLICO

El sistema eólico está constituido por el recurso eólico (viento) y las turbinas eólicas o aerogeneradores, que son los sistemas utilizados para aprovechar mecánicamente la energía contenida en el viento y transformarla en energía eléctrica. Generalmente las tecnologías eólicas varían de acuerdo a su tamaño y estilo, pero se pueden caracterizar por la orientación del eje de las turbinas que puede ser horizontal o vertical, y porque pueden estar ubicadas en tierra firme o el mar (“*onshore* u *offshore*”). El poder de generación está determinado por la capacidad de la turbina (KW), la velocidad del viento y las características de la turbina (altura y diámetro de los rotores) [1]. El proceso se indica en el (Anexo D-5)

## 1.6 SISTEMA HÍDRICO

El sistema hídrico está conformado por el recurso hídrico y la tecnología de pequeñas centrales hidroeléctricas que son instalaciones donde se utiliza la energía hidráulica para generar reducidas cantidades de electricidad, hasta 10.000 kW aproximadamente [5]. En el (Anexo D-4) se ilustra el proceso.

Según la Organización Latinoamericana de energía (OLADE) las capacidades instaladas en las plantas típicas de las zonas no interconectadas se clasifican de la siguiente manera [15]:

- Picocentrales: Capacidad instalada entre 0,5 y 5 KW
- Microcentrales: Capacidad instalada entre 5 y 50 KW
- Minicentrales: Capacidad instalada entre 50 y 500 KW

- Pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH): Capacidad instalada entre 500 y 10000 KW.

## **1.7 SISTEMA DE BIOMASA**

Este sistema está compuesto por la biomasa que es material orgánico proveniente de animales, vegetales y microbiológicos que son utilizados como fuente de energía [7] mediante procesos termoquímicos: pirólisis, combustión y gasificación (Anexo F). La biomasa se puede clasificar en dos tipos: biomasa de cultivos energéticos y biomasa residual. La biomasa de cultivos energéticos requiere de la planificación y el cuidado de cultivos dirigidos a la generación de energía y la biomasa residual es un subproducto que proviene de actividades agrícolas, silvícolas y ganaderas, así como de industrias agroalimentarias y de transformación de madera.

## **1.8 SISTEMAS DIÉSEL**

Los sistemas diésel están constituidos por el recurso no renovable diésel o ACPM conocido también como fuel oil N°2, el cual es un aceite combustible obtenido de la destilación del petróleo [8] utilizando como tecnología uno o más grupos electrógenos para la generación de energía. El diésel ó ACPM es comúnmente empleado en las ZNI para el abastecimiento de energía mediante grupos electrógenos que son la unión de motores de combustión interna (diésel) y generadores, que convierten la energía mecánica en energía eléctrica (Anexo D-2).

## 1.9 EXERGÍA

Los sistemas termodinámicos se componen de diferentes “portadores” de energía, en los que una base común de comparación es requerida. Un concepto integral para el desarrollo de tal base de comparación es la exergía. En general, la energía consiste en exergía y anergía. Teóricamente la exergía es la parte utilizable de energía, cuantificada como la máxima cantidad de trabajo disponible de un sistema termodinámico [29] y la anergía, que es la energía sin capacidad de transformarse en trabajo.

La exergía total asociada a una corriente de materia se manifiesta en cuatro diferentes formas: potencial, cinética, física y química. Los componentes cinéticos y potenciales de la exergía son transformados siempre en trabajo, sin embargo, en sistemas térmicos estas energías son despreciables en las ecuaciones de exergía [14].

La exergía física es el trabajo que se puede obtener sometiendo a la sustancia a procesos físicos reversibles desde la temperatura y presión inicial, hasta el estado determinado por la presión y la temperatura del entorno. La exergía química es el trabajo que se puede obtener de una sustancia que se encuentra a la presión y temperatura del entorno si alcanza un estado de equilibrio termodinámico mediante reacciones químicas [10], esto se denota en la siguiente expresión:

$$Ex = Ex_p + Ex_c + Ex_f + Ex_q \quad (1)$$

La exergía de flujo de una sustancia cualquiera, por mol de materia, está denotada por la formulación general

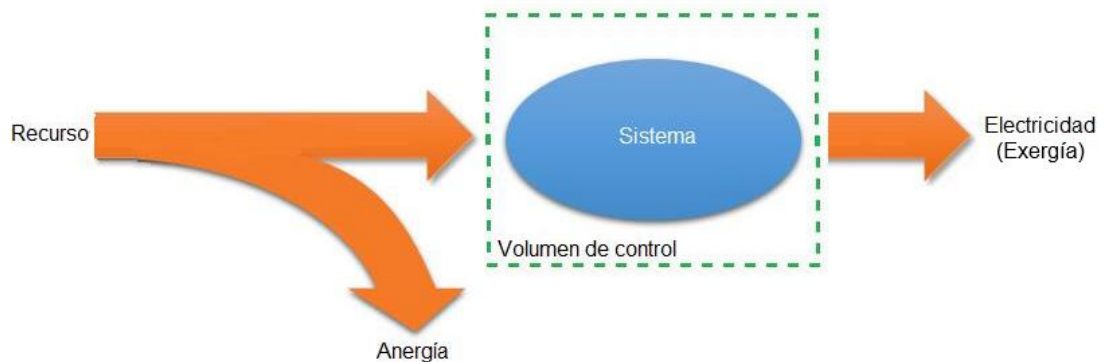
$$\psi = (h - h_o) - T_o(s - s_o) - \sum y_i(\mu_i - \mu_{io}) \quad (2)$$

En donde,  $(h - h_o)$  y  $(s - s_o)$  es la variación de la entalpía y entropía por unidad por mol de materia entre  $P_o, T_o$  y  $P, T$ . El término de  $\mu_i$  es el potencial químico por mol de la especie  $i$  a  $P_o, T_o$  y composición de la mezcla;  $\mu_{i_o}$  representa el potencial químico de la especie  $i$  en situación de equilibrio con el medio ambiente [6].

Un análisis exergético se hace de acuerdo al proceso que se tiene a continuación:

1. Descripción del proceso que se quiere estudiar
2. División del sistema en volúmenes de control
3. Definición del ambiente del sistema
4. Consideraciones para facilitar el desarrollo del modelo
5. Mediante la primera ley de la termodinámica se calculan los flujos de masa y energía.
6. Cálculo de los flujos de exergía
7. Cálculo de la eficiencia exergética

**Figura 1. Sistema energético**



## **1.10 SUPERPRO DESIGNER**

SuperPro Designer, es un programa computacional para realizar la simulación de procesos en estado estacionario. La simulación permite predecir la operación de un proceso cuando se han alcanzado condiciones de estacionalidad, esto facilita el estudio de la sensibilidad del sistema frente a cambios en los distintos parámetros y variables de operación, de esta manera pueden ser ajustados usando técnicas de optimización para determinar las mejores condiciones operacionales. Cuenta con modelos matemáticos para operaciones unitarias y con una serie de equipos representativos de cada operación, en donde es posible el cálculo de los balances de masa y energía, y con ello el dimensionamiento de los equipos [33].

## **1.11 ASPEN HYSYS**

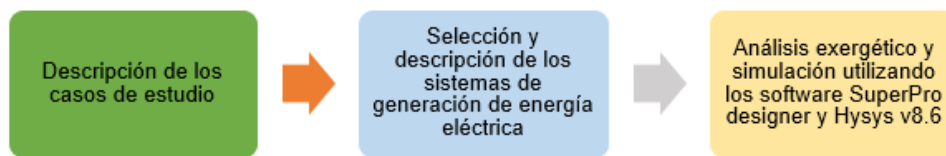
Aspen Hysys es un software utilizado para la simulación de procesos en estado estacionario y transitorio. Sus operaciones y propiedades permiten modelar una amplia gama de procesos. Este programa ha sido usado ampliamente en la industria para investigación, desarrollo, simulación y diseño. Sirve como plataforma ingenieril para modelar procesos como procesamiento de gases, instalaciones criogénicas, procesos químicos y de refinación etc.

La simulación de procesos permite predecir el comportamiento de un proceso mediante el uso básico de relaciones de ingeniería, tales como balances de masa y energía, y la fase y equilibrio químico. Teniendo en cuenta los datos termodinámicos, operativos y modelos de equipos rigurosos se puede simular el comportamiento de una planta real [21].

## 2. METODOLOGÍA

Para el desarrollo de la metodología se llevaron a cabo los siguientes pasos:

**Figura 2. Pasos de la metodología trabajada en el desarrollo proyecto**



### 2.1 DESCRIPCIÓN DE LOS CASOS DE ESTUDIO

Para determinar las zonas de estudio se hizo una revisión bibliográfica [37] a partir de la cual se escogieron cuatro casos, teniendo en cuenta que no hicieran parte de una reserva o parque natural y no tuvieran presencia de resguardos indígenas o conflicto armado. Adicionalmente, fue estimada la demanda energética, asumiendo un consumo promedio por vivienda de 92 kwh/mes según la estimación propuesta en el Plan Indicativo de Expansión y Cobertura de Energía eléctrica [20]. Los municipios pertenecientes a las ZNI escogidos fueron:

La Macarena ubicada en el departamento del Meta con temperatura media de 25°C, cuenta con 2.548 usuarios, cuya demanda energética es de 2.812.992 KWh/año.

En Puerto Guzmán, se trabajó con la Vereda el Bututo ubicado en el departamento de Putumayo, debido a su clima cálido y húmedo el principal cultivo es el plátano. Presenta un número de usuarios de 53 y la demanda energética es de 58.512 KWh/año.

El municipio de Medio Atrato que se encuentra al occidente del departamento del Chocó, rico por sus fuentes hídricas, selva tropical y variedad de flora y fauna. Cuenta con 128 usuarios y su demanda energética es de 141.312 KWh/año.

La isla de San Andrés, localizada al occidente del mar Caribe, por su localización en la zona intertropical se presentan altas temperaturas de 27,3 °C, con una alta influencia de vientos alisios presentes en algunas épocas del año y una demanda energética de 12.158.352 KWh/año correspondiente a los 11.013 usuarios [26].

## **2.2 SELECCIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

Con el fin de determinar los recursos energéticos en cada uno de los casos de estudio se utilizaron los datos disponibles de una investigación previa [12]. Los aspectos de selección fueron: el potencial energético y la disponibilidad de cada recurso primario en los casos de estudio (Anexo A) y se escogieron los sistemas de generadores eólicos, solar fotovoltaica, pequeñas centrales hidroeléctricas, gasificación de biomasa y motores de combustión interna para el diésel, estos últimos se seleccionaron teniendo en cuenta parámetros comparativos como la eficiencia y madurez, (Anexo F) (Anexo J).

A partir de la demanda y el mercado existente se seleccionaron para todos los casos tres capacidades de plantas diferentes por tecnología correspondiente a los tres escenarios (bajo, medio, alto) [37], descritas en el (Anexo C ) en donde es importante considerar parámetros operativos como el factor de planta (que relaciona la potencia generada con la capacidad instalada de la planta) y el factor de disponibilidad (horas de funcionamiento anual de la planta sin paradas) ya que de estos depende la energía generada (Anexo G).

De acuerdo con la selección anterior:

- La biomasa sólida con sistemas de gasificación cuyo gas de síntesis es transformado en energía eléctrica mediante motores de combustión interna, sería viable en La Macarena, Medio Atrato y Puerto Guzmán [12], donde se seleccionó como fuente de combustible el raquis de plátano, puesto que es un cultivo permanente de gran potencial que permite evitar el desabastecimiento de materia prima en el gasificador, contiene una humedad 40% apta para procesos de combustión [13].
- Teóricamente por razones económicas y tecnológicas se escogió como agente gasificante al aire, y así se obtuvo el gas de síntesis que finalmente fue conducido a un motor de combustión interna para convertirse en energía eléctrica.
- La tecnología de motores de combustión interna de diésel sería viable en todas las zonas. Por lo tanto, se escogió el combustible, fuel oil # 2 o ACPM ya que su infraestructura e inversión es menor respecto al uso de combustibles pesados como el diésel no.6 [16,18].

Por otra parte, los sistemas fotovoltaicos serían factibles en todos los casos [12]. [5].

La generación con el recurso hídrico sería viable en los casos de La Macarena, Medio Atrato y Puerto Guzmán [12]. Como sistema de generación se seleccionó una central a filo de agua, que funciona aprovechando la energía cinética y potencial del agua para generar energía eléctrica, utilizando el agua fluyente sin necesidad de almacenarla lo que minimiza el costo de instalación para los municipios.

-Finalmente, el recurso eólico sería viable en la zona de San Andrés [12]. Esta transformación se llevaría a cabo mediante la tecnología de aerogeneradores o turbinas eólicas.

## **2.3 ANÁLISIS EXERGÉTICO Y CÁLCULO DE LA EFICIENCIA EXERGÉTICA**

El análisis exergético se llevó a cabo determinando la eficiencia exergética de los sistemas como se describe en los siguientes pasos:

**2.3.1 Eficiencia exergética de los sistemas.** La eficiencia exergética proporciona una mejor medida del uso de la energía en un sistema energético desde el punto de vista termodinámico y se define como el cociente entre la exergía obtenida que en este caso es la energía generada y la exergía disponible correspondiente al recurso primario de cada tecnología [27].

$$\eta = \frac{\textit{Exergía a la salida}}{\textit{Exergía a la entrada}} \quad (3)$$

La exergía de salida de los sistemas es la electricidad y se calculó teniendo en cuenta el factor de planta, el factor de disponibilidad y la capacidad de cada tecnología disponible en el mercado (Anexo G) [31] como se muestra en la ecuación (4):

$$Energía = F * D_f * Cap \quad (4)$$

Para el caso de diésel y biomasa se consideró el consumo específico de combustible que permite conocer la exergía real aprovechada en el sistema y se define como la cantidad de recurso necesario para generar 1 KWh; por lo tanto, a menor consumo específico, mayor eficiencia del sistema [36].

$$C = \frac{1}{\dot{\eta}_{PCS}} \quad (5)$$

## 2.4 EXERGÍA DE LOS RECURSOS DE ENERGÍA PRIMARIA

Para el cálculo de la exergía en los recursos estudiados se tomó la ecuación general de exergía de un proceso de flujo y se hicieron las respectivas simplificaciones para cada caso [28].

$$Ex = (U_2 - U_1) + P_o(V_2 - V_1) - T_o(S_2 - S_1) + m \left( \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} \right) + mg(Z_2 - Z_1) \quad (6)$$

Se consideró en la ecuación (6) que  $m = \rho Av$

**2.4.1 Exergía del recurso Eólico.** La exergía del recurso eólico (entrada del sistema) [11] se expresa en la ecuación (7):

$$Ex = \frac{1}{2} \rho A_a v_o^3 \quad (7)$$

**2.4.2 Exergía del recurso solar.** La exergía del recurso solar (entrada del sistema) [11] se muestra en la ecuación (8):

$$Ex = \left[ 1 + \frac{1}{3} \left( \frac{T_o}{T_{sol}} \right)^4 - \frac{4}{3} \frac{T_o}{T_{sol}} \right] * R * A \quad (8)$$

**2.4.3 Exergía del recurso hídrico.** La ecuación de la exergía del recurso hídrico (entrada del sistema) [11] se define en la ecuación (9):

$$Ex = g * Q_c * h * \rho \quad (9)$$

**2.4.4 Exergía del recurso de biomasa y diésel.** Aplicando la primera ley de la termodinámica:

#### Balance de masa

$$\dot{m}_e - \dot{m}_s = m_T r \quad (10)$$

#### Balance de energía

Despreciando la energía cinética y potencial la expresión se redujo a:

$$m_e h_e - m_s h_s + Q - W = 0 \quad (11)$$

La exergía para la biomasa y diésel se expresa en la ecuación (12):

$$Ex = G * Ex_q \quad (12)$$

Para la obtención de la exergía de la biomasa y diésel es necesario calcular la exergía química asociada a cada recurso, debido a que estos son transformados mediante procesos de combustión. En los dos casos se plantearon tres escenarios (alto, bajo, medio) variando el poder calorífico inferior.

**2.4.4.1 Exergía química de la biomasa:** Partiendo de la metodología propuesta en investigaciones anteriores [24] se utilizó la ecuación (13):

$$Ex_q = \beta * PCI \quad (13)$$

El factor exergético  $\beta$  [24], se calculó a partir la fracción másica de la composición elemental del raquis de plátano ver (Anexo B-1) en base seca con la siguiente expresión:

$$\beta = \left( 1,044 + 0,016 \left( \frac{XH}{XC} \right) - 0,349 \frac{(XO-XC) \left[ 1 - 0,53 \left( \frac{XH}{XC} \right) + 0,049 \left( \frac{XN}{XC} \right) \right]}{1 - 0,412 \left( \frac{XO}{XC} \right)} \right) \quad (14)$$

- Para el escenario alto, el poder calorífico inferior y superior se obtuvo mediante la ecuación de Dulong [24] (15):

$$PCI = PCS - \lambda(9H + M) \quad (15)$$

Donde  $\lambda=2258$  kJ/kg M=humedad A= Cenizas

$$PCS = 349.1C + 1178.3H + 100.5S - 103.4O - 15.1N - 21.1A \quad (16)$$

- Para el escenario bajo, el poder calorífico inferior se calculó con el método de una investigación anterior [38] con la ecuación (17):

$$PCI = 337.3C + 1418.9(H - O/8) + 93.1S + 23.3N \quad (17)$$

Donde C, H, S, O, N son los valores de la composición elemental (%peso/peso).

- El escenario medio se promedió con los valores alto y bajo.

**2.4.4.2 Exergía química del diésel:** Partiendo de la ecuación (13) se halló la exergía química con base en la metodología propuesta en una investigación [23] siguiendo las siguientes ecuaciones:

$$Ex_q = \Delta h_{f0} - T_o S_o - \sum f_j m_j^o \quad (18)$$

$$\Delta h_{f0} = p_{CS} + c * \Delta h_{f0,CO2} + \frac{h}{2} * \Delta h_{f0,H2O} + s * \Delta h_{f0,SO2} \quad (19)$$

- El PCS y PCI para el escenario alto se obtuvo con la composición elemental del diésel mediante las ecuaciones [22]:

$$PCS = 430,39 + 114,63 h - 135,42 o + 83,33 n + 359,25 s \quad (20)$$

$$PCI = PCS - 2500(9 H + W) [KJ/Kg] \quad (21)$$

- Para el escenario bajo, se calcularon a partir de las ecuaciones encontradas en un trabajo de investigación [25] como se muestra en las expresiones:

$$PCS = 34,8C + 93,8H + 10,44S + 6,28N - 10,8O + 2,5(9H) \quad (22)$$

$$PCI = 34,8C + 93,8H + 10,44S + 6,28N - 10,8 O + 2,5W \quad (23)$$

Donde C, H, O, N, S están dando en porcentaje en peso (%p/p)

- En el escenario medio, el PCI se calculó con la ecuación (21) y el PCS con la ecuación encontrada en una investigación previa [22], como se muestra (24)

$$PCS = 33.900 C + 143.000 (H - O/8) + 10.500 S \quad (24)$$

Seguidamente se realizó el cálculo de la entropía

$$S_o = (4,69 + 18,43 h + 44,66 o + 86,14 n + 86,73 s) * 10^{-3} \text{ KJ/ mol C.K} \quad (25)$$

A partir de la composición atómica del combustible, y el potencial químico de cada elemento se tiene:

$$\sum f_j m^o_j = f_c m^o_c + f_H m^o_H + f_o m^o_o + f_N m^o_N + f_S m^o_S \quad (26)$$

Donde:

$$f_c = C = 1, f_H = h, \quad f_o = o, f_N = n, \quad f_S = s$$

$m^o_j = \text{potencial químico de cada elemento químico}$

## 2.5 SIMULACIÓN UTILIZANDO EL SOFTWARE SUPERPRO DESIGNER Y ASPEN HYSYS

Los softwares Aspen Hysys y SuperPro Designer se utilizaron con el fin de obtener la cantidad necesaria de diésel y biomasa para generar la energía a suministrar en las diferentes zonas de estudio y posteriormente ser comparada con los valores reportados en la literatura. Es de destacar que estos datos son necesarios para el cálculo de la eficiencia exergética de los sistemas de diésel y de biomasa.

Para el caso del diésel se utilizó el software Aspen Hysys, se seleccionó el paquete termodinámico Peng Robinson por ser el más adecuado para trabajar hidrocarburos, se escogió un reactor estequiométrico debido a que se desconoce la cinética de la reacción, sin embargo se conoce la estequiometría, se establecieron las condiciones de presión a 4.6 Mpa y temperatura de 25°C y se llevó a cabo la reacción química con la molécula de n-hexadecano ya que se encuentra en mayor proporción en el diésel (Anexo K).

SuperPro Designer fue utilizado para transformar la biomasa sólida en gas de síntesis y posteriormente convertirlo en energía eléctrica mediante el uso de Aspen Hysys, las condiciones de operación se encuentran en el (Anexo L-2). Además la composición de la biomasa alimentada debe introducirse al gasificador en base seca y especificar su poder calorífico superior.

### 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

#### 3.1 LA MACARENA

En la figura 3, se muestran los resultados de las eficiencias correspondientes a las tres capacidades (escenarios) para cada tecnología viable de La Macarena.

Como se observa en la figura 3, el diésel es el recurso energético con mayor eficiencia. De acuerdo con los resultados obtenidos en los tres escenarios simulados con ayuda del software Aspen Hysys v8.6, para generar en promedio 356.236 KWh/año de energía, se requiere 545.533 KWh/año de exergía, correspondiente a 14.133 galones de combustible diésel anuales.

Según los datos históricos reportados en este municipio, en promedio se disponen de 26.717 gal/año cuya exergía es de 1.031.282 KWh/ año lo cual significa que la oferta de combustible es suficiente, hecho que se evidencia en las eficiencias obtenidas en la simulación para los tres escenarios bajo, medio, alto, correspondientes a 66%, 65% y 60% respectivamente (figura 3), por tanto, el sistema es eficiente al suministrar menor exergía del recurso.

Para conocer la energía aprovechada a la entrada del sistema, en la simulación se utilizó un consumo específico de combustible de 0,03 gal/KWh que se obtuvo a partir de la eficiencia y poder calórico inferior, en la parte teórica se encontró en la literatura un consumo de combustible de 0,075 gal/KWh [36].

Para el sistema solar fotovoltaico, la energía media generada es de 418.500 KWh/año que se determinó con base a las capacidades encontradas y horas de servicio de las plantas (Anexo G-2). Al aumentar la radiación, temperatura y áreas

de paneles solares, se incrementa la exergía de entrada del sistema que en promedio fue de 9.530.584,839 KWh/año, ocasionando la disminución de eficiencias con valores del 4% como se indica en la figura 3, sin embargo, es posible su implementación.

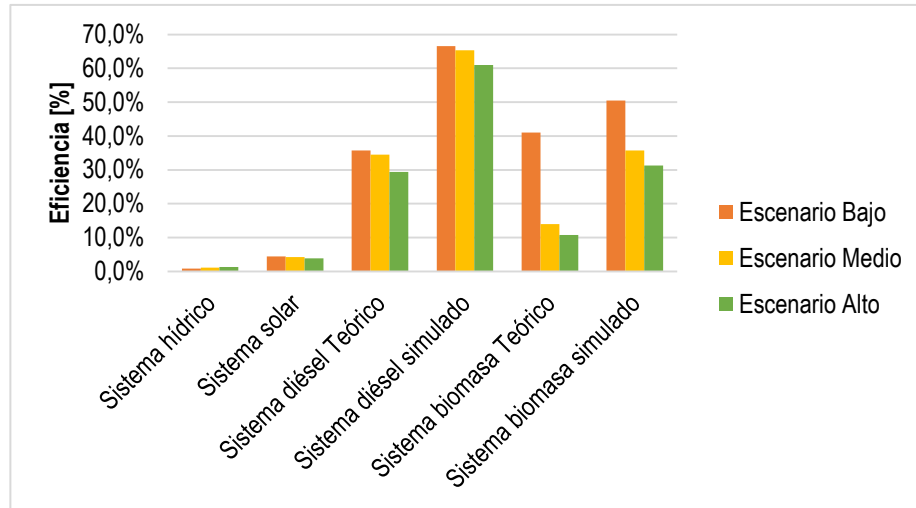
En cuanto a las PCH la energía producida fue de 495.000 KWh/año y la exergía promedio del río Guayabero de 46.539.032 KWh/año (Anexo I), se evidencia que cuando los caudales del Río Guayabero disminuyen y aumentan las alturas y capacidades, la exergía a la entrada del sistema se incrementa obteniendo los valores bajos de eficiencia exergética entre 0,8% y 1,3 %.

Finalmente, en el sistema de la biomasa, según los valores simulados se evidenciaron eficiencias de 31% a 50%, generando una energía 140.689 KWh/año cuya exergía de entrada fue 9.830 KWh/año correspondiente a los 2.682 Kg de biomasa disponibles en la zona.

Sin embargo, esta biomasa no es suficiente para generar la energía calculada teóricamente de 468.000 KWh/año (Anexo-H) que se obtuvo partir de las capacidades encontradas y un factor de disponibilidad de 3000 horas, por tanto, se presentaron eficiencias menores de 14% a 41%.

En la simulación se utilizó un consumo específico de combustible de 0,25 Kg/KWh y en los valores teóricos es de 2,53 Kg/KWh con el fin de conocer la energía aprovechada a la entrada del sistema. Finalmente, los datos de energía teóricos y simulados obtenidos no suministran la energía suficiente debido a que solo se abastece el 5% de la demanda reportada.

**Figura 3. Eficiencia exergetica de los sistemas de generaci3n de La Macarena**



### 3.2 LA MEDIO ATRATO

En la figura 4 se observa que, en la zona de Medio Atrato segun los valores simulados, existe una alta eficiencia exergetica para el sistema diésel entre 53% y 70%. La exergetia a la entrada es de 372.734 KWh/año correspondiente a 9.656 galones para generar en promedio 240.752 KWh/año de energia. El consumo especifico de combustible es de 0,04KWh/año que se calculó a partir de la eficiencia energetica y el poder calorico inferior.

De acuerdo a los valores reportados teóricamente se presentaron menores eficiencias exergeticas de 29% a 35% ya que se utilizó un consumo de combustible de 0,075 gal/KWh [36]. Dado que se disponen de 18.056 galones/año cuya exergetia a la entrada de 696.961 KWh/año, es posible abastecer la demanda energetica en su totalidad.

En el sistema de la biomasa, según los valores simulados con ayuda del software SuperPro Designer (Anexo L) y Aspen Hysys v8.6 (Anexo M) se evidencia eficiencias de 12% a 22%, generando una energía 128.547 KWh/año cuya exergía de entrada es 8.982 KWh/año correspondiente a los 2.451 Kg de biomasa disponibles en la zona.

Sin embargo, esta biomasa no es suficiente para generar la energía calculada teóricamente de 211.200 KWh/año (Anexo H) que se obtuvo partir de las capacidades encontradas y un factor de disponibilidad de 3000 horas, por tanto, se presentaron eficiencias menores de 6% a 11%.

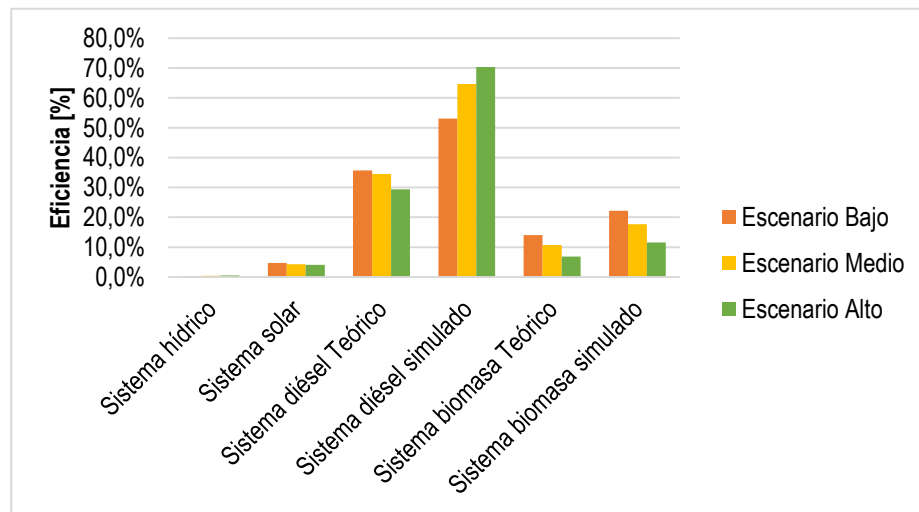
Para conocer la exergía real aprovechada se utilizó un consumo específico de combustible de 1,52 Kg/KWh para el caso de la simulación y 2,53 kg/KWh en el teórico, valor calculado en base a la eficiencia energética y PCI. Finalmente, con la energía obtenida en la simulación se abastece el 91% de la demanda.

En lo que respecta a los sistemas solares fotovoltaicos, la exergía de salida es de 174.150 KWh/año y la del recurso es de 3.965.825,4 KWh/año que, aunque es menor a los reportados en otros casos como La Macarena por su temperaturas, áreas y radiaciones más bajas, son suficientes para suplir con el consumo anual de energía, alcanzando eficiencias de 4,1% a 4,7%, y que adicionalmente podría llegar a reemplazar el diésel debido a que existe el suficiente recurso primario.

Finalmente, al evaluar la PCHs de 328 KW, en el cauce del río Atrato, el sistema de generación presenta eficiencias de 0,4% por sus pequeñas alturas y elevados caudales (Anexo A-2). Lo anterior, da como resultado una exergía de entrada al sistema de 45.379.637 KWh/año, y una energía media generada de 196.800 KWh/año.

En comparación con las otras tecnologías, este sistema presenta las menores eficiencias exergéticas debido a que para las capacidades seleccionadas no se requiere utilizar todo el caudal disponible, por tanto, puede ser implementada como sistema de generación de electricidad para suplir con la energía requerida en la zona.

**Figura 4. Eficiencia exergética de los sistemas de generación de Medio Atrato**



### 3.3 PUERTO GUZMÁN

Puerto Guzmán es el municipio con menor demanda energética debido a que en la vereda el Bututo sólo se cuenta con 53 usuarios. Según los valores simulados para generar en promedio 16. 644 KWh/año se requiere una exergía del recurso de 25.215 KWh/año equivalente a 653 galones de combustible.

De acuerdo a la información encontrada en la literatura, la disponibilidad de diésel es de 1.472 gal/año con contenido exergético de 56.856 KWh/año, lo cual significa que la oferta de combustible es suficiente, hecho que se evidencia en las eficiencias obtenidas en la simulación para los tres escenarios bajo, medio, alto, correspondientes a 60%, 66% y 70% respectivamente (figura 5), por tanto, el sistema es eficiente al suministrar mayor exergía del recurso.

Para conocer la energía aprovechada a la entrada del sistema, en la simulación se utilizó un consumo específico de combustible de 0,039 gal/KWh que se obtuvo a partir de la eficiencia y PCI, en la parte teórica se encontró en la literatura un consumo de combustible de 0,0885 gal/KWh [36].

En lo que respecta al sistema solar fotovoltaico, los resultados indican que a partir de los valores de radiación solar, temperaturas y áreas de paneles establecidas, es posible obtener una exergía asociada del recurso de 451.394 KWh/año para generar en promedio 16.650 KWh/año de energía.

Se determinaron eficiencias de 3,7% como se muestra en la figura 5 y aunque la radiación promedio de la zona es óptima [39], la eficiencia exergética del sistema podría ser aumentada trabajando con capacidades menores.

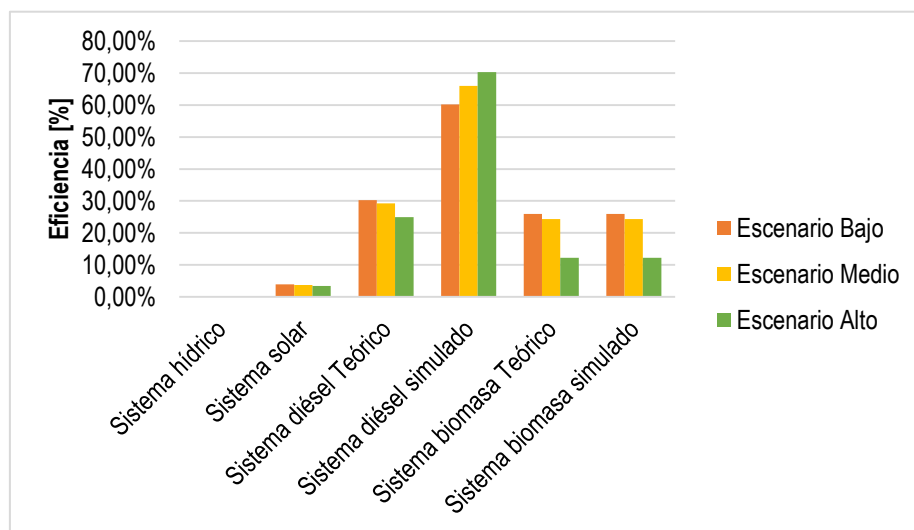
Por otro lado, la energía generada en el sistema de PCH es de 23.400 KWh/año y la exergía promedio del cauce del Río Caquetá es de 34.960.768 KWh/año que se calculó a partir del caudal y salto neto (Anexo A-2). Se determinaron eficiencias bajas de 0,07% que pueden mejorar aumentando las capacidades de la zona para lograr su posible implementación.

Finalmente, en el sistema de la biomasa, según los valores simulados se evidenciaron eficiencias de 12% a 26%, generando una energía promedio de 872.174 KWh/ año cuya exergía de entrada fue 60.942 KWh/año correspondiente a los 16.629 Kg de biomasa disponibles en la zona.

Por tanto, esta biomasa es suficiente para generar la energía calculada teóricamente de 24.000 KWh/año (Anexo-H) que se obtuvo partir de las capacidades encontradas y un factor de disponibilidad de 1000 horas.

Tanto en la simulación como teóricamente, se utilizó un consumo específico de combustible de 1.05 Kg/KWh con el fin de conocer la energía aprovechada a la entrada del sistema. Finalmente, para los dos casos se suministran la energía suficiente debido a que se abastece la totalidad de la demanda reportada.

**Figura 5. Eficiencia exergética de los sistemas de generación de Puerto Guzmán**



### 3.4 SAN ANDRÉS

Como se muestra en la figura 6, San Andrés es la única zona en la que se propone un sistema de generación eólica, debido a que posee las velocidades de viento adecuadas (mayores a 4 m/s) para la posible implementación de la tecnología de aerogeneradores.

Cada escenario se estableció de acuerdo a los valores de las velocidades de los vientos y áreas reportados en (Anexo I). La exergía promedio de entrada en el sistema es de 54.849.711 KWh/año, alcanzando eficiencias entre el 16% y 31% que comparando e.

Las eficiencias disminuyen al aumentar el área del aerogenerador y la velocidad de viento, por tanto, es recomendable trabajar con aerogeneradores de menor altura para que el sistema sea más eficiente.

En el sistema diésel de acuerdo con los resultados obtenidos en los tres escenarios simulados con ayuda del software Aspen Hysys v8.6, para generar en promedio 7.287.842 KWh/año de energía, se requiere 12.521.480 KWh/año de exergía, correspondiente a 324.397 galones de combustible anuales.

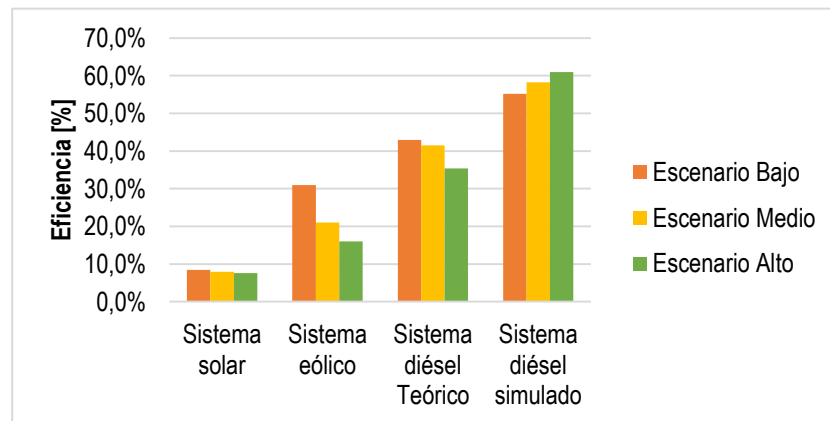
Según los datos históricos reportados en este municipio, en promedio se disponen de 454.761 gal/año cuya exergía es de 17.553.409 KWh/ año lo cual significa que la oferta de combustible es suficiente, hecho que se evidencia en las eficiencias obtenidas en la simulación para los tres escenarios bajo, medio, alto, correspondientes a 55%, 58% y 60% respectivamente (figura 6), por tanto, el sistema es eficiente al suministrar mayor exergía del recurso.

Para conocer la energía aprovechada a la entrada del sistema, en la simulación se utilizó un consumo específico de combustible de 0,04 gal/KWh que se obtuvo a partir de la eficiencia PCI, en la parte teórica se encontró en la literatura un consumo de combustible de 0,0624 gal/KWh [36].

En el sistema solar fotovoltaico, los resultados indican que a partir de los valores de radiación solar, temperaturas y áreas de paneles establecidas, es posible obtener una exergía asociada del recurso de 119.088.203 KWh/año para generar en promedio 8.981.100 KWh/año de energía.

Se determinaron eficiencias de 7,6% a 8,4% como se muestra en la figura 6 y aunque la radiación promedio de la zona es óptima [39], la eficiencia exergética del sistema podría ser aumentada trabajando con capacidades menores.

**Figura 6. Eficiencia exergética de los sistemas de generación de San Andrés**



#### 4. CONCLUSIONES

Existe disponibilidad de los recursos renovables eólico, solar, biomasa y diésel en las zonas de estudio de La Macarena, San Andrés, Medio Atrato y Puerto Guzmán, lo cual hace posible el uso potencial de las tecnologías de aerogeneradores, paneles fotovoltaicos, gasificación y grupos electrógenos para satisfacer la demanda energética de las ZNI.

Aplicando los fundamentos de exergía, para los cinco sistemas de generación estudiados, se puede determinar la energía útil de cada uno de ellos, para ser aprovechada como forma de generación de energía eléctrica en las ZNI. Las mejores eficiencias exergéticas en los sistemas de generación son en orden descendente: los generadores diésel (motores de combustión interna), seguido de los gasificadores de biomasa-motores de combustión interna, solar fotovoltaico y las PCH para los municipios de Medio Atrato, Puerto Guzmán y La Macarena. En el caso de San Andrés isla los generadores diésel (motores de combustión interna) alcanza la mejor eficiencia, seguido por el sistema de generación eólica y el solar fotovoltaico.

El recurso hídrico posee un alto contenido exergético, sin embargo, es importante conocer el caudal realmente aprovechado para operar con las capacidades de plantas mencionadas en el presente estudio y así lograr un incremento en las eficiencias

## 5. RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar el estudio del análisis exergético en otras ZNI de Colombia con el fin de determinar la eficiencia de los sistemas renovables que podrían ser implementados como forma de generación eléctrica y sustituir los combustibles convencionales.

Para el sistema de gasificación de raquis de plátano, se recomienda implementar una planta piloto mediante la utilización de biomasa residual agrícola en Colombia con el fin de obtener datos experimentales del gas generado para la obtención de electricidad.

El software SuperPro Designer es una herramienta computacional práctica que facilita la simulación del proceso de gasificación mediante la transformación de la biomasa sólida en gas; a diferencia del simulador aspen hysys v.8 el cual requiere códigos complejos para su ejecución.

## CITAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] GARCÍA, Helena, y otros. Análisis costo beneficio de energías renovables no convencionales en Colombia. s.l: FEDESARROLLO, 2013.

[2] CREG. Ley 855 de 2003. Bogotá: Comisión de Regulación y Gas, 2003.

[3] CONPES 3453. Esquema de gestión para la prestación del servicio de energía eléctrica en las zonas no interconectadas. Bogotá: Consejo Nacional de Política Económica y Social, 2006.

[4] CÁMARA DE DIPUTADOS DEL H. CONGRESO DE LA UNIÓN. Ley para el aprovechamiento de energías renovables y el financiamiento de la transición energética. México: Cámara de diputados del H, 2013.

[5] UPME. Energías renovables: Descripción tecnologías y usos finales. Bogotá: Unidad de planeación minero energética, 2005.

[6] LOZANO, M y VALERO, A. Determinación de la exergía para sustancias de interés industrial. Zaragoza: Departamento de termodinámica y fisicoquímica Universidad de Zaragoza, 1986.

[7] UPME. Formulación de un plan de desarrollo para las fuentes no convencionales de energía en Colombia (PDFNCE). Volumen 2. Bogotá: Unidad de planeación minero energética, 2010.

[8] CREG. Determinación de inversiones y gastos de administración, operación y mantenimiento para la actividad de generación en zonas no interconectadas con plantas térmicas. Volumen 1. Bogotá: Comisión de Regulación de Energía y Gas, 2013.

[9] GREIFF, Carlos y VÁSQUEZ, Carlos. Energía: soporte del desarrollo. Medellín: Cámara de Comercio de Medellín, 2002.

[10] LEZCANO, Diego. Estudio exergetico para identificar y evaluar potencialidades en energías renovables en el territorio colombiano, para planteamiento energético en periodos futuros. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, 2011.

[11] WESTON, Hermann. Quantifying global exergy resources. Stanford: Energy, 2006.

[12] ARAQUE, Julian y BLANCO, Francy. Estimación del potencial técnico energético de recursos renovables en zonas no interconectadas de Colombia, utilizando sistemas de información geográfico SIG-Casos de estudio. Bucaramanga: Tesis pregrado. Universidad Industrial de Santander. Facultad de fisicoquímicas, 2015.

[13] AGROWASTE. Gasificación. Gasificación. . [Citado el: 12 de Febrero de 2016.] Disponible en:<<http://www.agrowaste.eu/wp-content/uploads/2013/02/GASIFICACION.pdf>>

[14] AMAYA, Daniel. Análisis y optimización exergetica de una planta de cogeneración para la industria azucarera. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira, 2014.

[15] UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA. Costos indicativos de generación eléctrica en Colombia. Bogotá: Integral, 2005.

[16] CREG. Metodología para remunerar las actividades de generación distribución y comercialización de energía eléctrica en zonas no interconectadas. Bogotá: Comisión de Regulación y Gas, 2014.

[17] EPM, Parque eólico Jepírachi, [Citado el 15 de febrero de 2016] Disponible en:<http://www.epm.com.co/site/Home/Institucional/Nuestrasplantas/Energ%C3%A4Da/ParqueE%C3%B3lico.aspx>.

[18] CREG. Determinación de inversiones y gastos de administración, operación y mantenimiento para la actividad de generación en zonas no interconectadas con plantas térmicas. Volumen 1. Bogotá: CREG, 2013.

[19] ESCALANTE, Humberto, y otros. Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia. s.l: Ediciones UIS, 2010.

[20] UPME. Plan indicativo de expansión de cobertura de energía eléctrica 2013-2017. Bogotá: Ministerio de minas y energía, 2014.

[21] ASPEN HYSYS V8, Highlights, Resources, IT Support for V8, [Citado el 24 de noviembre de 2016] Disponible en: <<https://www.aspentech.com/Aspen-HYSYS-V8-eBook.pdf>>.

[22] FERNÁNDEZ, Félix. Máquinas térmicas: Poder calorífico. Argentina: Universidad Tecnológica Nacional, 2004.

[23] CASALS, M. Cálculo de la exergía química específica de combustibles sólidos, líquidos y gaseosos. En: Revista cubana de química, 2002, Vol 14.

[24] ARTEAGA, Luis, y otros. Energy and exergy analysis of a sugar cane bagasse gasifier integrated to a solid oxide fuel cell based on a quasi-equilibrium approach. s.l: Chemical Engineering Journal, 2013.

[25] ACADEMIA COLOMBIANA DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES. Factores de emisión de los combustibles colombianos. Bogotá: UPME, 2003.

[26] IPSE, Cobertura de energía eléctrica a 2014. [Citado el 23 de marzo de 2016]. Disponible en:<  
[http://www.siel.gov.co/siel/portals/.../COBERTURA\\_2014\\_Version\\_feb10\\_2016](http://www.siel.gov.co/siel/portals/.../COBERTURA_2014_Version_feb10_2016).

[27] COCA, Claudia. Análisis de costos exergéticos en una planta termoeléctrica. México: Instituto Politécnico Nacional, 2010.

[28] CENGEL, Yunus y BOLES, Michael. Termodinámica sexta edición. México: Mc Graw Hill, 2008.

[29] KRAUSE, Thilo, y otros. Maximizing Exergy Efficiency in Multi-Carrier Energy Systems. En: IEEE, 2010.

[30] SILVA, Electro, QUINTERO, Quelbis y ESCOBAR, José. Bioenergía:Fuentes, conversión y sustentabilidad . Bogotá : CYTED, 2014.

[31] COMISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA Y GAS. Metodología para remunerar las actividades de generación, distribución y comercialización de energía eléctrica en zonas no interconectadas. Bogotá: CREG, 2014.

[32] MÍGUEZ, José. Procesos termoquímicos para la obtención de energía a partir de la fitomasa residual (combustión, gasificación, pirólisis). [Citado el 10 de octubre de 2015]. Disponible en:<  
<https://procesosbio.wikispaces.com/file/view/PROCESOS+TERMOQU%C3%8DMLICOS+PARA+OBTENCION+DE+BIOMASA.pdf>>

[33] SUPERPRO DESIGNER-INTELLIGEN. User Guide. [Citado el 08 de enero de 2016]. Disponible en:<  
[www.intelligen.com/downloads/SPDManualForPrinting\\_v95b3.pdf](http://www.intelligen.com/downloads/SPDManualForPrinting_v95b3.pdf)>.

[34] UNIVERSIDAD DE VALLADOLID. Tecnología de la combustión. Citado el 08 de enero de 2016]. Disponible en:<  
<http://www.sistemamid.com/download.php?a=1733>>.

[35] CAMPOY, Manuel. Gasificación de biomasa y residuos en lecho fluidizado: estudios en planta piloto. Sevilla : Universidad de Sevilla, 2009.

[36] CREG. Propuesta regulatoria para la prestación del servicio de energía eléctrica en las zonas no interconectadas. Bogotá : Comisión de Regulación de Energía y Gas, 2005.

[37] ROSSO, Ana María. Diseño y aplicación de una metodología basada en lógica difusa para la selección de alternativas sostenibles de generación eléctrica en zonas no interconectadas (ZNI) de Colombia. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2016.

[38] BUENO, Miriam. Estudio de alternativas para la electrificación rural en la zona de selva del Perú. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña, 2009.

[39] UPME and IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia), Atlas de Radiación Solar de Colombia, 2005, [Citado en 12 de Noviembre de 2015] Disponible en: <<http://www.si3ea.gov.co/Home/EnergiaSolar/tabid/74/language/es-CO/Default.aspx>>.

## BIBLIOGRAFÍA

ACADEMIA COLOMBIANA DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES. Factores de emisión de los combustibles colombianos. Bogotá: UPME, 2003.

AGROWASTE. Gasificación. Gasificación. . [Citado el: 12 de Febrero de 2016.] Disponible en:<<http://www.agrowaste.eu/wp-content/uploads/2013/02/GASIFICACI%C3%93N.pdf>>

AGUDELO, A, BEDOYA, I y AGUDELO, J. Análisis exerético de un motor de automoción operando con gas natural: efecto de la configuración del kit de conversión y del sistema de encendido. Antioquía: Facultad de ingeniería, 2006.

AMAYA, Daniel. Análisis y optimización exerética de una planta de cogeneración para la industria azucarera. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira, 2014.

ARAQUE, Julián y BLANCO, Francy. Estimación del potencial técnico energético de recursos renovables en zonas no interconectadas de Colombia, utilizando sistemas de información geográfico SIG-Casos de estudio. Bucaramanga: Tesis pregrado. Universidad Industrial de Santander. Facultad de fisicoquímicas, 2015.

ARTEAGA, Luis, y otros. Energy and exergy analysis of a sugar cane bagasse gasifier integrated to a solid oxide fuel cell based on a quasi-equilibrium approach. s.l: Chemical Engineering Journal, 2013.

ASPEN HYSYS V8, Highlights, Resources, IT Support for V8, [Citado el 24 de noviembre de 2016] Disponible en: <<https://www.aspentech.com/Aspen-HYSYS-V8-eBook.pdf>>.

BUENO, Miriam. Estudio de alternativas para la electrificación rural en la zona de selva del Perú. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña, 2009.

CÁMARA DE DIPUTADOS DEL H. CONGRESO DE LA UNIÓN. Ley para el aprovechamiento de energías renovables y el financiamiento de la transición energética. México: Cámara de diputados del H, 2013.

CAMPOY, Manuel. Gasificación de biomasa y residuos en lecho fluidizado: estudios en planta piloto. Sevilla : Universidad de Sevilla, 2009.

CASALS, M. Cálculo de la exergía química específica de combustibles sólidos, líquidos y gaseosos. En: Revista cubana de química, 2002, Vol 14.

CENGEL, Yunus y BOLES, Michael. Termodinámica sexta edición. México: Mc Graw Hill, 2008.

COCA, Claudia. Análisis de costos exergéticos en una planta termoeléctrica. México: Instituto Politécnico Nacional, 2010.

COMISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA Y GAS. Metodología para remunerar las actividades de generación, distribución y comercialización de energía eléctrica en zonas no interconectadas. Bogotá: CREG, 2014.

CONPES 3453. Esquema de gestión para la prestación del servicio de energía eléctrica en las zonas no interconectadas. Bogotá: Consejo Nacional de Política Económica y Social, 2006.

CREG. Determinación de inversiones y gastos de administración, operación y mantenimiento para la actividad de generación en zonas no interconectadas con plantas térmicas. Volumen 1. Bogotá: Comisión de Regulación de Energía y Gas, 2013.

\_\_\_\_\_. Ley 855 de 2003. Bogotá: Comisión de Regulación y Gas, 2003.

\_\_\_\_\_. Metodología para remunerar las actividades de generación distribución y comercialización de energía eléctrica en zonas no interconectadas. Bogotá: Comisión de Regulación y Gas, 2014.

\_\_\_\_\_. Propuesta regulatoria para la prestación del servicio de energía eléctrica en las zonas no interconectadas. Bogotá : Comisión de Regulación de Energía y Gas, 2005.

DEL VAL GENTO, Verónica y GIRALDO, Gregorio. Planta de cogeneración mediante gasificación de biomasa residual. Valladolid: Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales.

EPM, Parque eólico Jepírachi, [Citado el 15 de febrero de 2016] Disponible en:<http://www.epm.com.co/site/Home/Institucional/Nuestrasplantas/Energ%C3%A Da/ParqueE%C3%B3lico.aspx>.

ESCALANTE, Humberto, y otros. Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia. s.l: Ediciones UIS, 2010.

FERNÁNDEZ, Félix. Máquinas térmicas: Poder calorífico. Argentina: Universidad Tecnológica Nacional, 2004.

GARCÍA, Helena, y otros. Análisis costo beneficio de energías renovables no convencionales en Colombia. s.l: FEDESARROLLO, 2013.

GREIFF, Carlos y VÁSQUEZ, Carlos. Energía: soporte del desarrollo. Medellín: Cámara de Comercio de Medellín, 2002.

IPSE, Cobertura de energía eléctrica a 2014. [Citado el 23 de marzo de 2016]. Disponible en:<  
[http://www.siel.gov.co/siel/portals/.../COBERTURA\\_2014\\_Version\\_feb10\\_2016](http://www.siel.gov.co/siel/portals/.../COBERTURA_2014_Version_feb10_2016).

KRAUSE, Thilo, y otros. Maximizing Exergy Efficiency in Multi-Carrier Energy Systems. En: IEEE, 2010.

LEZCANO, Diego. Estudio exergético para identificar y evaluar potencialidades en energías renovables en el territorio colombiano, para planteamiento energético en periodos futuros. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, 2011.

LOZANO, M y VALERO, A. Determinación de la exergía para sustancias de interés industrial. Zaragoza: Departamento de termodinámica y fisicoquímica Universidad de Zaragoza, 1986.

MÍGUEZ, C. La eficiencia energética en el uso de la biomasa para la generación de energía eléctrica: optimización energética y exergética. Madrid: Universidad Complutense de Madrid, 2013.

MÍGUEZ, José. Procesos termoquímicos para la obtención de energía a partir de la fitomasa residual (combustión, gasificación, pirólisis). [Citado el 10 de octubre de 2015]. Disponible en:<  
<https://procesosbio.wikispaces.com/file/view/PROCESOS+TERMOQU%C3%8DMLICOS+PARA+OBTENCION+DE+BIOMASA.pdf>>

PETELA, R. Exergy of heat radiation. Gliwice: Journal of Heat and Mass Transfer Ser, 1964.

ROSSO, Ana María. Diseño y aplicación de una metodología basada en lógica difusa para la selección de alternativas sostenibles de generación eléctrica en zonas no interconectadas (ZNI) de Colombia. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2016.

SILVA, Electro, QUINTERO, Quelbis y ESCOBAR, José. Bioenergía: Fuentes, conversión y sustentabilidad . Bogotá : CYTED, 2014.

SUPERPRO DESIGNER-INTELLIGEN. User Guide. [Citado el 08 de enero de 2016]. Disponible en: <[www.intelligen.com/downloads/SPDManualForPrinting\\_v95b3.pdf](http://www.intelligen.com/downloads/SPDManualForPrinting_v95b3.pdf)>.

SZARGUT, J. Anthropogenic and natural exergy losses (exergy balance of the Earth's surface and atmosphere). Gliwice: Energy, 2003.

UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA. Costos indicativos de generación eléctrica en Colombia. Bogotá: Integral, 2005.

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID. Tecnología de la combustión. Citado el 08 de enero de 2016]. Disponible en: <<http://www.sistemamid.com/download.php?a=1733>>.

UPME and IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia), Atlas de Radiación Solar de Colombia, 2005, [Citado en 12 de Noviembre de 2015] Disponible en: <<http://www.si3ea.gov.co/Home/EnergiaSolar/tabid/74/language/es-CO/Default.aspx>>.

UPME. Energías renovables: Descripción tecnologías y usos finales. Bogotá: Unidad de planeación minero energética, 2005.

\_\_\_\_\_. Formulación de un plan de desarrollo para las fuentes no convencionales de energía en Colombia (PDFNCE). Volumen 2. Bogotá: Unidad de planeación minero energética, 2010.

\_\_\_\_\_. Plan indicativo de expansión de cobertura de energía eléctrica 2013-2017. Bogotá: Ministerio de minas y energía, 2014.

WESTON, Hermann. Quantifying global exergy resources. Stanford: Energy, 2006.

## ANEXOS

### ANEXO A. Especificaciones para la selección de los recursos primarios

**Tabla A-1 Especificaciones recurso de biomasa residual agrícola: Raquis de plátano.**

Departamento	Potencial energético [MWh/año]	Centro Poblado	Capacidad instalada [KW]	Disponibilidad del recurso [Kg]
Chocó	82.763	Medio Atrato	56-120	2.954
Meta	29.416	La Macarena	130-260	3.500
Putumayo	21.549	Puerto Guzmán	20-40	16.320

Fuente: Modificado de estimación del potencial técnico energético de recursos renovables en zonas no interconectadas de Colombia, utilizando sistemas de información geográfico SIG-Casos de estudio [12]

**Tabla A-2 Especificaciones recurso de hídrico.**

Departamento	Centro poblado	Capacidad instalada [KW]	Río	Caudal [ m <sup>3</sup> /s]	Salto neto [m]
Chocó	Medio Atrato	215-439	Atrato	780	3,25
Meta	La Macarena	366-733	Guayabero	377	7
Putumayo	Puerto Guzmán	13-39	Caquetá	541	4,4

Fuente: Modificado de estimación del potencial técnico energético de recursos renovables en zonas no interconectadas de Colombia, utilizando sistemas de información geográfico SIG-Casos de estudio [12]

**Tabla A-3 Especificaciones recurso solar.**

Departamento	Potencial energético [KWh/m <sup>2</sup> ]	Centro poblado	Capacidad instalada [KW]
Chocó	4,0-5,0	Medio Atrato	250-523
Meta	4,2-4,8	La Macarena	620-1.240
San Andrés	4,5-5,0	San Andrés	9.963-9.995
Putumayo	4,0-4,6	Puerto Guzmán	23-50

Fuente: Modificado de estimación del potencial técnico energético de recursos renovables en zonas no interconectadas de Colombia, utilizando sistemas de información geográfico SIG-Casos de estudio [12]

**Tabla A-4 Especificaciones recurso diésel.**

Departamento	Centro poblado	Capacidad instalada [KW]	Disponibilidad del recurso [Gal]
Chocó	Medio Atrato	233-500	65.003
Meta	La Macarena	110-216,66	168.000
San Andrés	San Andrés	1.466-3.000	9'532.398
Putumayo	Puerto Guzmán	25-50	40

Fuente: Diseño y aplicación de una metodología basada en lógica difusa para la selección de alternativas sostenibles de generación eléctrica en zonas no interconectadas (ZNI) de Colombia [37]

**Tabla A-5 Especificaciones recurso eólico**

Departamento	Centro Poblado	Velocidad de los vientos [m/s]	Capacidad instalada [KW]
San Andrés	San Andrés	8,35-10,33	7.800-12.566

Fuente: Diseño y aplicación de una metodología basada en lógica difusa para la selección de alternativas sostenibles de generación eléctrica en zonas no interconectadas (ZNI) de Colombia [37]

## ANEXO B. Caracterización química de diferentes tipos de biomasa residual

**Tabla B-1. Caracterización química del plátano.**

Componente	Vástago (%p/p)	Raquis (%p/p)	Plátano rechazo (%p/p)
Humedad	90,89	10,66	84,85
Hidrógeno	2,54	3,50	4,42
Oxígeno	44,11	48,54	39,03
Nitrógeno	0,92	0,97	0,37
Azufre	0,24	0,25	0,12
Celulosa	20,18	29,53	30,08
Hemicelulosa	30,91	3,18	1,09
Lignina	2,70	20,59	30,59

Fuente: Modificado de Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia [19].

**Tabla B-2. Composición química del diésel**

Componente	Composición (Base másica)
Carbón	83,7%
Hidrógeno	9,2%
Azufre	3,6%
Nitrógeno	1%
Agua	2%
Cenizas	0,5%

Fuente: Tecnología de la combustión [34]

## ANEXO C. Capacidades instaladas

**Tabla C-1. Capacidades instaladas en las ZNI del recurso solar**

Centro poblado	Capacidad Baja [KW]	Capacidad Media [KW]	Capacidad Alta [KW]
San Andrés	9.963	9.979	9.995
La Macarena	620	930	1.240
Medio Atrato	250	386	523
Puerto Guzmán	23	37	50

Fuente: Modificado de Diseño y aplicación de una metodología basada en lógica difusa para la selección de alternativas sostenibles de generación eléctrica en zonas no interconectadas (ZNI) de Colombia [37]

**Tabla C-2. Capacidades instaladas en las ZNI del recurso diésel**

Centro poblado	Capacidad Baja [KW]	Capacidad Media [KW]	Capacidad Alta [KW]
San Andrés	1.466	2.233	3.000
Medio Atrato	233	366	500
La Macarena	110	163	216
Puerto Guzmán	25	38	50

Fuente: Modificado de Diseño y aplicación de una metodología basada en lógica difusa para la selección de alternativas sostenibles de generación eléctrica en zonas no interconectadas (ZNI) de Colombia [37]

**Tabla C-3. Capacidades instaladas en las ZNI del recurso hídrico**

Centro poblado	Capacidad Baja [KW]	Capacidad Media [KW]	Capacidad Alta [KW]
La Macarena	366	550	733
Medio Atrato	215	327	439
Puerto Guzmán	13	26	39

Fuente: Modificado de Diseño y aplicación de una metodología basada en lógica difusa para la selección de alternativas sostenibles de generación eléctrica en zonas no interconectadas (ZNI) de Colombia [37]

**Tabla C-4. Capacidades instaladas en las ZNI del recurso de biomasa**

Centro poblado	Capacidad Baja [KW]	Capacidad Media [KW]	Capacidad Alta [KW]
La Macarena	130	195	260
Medio Atrato	56	88	120
Puerto Guzmán	20	30	40

Fuente: Modificado de Diseño y aplicación de una metodología basada en lógica difusa para la selección de alternativas sostenibles de generación eléctrica en zonas no interconectadas (ZNI) de Colombia [37]

**Tabla C-5. Capacidades instaladas en las ZNI del recurso eólico**

Centro poblado	Capacidad Baja [KW]	Capacidad Media [KW]	Capacidad Alta [KW]
San Andrés	7.800	10.183	12.566

Fuente: Modificado de Diseño y aplicación de una metodología basada en lógica difusa para la selección de alternativas sostenibles de generación eléctrica en zonas no interconectadas (ZNI) de Colombia [37]

**ANEXO D. Diagramas de procesos de los sistemas de generación de energía**

Figura D-1 Diagrama sistema de gasificación.

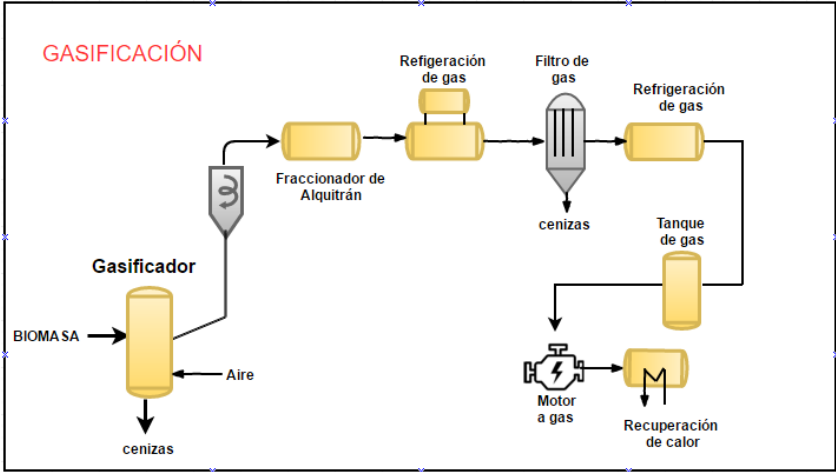


Figura D-2. Diagrama sistema de grupos electrógenos.

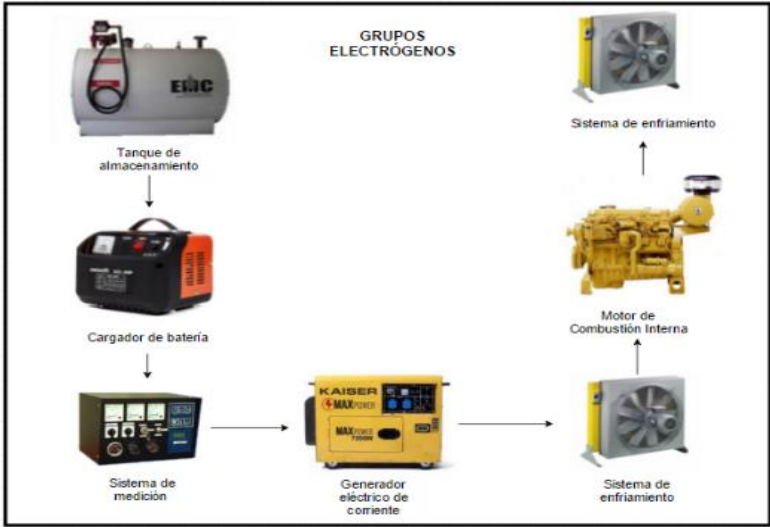


Figura D-3 Diagrama sistema fotovoltaico

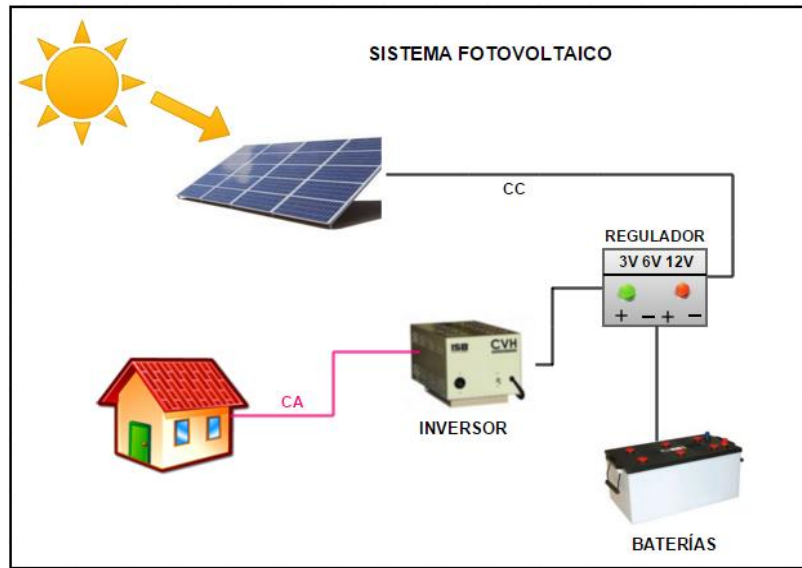


Figura D-4. Diagrama sistema de pequeñas centrales hidroeléctricas.

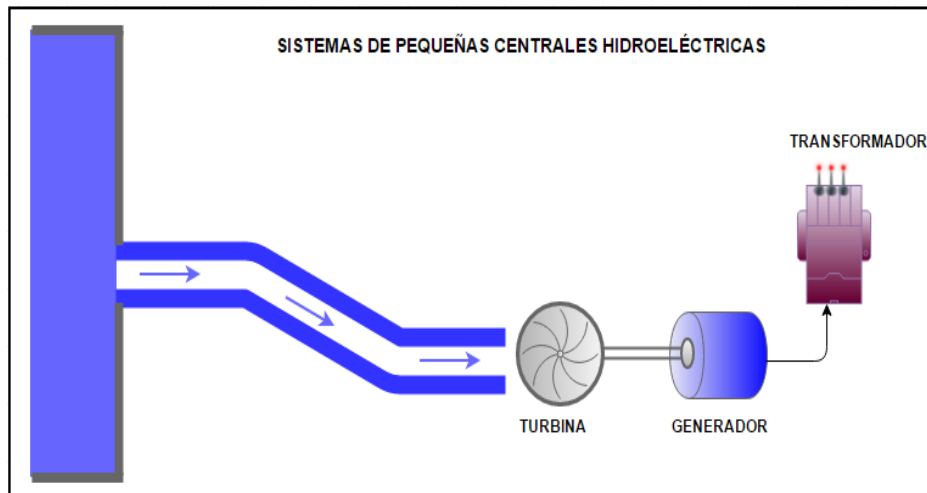


Figura D-5. Diagrama sistema de aerogeneradores.

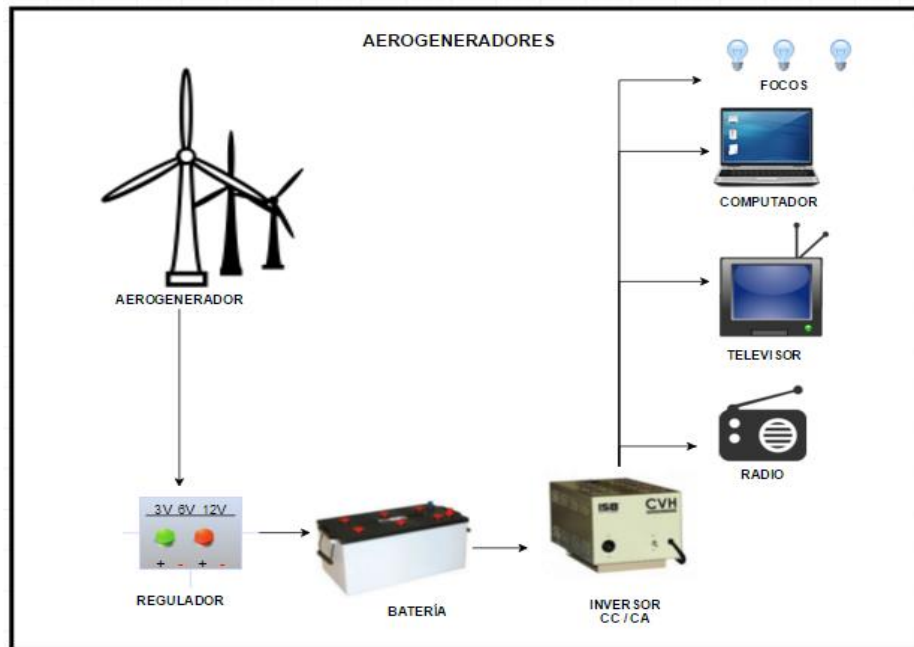
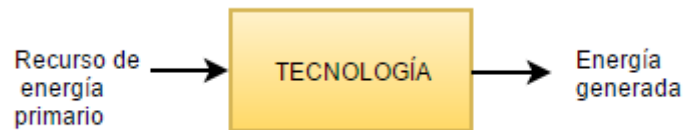


Figura D-6. Sistema energético.



## ANEXO E. Comparación diferentes tipos de biomasa

Debido a la limitada información de las composiciones elementales de los residuos escogidos, se realizó una comparación entre datos experimentales y teóricos para definir si existía alguna diferencia relevante entre cada composición y la zona en el que se encuentra el cultivo.

**Tabla E-1. Composiciones elementales vástago de plátano**

Zona		Datos Experimentales		Datos Teóricos
		Chocó	Putumayo	Antioquia
Composiciones en base seca	Carbono [%]	31,39	31,31	22,05% p/p
	Hidrógeno [%]	4,12	4,11	2,54% p/p
	Oxígeno [%]	31,38	31,31	44,11% p/p
	Nitrógeno [%]	0,48	1,04	0,92% p/p
	Azufre [%]	0,28	0,14	0,24% p/p
	Humedad [%]	93,74	95,60	9,89% p/p
	Cenizas [%]	1,11	0,72	30,14

Fuente: Modificado de Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia [19].

Los valores de las composiciones en base seca de los datos experimentales y teóricos son muy similares, aunque cabe resaltar que al comparar el porcentaje de humedad del vástago de plátano registrado en el Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia [19] con los valores obtenidos mediante técnicas experimentales recientes, se muestra que dicho valor es erróneo, porque la humedad del residuo mencionado está por encima del 93% y no un 9,89%.

**Tabla E-2 Composiciones elementales cogollo y hojas de caña panelera**

Zona	Datos Experimentales		Datos Teóricos
		Caquetá	Santander
Composiciones en base seca	Carbono [%]	36,91	38,21
	Hidrógeno [%]	4,82	4,39
	Oxígeno [%]	36,58	49,01
	Nitrógeno [%]	1,12	1,10
	Azufre [%]	0,25	0,04
	Humedad [%]	77,75	68,50
	Cenizas [%]	9,85	7,28

Fuente: Modificado de Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia [19].

Los datos que se tienen en cuenta con respecto a las composiciones elementales de los residuos, provienen de trabajos de experimentación que se desarrollaron en el Centro de Investigación para el Desarrollo Sostenible en Industria y Energía-CIDES y se hicieron bajo las técnicas de gravimétrica, volumetría, turbidimetría, análisis bromatológico y estequiométrico. Basados en estos datos experimentales y en los valores tomados del Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia [19], se hizo una comparación de las composiciones elementales de variados tipos de residuos, en la cual se denotó que no existe una variación significativa entre los valores de la composición elemental de un mismo residuo sin importar la zona en el que este localizado el cultivo.

## ANEXO F. Comparaciones de las tecnologías de transformación de biomasa

**Tabla F-1. Procesos Termoquímicos**

Tecnología	Reacciones químicas	Productos	Temperatura (°C)	Eficiencia	Estado de desarrollo
Pirólisis	Descomposición química de la materia orgánica por el calor en ausencia de oxígeno	Vapor, electricidad, bioaceite	< 600	60-70%	Tecnología poco madura para la generación de energía eléctrica, principalmente se usa para la producción de carbón vegetal
Gasificación	Oxidación parcial de la materia orgánica (efecto de oxígeno)	vapor, electricidad	600-900	60-90%	Tecnología poco madura, aún necesita resolver algunos problemas relacionados con la limpieza del gas generado, suministro de materia prima, adaptación de los sistemas de generación al gas pobre, competitividad económica entre otros.
Combustión	Oxidación total de la materia orgánica (exceso de oxígeno) o combustión	Vapor, electricidad	<350	15-38%	Tecnología madura, se puede producir electricidad a pequeña y gran escala de manera fiable, económica, robusta y eficiente.

Fuente: Modificado de Procesos termoquímicos para la obtención de energía a partir de la fitomasa residual (combustión, gasificación, pirólisis [32].

## ANEXO G. Factores de capacidad y disponibilidad de las tecnologías

**Tabla G-1. Factor de planta y disponibilidad de Medio Atrato**

Tecnología	Factor de capacidad	Factor de disponibilidad [h]
Solar	0,25	1.800
Diésel	0,38	1.640
PCH	0,3	2.000
Gasificación	0,8	3.000

Fuente: Modificado de metodología para remunerar las actividades de generación, distribución y comercialización de energía eléctrica en zonas no interconectadas [31]

**Tabla G-2. Factor de planta y disponibilidad de La Macarena**

Tecnología	Factor de capacidad	Factor de disponibilidad [h]
Solar	0,25	1.800
Diésel	0,47	4.371
PCH	0,45	2.000
Gasificación	0,8	3.000

Fuente: Modificado de metodología para remunerar las actividades de generación, distribución y comercialización de energía eléctrica en zonas no interconectadas [31]

**Tabla G-3. Factor de planta y disponibilidad de Puerto Guzmán**

Tecnología	Factor de capacidad	Factor de disponibilidad [h]
Solar	0,25	1.800
Diésel	0,3	1.460
PCH	0,45	1.600
Gasificación	0,8	1.000

Fuente: Modificado de metodología para remunerar las actividades de generación, distribución y comercialización de energía eléctrica en zonas no interconectadas [31]

**Tabla G-4. Factor de planta y disponibilidad de San Andrés**

Tecnología	Factor de capacidad	Factor de disponibilidad [h]
Solar	0,25	3.600
Diésel	0,69	4.730
Eólica	0,25	4.600

Fuente: Modificado de metodología para remunerar las actividades de generación, distribución y comercialización de energía eléctrica en zonas no interconectadas [31]

## ANEXO H. Energía generada por los recursos primarios

**Tabla H-1. Energías de los sistemas en Medio Atrato**

Tecnología	Energía [Kwh/ año]		
	Baja	Media	Alta
<b>Solar</b>	112.500	174.150	235.350
<b>Diésel</b>	152.848	240.752	328.000
<b>PCH</b>	129.600	196.800	264.000
<b>Gasificación</b>	136.800	211.200	288.000

Fuente: Modificado de metodología para remunerar las actividades de generación, distribución y comercialización de energía eléctrica en zonas no interconectadas [31]

**Tabla H-2. Energías de los sistemas en La Macarena**

Tecnología	Energía [Kwh/ año]		
	Baja	Media	Alta
<b>Solar</b>	279.000	418.500	558.000
<b>Diésel</b>	240.405	356.236	474.253
<b>PCH</b>	330.300	495.000	659.700
<b>Gasificación</b>	312.000	468.000	624.000

Fuente: Modificado de metodología para remunerar las actividades de generación, distribución y comercialización de energía eléctrica en zonas no interconectadas [31]

**Tabla H-3. Energías de los sistemas en Puerto Guzmán**

Tecnología	Energía [Kwh/ año]		
	Baja	Media	Alta
<b>Solar</b>	10.350	16.650	22.500
<b>Diésel</b>	10.950	16.644	21.900
<b>PCH</b>	11.700	23.400	35.100
<b>Gasificación</b>	16.000	24.000	32.000

Fuente: Modificado de metodología para remunerar las actividades de generación, distribución y comercialización de energía eléctrica en zonas no interconectadas [31]

**Tabla H-4. Energías de los sistemas en San Andrés**

Tecnología	Energía [Kwh/ año]		
	Baja	Media	Alta
<b>Solar</b>	8.966.700	8.981.100	8.995.500
<b>Diésel</b>	4.787.847	7.287.842	9.791.100
<b>Eólica</b>	8.970.000	11.710.450	14.452.050

Fuente: Modificado de metodología para remunerar las actividades de generación, distribución y comercialización de energía eléctrica en zonas no interconectadas [31]

## ANEXO I. Exergía de los recursos

**Tabla I-1. Exergía solar San Andrés**

	Escenario bajo	Escenario medio	Escenario alto
$T_o$ [K]	300	300,5	301
$T_{sol}$ [K]	6.000		
$\phi$	0,93	0,93	0,93
$R$ [kWh/m <sup>2</sup> ]	4,5	4,8	5
$A$ [m <sup>2</sup> ]	69.674	69.786	69.898
Exergía [kwh/año]	106.810.480	114.100.738	119.031.515

**Tabla I-2. Exergía solar La Macarena**

	Escenario bajo	Escenario medio	Escenario alto
$T_o$ [K]	291	293	299
$T_{sol}$ [K]	6.000		
$\phi$	0,93	0,93	0,93
$R$ [kWh/m <sup>2</sup> ]	4,2	4,5	4,8
$A$ [m <sup>2</sup> ]	4.435	6.503	8.671
Exergía[kwh/año]	6.359.208	9.985	14.182.226

**Tabla I-3. Exergía solar Medio Atrato**

	Escenario bajo	Escenario medio	Escenario alto
$T_o$ [K]	295	298	299
$T_{sol}$ [K]	6.000		
$\phi$	0,93	0,93	0,93
$R$ [kWh/m <sup>2</sup> ]	4	4,3	4,5
$A$ [m <sup>2</sup> ]	1.748	2.706	3.657
Exergía [kwh/año]	2.384.781	3.965.825	5.607.528

**Tabla I-4. Exergía solar Puerto Guzmán**

	Escenario bajo	Escenario medio	Escenario alto
$T_o$ [K]	293	297	301
$T_{sol}$ [K]	6.000		
$\phi$	0,93	0,93	0,93
$R$ [kWh/m <sup>2</sup> ]	4	4,3	4,6
$A$ [m <sup>2</sup> ]	192	308	417
Exergía[kwh/año]	262.068	451.502	653.312

**Tabla I-5. Exergía eólica San Andrés**

	Escenario bajo	Escenario medio	Escenario alto
Velocidad [m/s]	8,25	9,29	10,33
A[m <sup>2</sup> ]	20280	27040	32110
Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	1,1	1,1	1,1
Exergía [KWh/año]	28.810.468	54.849.711	89.549.216

**Tabla I-6. Exergía PCH de Medio Atrato**

	Escenario bajo	Escenario medio	Escenario alto
Gravedad [m/s <sup>2</sup> ]	9,81	9,81	9,81
Q[m <sup>3</sup> /s]	642,72	711,67	780,61
H[m]	3,25	3,25	3,25
$\rho$ [Kg/m <sup>3</sup> ]	1.000	1.000	1.000
Exergía [KWh/año]	40.983.040	45.379.637	49.775.596

**Tabla I-7. Exergía PCH de Puerto Guzmán**

	Escenario bajo	Escenario medio	Escenario alto
Gravedad [m/s <sup>2</sup> ]	9,81	9,81	9,81
Q[m <sup>3</sup> /s]	471	506	541
H[m]	4,4	4,4	4,4
$\rho$ [Kg/m <sup>3</sup> ]	1.000	1.000	1.000
Exergía [KWh/año]	32.556.015	34.960.768	37.364.830

**Tabla I-8. Exergía PCH de La Macarena**

	Escenario bajo	Escenario medio	Escenario alto
Gravedad [m/s <sup>2</sup> ]	9,81	9,81	9,81
Q[m <sup>3</sup> /s]	300	338	377
H[m]	7	7	7
$\rho$ [Kg/m <sup>3</sup> ]	1.000	1.000	1.000
Exergía [KWh/año]	41.259.682	46.539.032	51.817.008

**Tabla I-9. Exergía raquis de plátano Puerto Guzmán**

	Escenario bajo	Escenario medio	Escenario alto
D [Kg]	15.383	16.629	17.875
LHV[kJ/Kg]	6.663	8.679	22.755
$\beta$	1,52	1,52	1,52
Exergía [KWh/año]	43.281	60.942	171.747

**Tabla I-10. Exergía raquis de plátano La Macarena**

	Escenario bajo	Escenario medio	Escenario alto
D [Kg]	1.650	2.682	3.714
LHV[kJ/Kg]	6.663	8.679	22.755
$\beta$	1,52	1,52	1,52
Exergía [KWh/año]	4.642	9.830	35.690

**Tabla I-11. Exergía raquis de plátano Medio Atrato**

	Escenario bajo	Escenario medio	Escenario alto
D [Kg]	1.643	2.451	3.258
LHV[kJ/Kg]	6.663	8.679	22.755
$\beta$	1,52	1,52	1,52
Exergía [KWh/año]	4.625	8.982	31.303

**Tabla I-12. Exergía diésel Medio Atrato**

	Escenario bajo	Escenario medio	Escenario alto
G [ Galón]	7.705	9.656	10.292
$Ex_q$ [Kj/gal]	134.451	138.957	163.251
Exergía [Kwh/año]	287.979	372.734	466.756

**Tabla I-13. Exergía diésel Puerto Guzmán**

	Escenario bajo	Escenario medio	Escenario alto
G [ Galón]	487	653	687
$Ex_q$ [Kj/gal]	134.451	138.957	163.251
Exergía [KWh/año]	18.203	25.214	31.164

**Tabla I-14. Exergía diésel La Macarena**

	Escenario bajo	Escenario medio	Escenario alto
G [ Galón]	9.669	14.133	17.158
$Ex_q$ [Kj/gal]	134.451	138.957	163.251
Exergía [KWh/año]	361.391	545.533	778.098

**Tabla I-15. Exergía diésel San Andrés**

	Escenario bajo	Escenario medio	Escenario alto
<b>G [ Galón]</b>	163.866	228.712	253.558
<b><math>Ex_q</math> [Kj/gal]</b>	134.451	138.957	163.251
<b>Exergía [KWh/año]</b>	6.119.985	8.828.092	11.498.221

## ANEXO J. Comparaciones de los diferentes tipos de motor de combustión interna

**Tabla J-1. Clasificación de motores de combustión interna.**

Motores ciclo OTTO	Motores ciclo DIÉSEL
Gas Natural	Aceite Diésel (ACPM, Fuel Oil # 2)
Gas Licuado de Petróleo (GLP) (mezcla de propano y butano)	HFO (Fuel Oil #6, Bunker C)
Gas de yacimiento (gas natural sin procesar que viene directamente del pozo de gas)	
Biogás	
Algunos gases desechados de procesos industriales	

Fuente: Modificado de determinación de inversiones y gastos de administración, operación y mantenimiento para la actividad de generación en zonas no interconectadas con plantas térmicas. Volumen 1 [8]

**Tabla J-2. Eficiencia y capacidad para las plantas que utilizan gas de gasificación para la generación de electricidad.**

Configuración	Eficiencia eléctrica %	Capacidad nominal [MW]
Motores a gas de pequeña capacidad	20-32	0,01-0,5
Motores a gas de gran capacidad	26-36	0,5-3,0
Motores diésel	23-38	0.01-3

Fuente: Modificado de determinación de inversiones y gastos de administración, operación y mantenimiento para la actividad de generación en zonas no interconectadas con plantas térmicas. Volumen 1 [8]

## ANEXO K. Pasos para el sistema diésel en la simulación en Aspen Hysys

En el proceso de combustión se llevó a cabo la siguiente reacción:

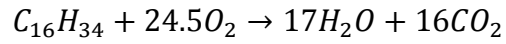


Figura K-1. Simulación sistema diésel.

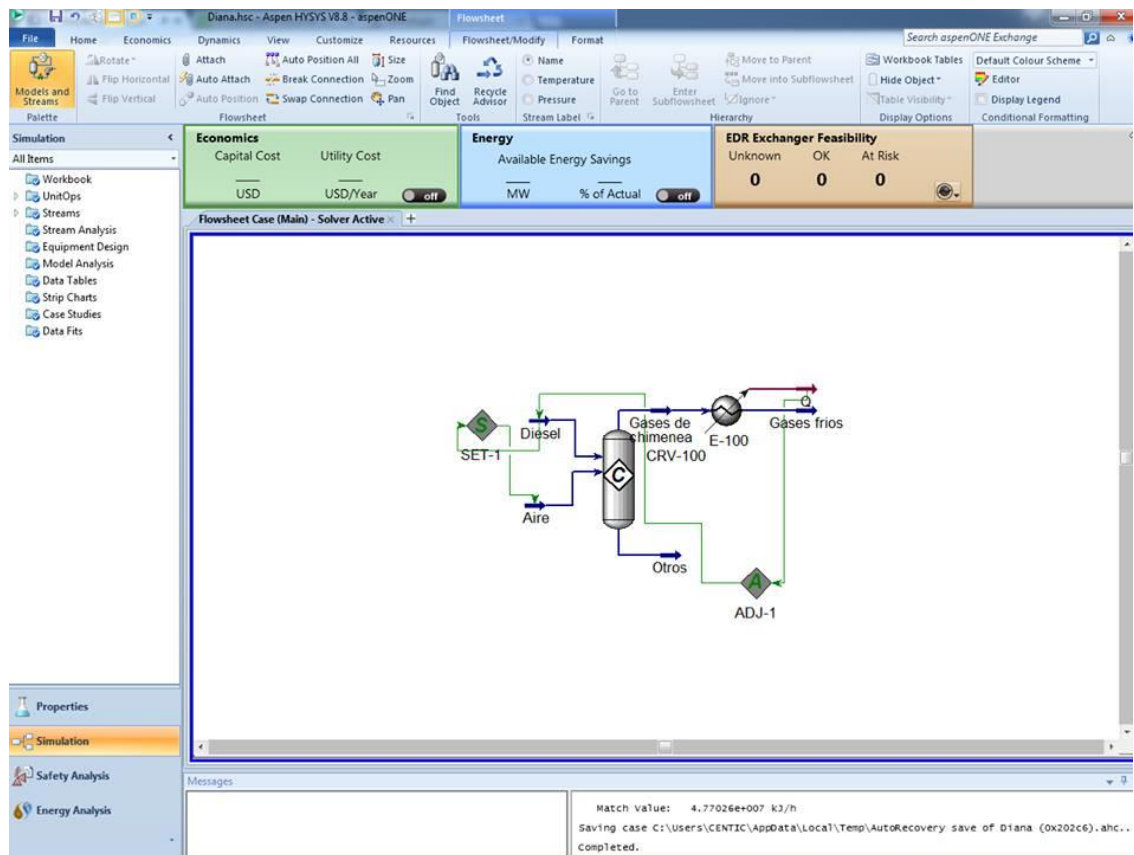


Figura K-2. Ingreso de los componentes

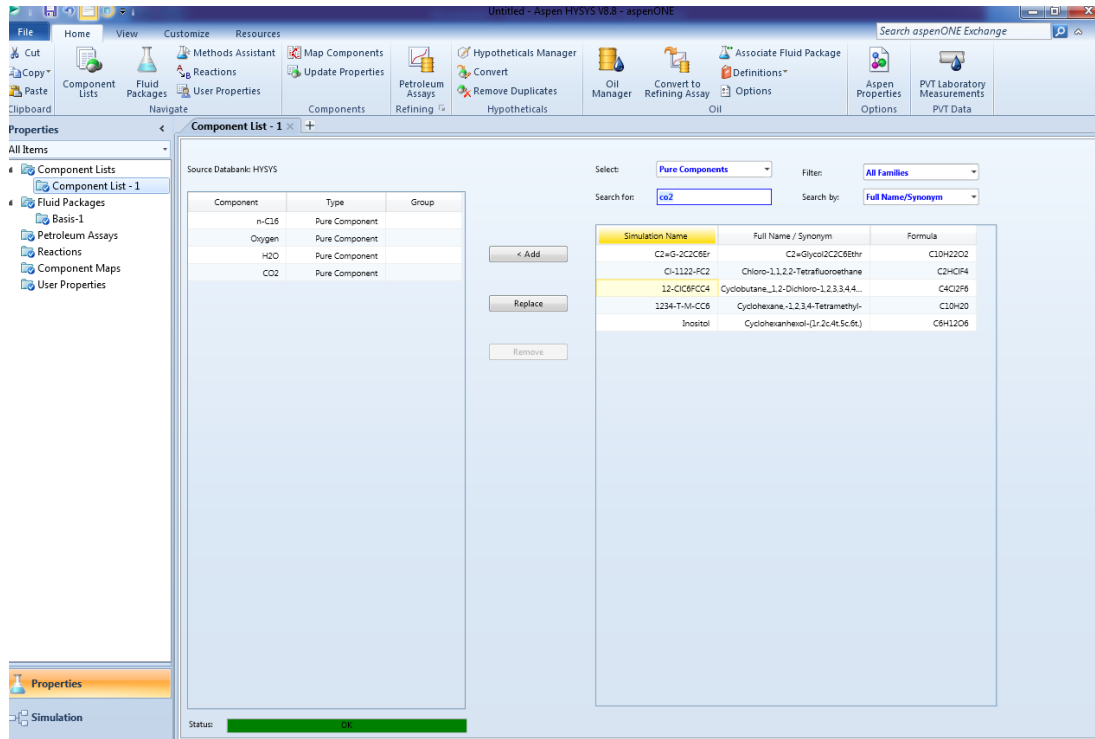
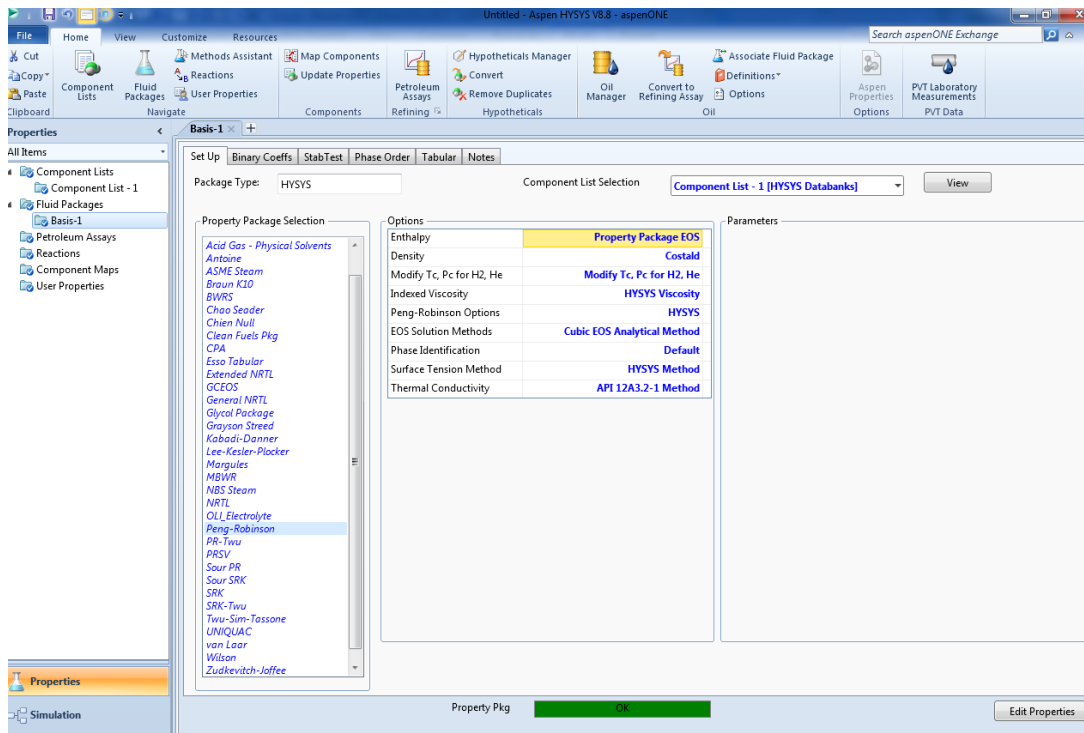


Figura K-3. Selección del método de cálculo.



Como se muestra en la Figura K-2. Se ingresaron los componentes a utilizar en el proceso. Seguidamente se escoge el paquete termodinámico del software, en este caso se seleccionó Peng- Robinson (Figura K-3); en el documento se encuentra la respectiva justificación de la elección.

Figura K-4. Condiciones de entrada del diésel

Worksheet	Stream Name	Diesel	Liquid Phase
Conditions	Vapour / Phase Fraction	0,0000	1,0000
Properties	Temperature [C]	25,00	25,00
Composition	Pressure [kPa]	4600	4600
Oil & Gas Feed	Molar Flow [kgmole/h]	1,257e-002	1,257e-002
Petroleum Assay	Mass Flow [kg/h]	2,847	2,847
K Value	Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	3,671e-003	3,671e-003
User Variables	Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	-4,502e+005	-4,502e+005
Notes	Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	378,8	378,8
Cost Parameters	Heat Flow [kJ/h]	-5660	-5660
Normalized Yields	Liq Vol Flow @Std Cond [m3/h]	3,665e-003	3,665e-003
	Fluid Package	Basis-1	
	Utility Type		

Figura K-5. Condiciones del equipo con las corrientes

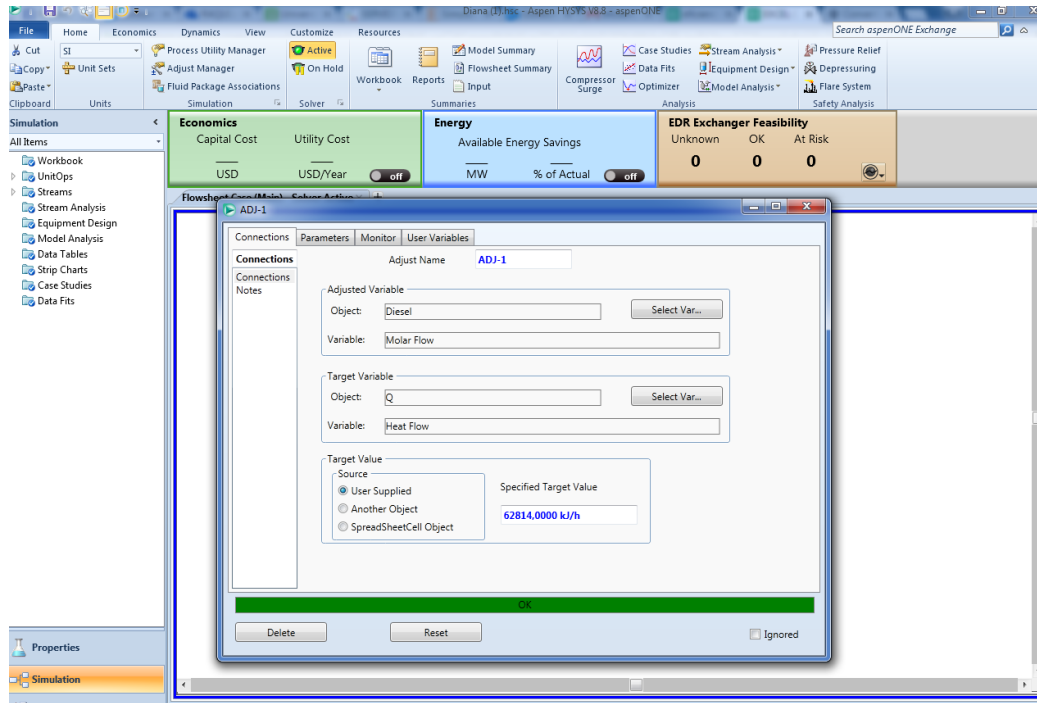


Figura K-6. Energía en medio Atrato escenario bajo.

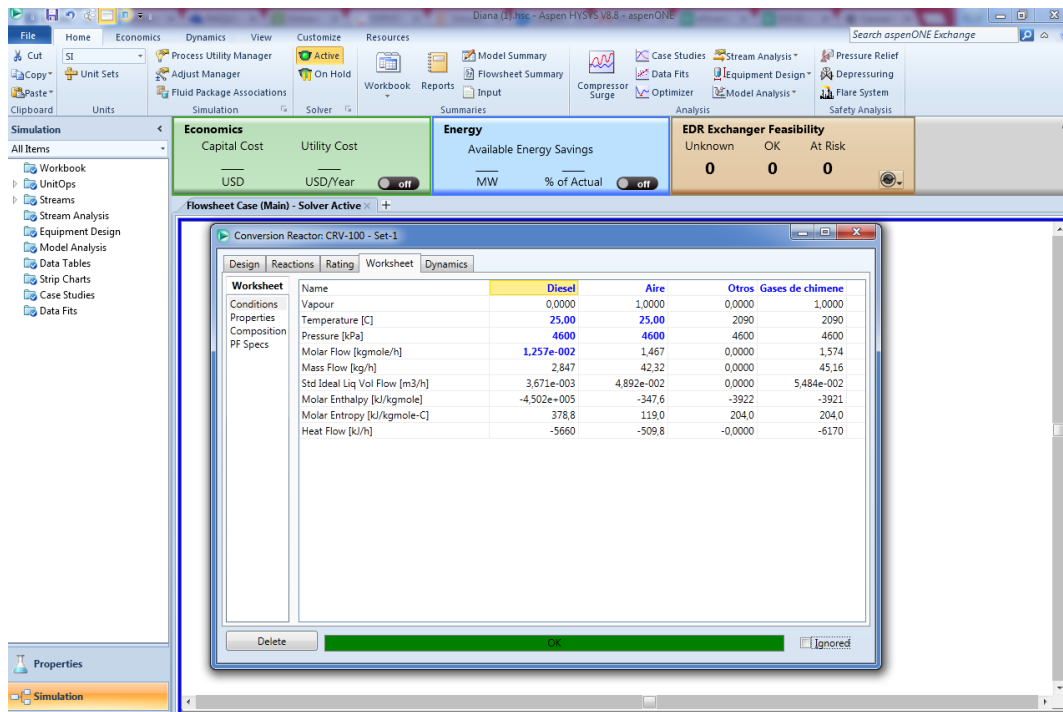


Figura K-7. Energía generada en Medio Atrato escenario medio.

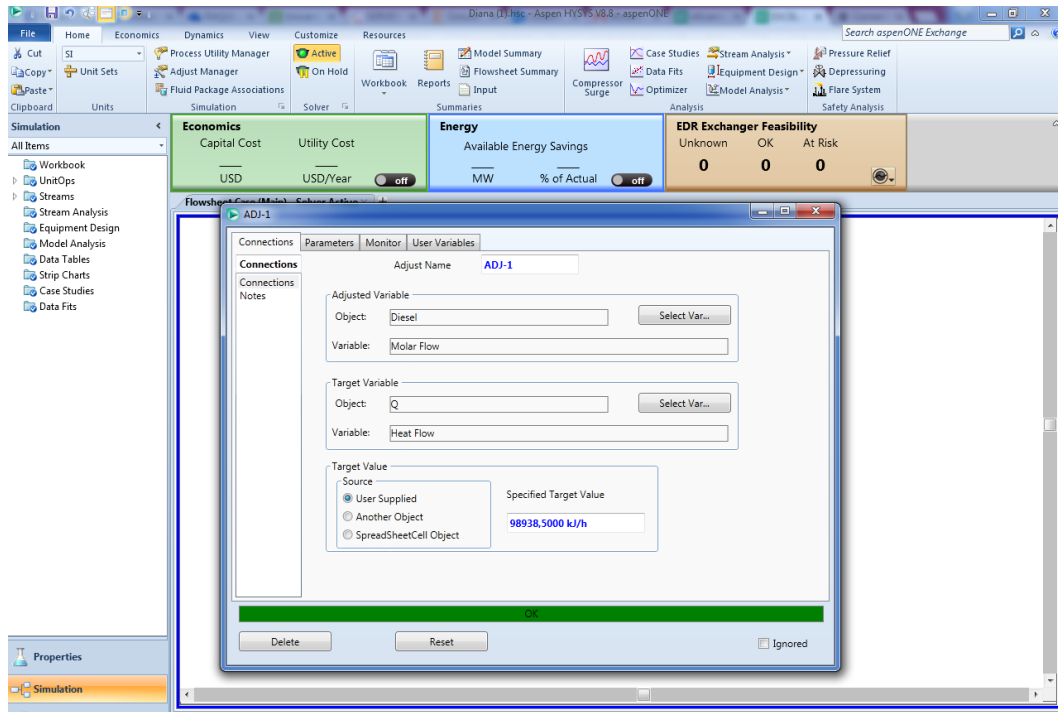


Figura K-8. Energía generada en Medio Atrato escenario alto.

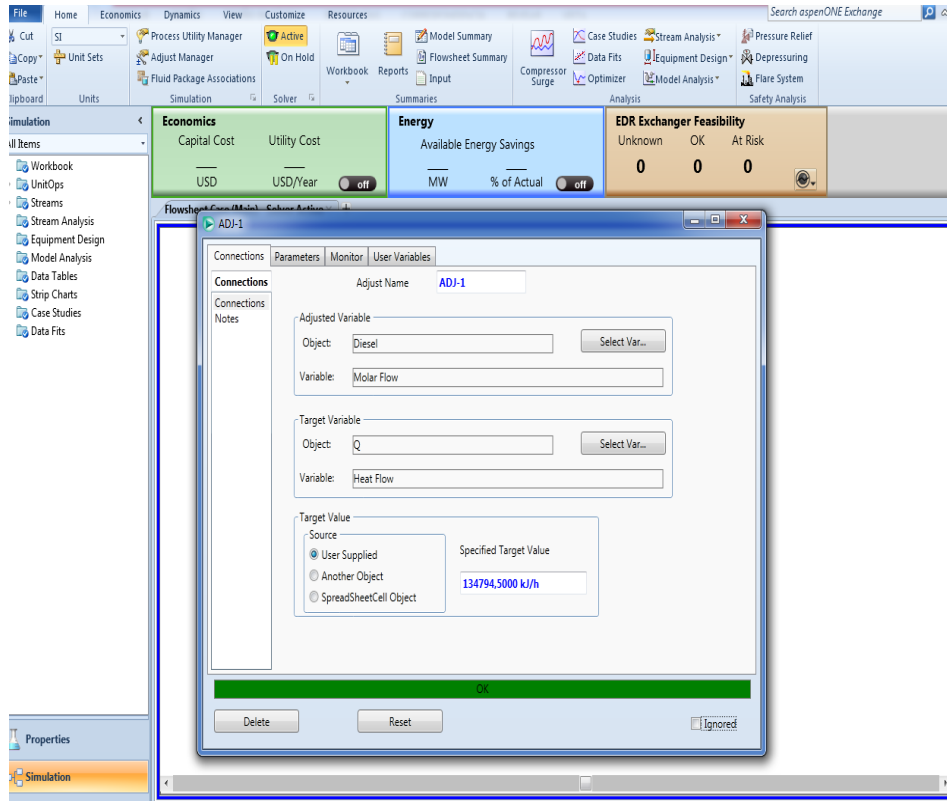


Figura K-9. Cantidad de diésel requerido en Medio Atrato escenario bajo

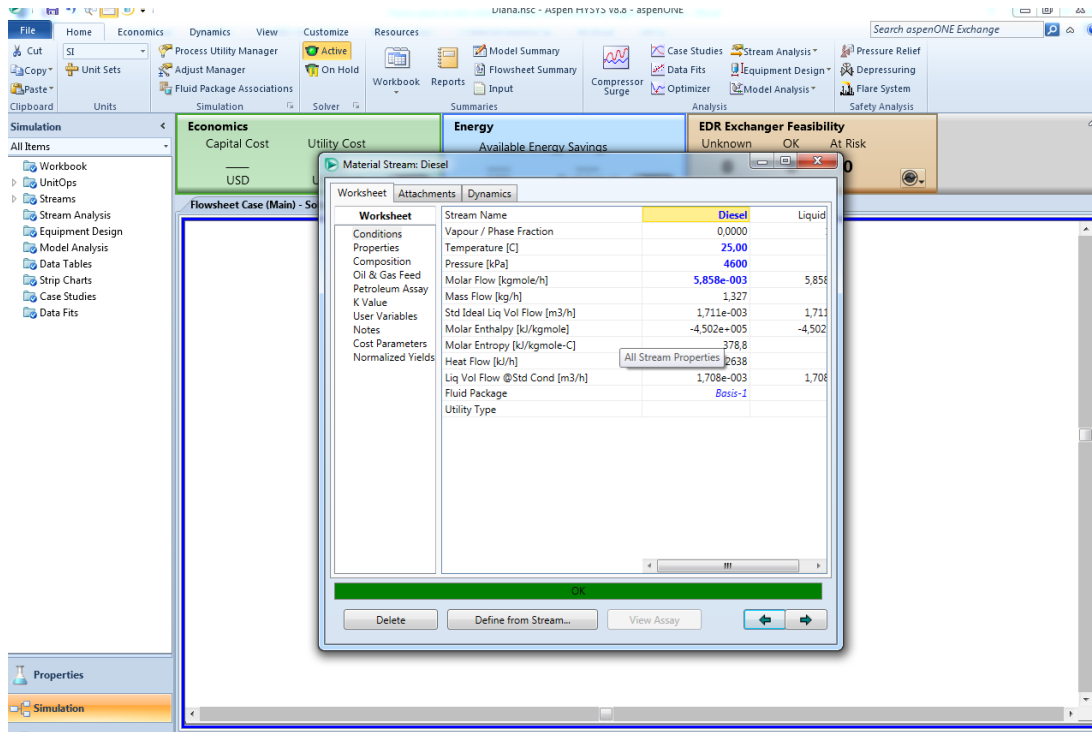


Figura K-10. Cantidad de diésel requerido en Medio Atrato escenario medio.

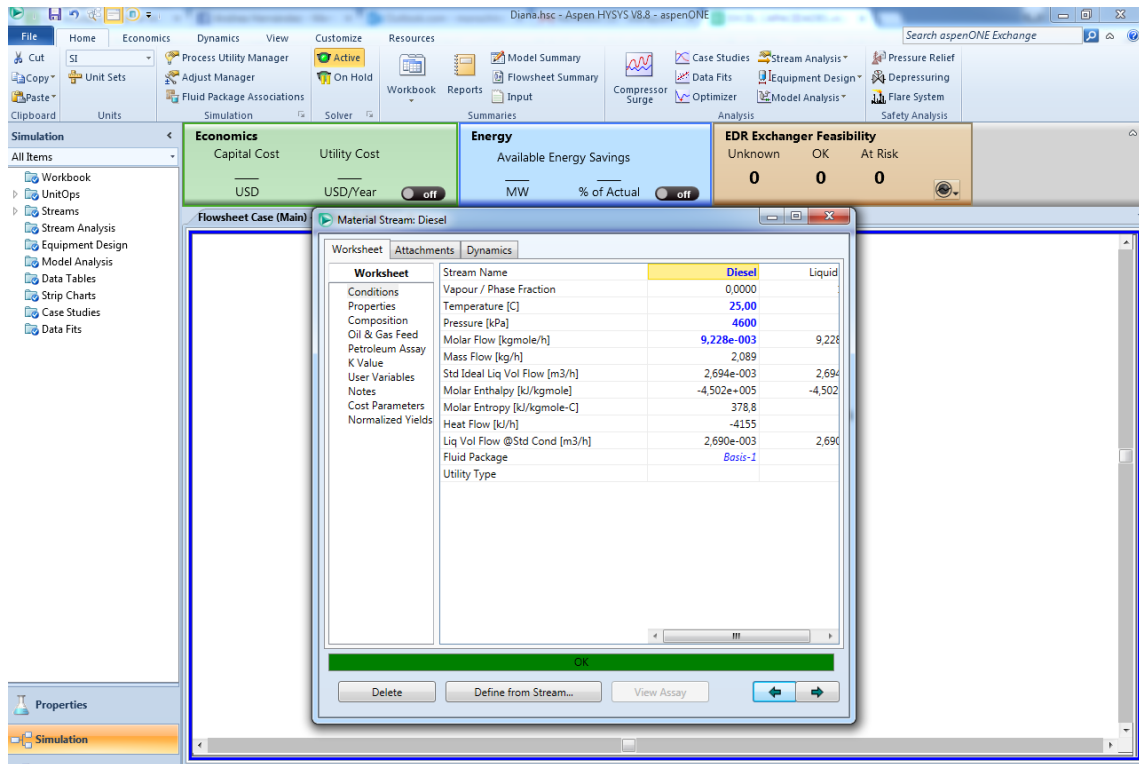
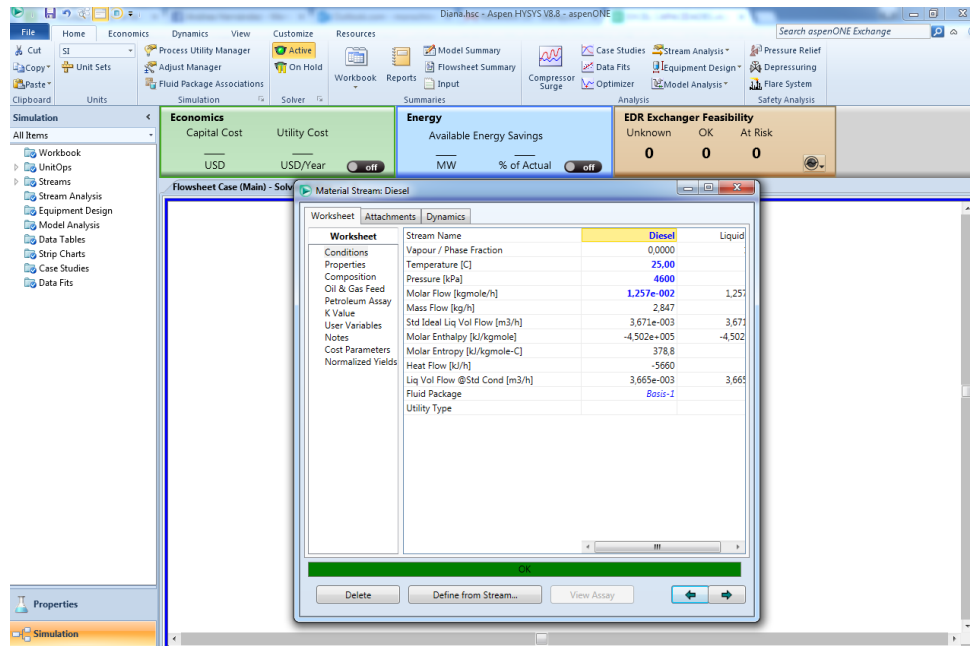


Figura K-11. Cantidad de diésel requerido en Medio Atrato escenario Alto.



## ANEXO L. Pasos para la simulación de gasificación en SuperPro Designer

La cantidad de oxígeno añadido al gasificador depende de la tecnología utilizada, para la gasificación directa, ésta se encuentra comprendida entre un 15 y 40% de oxígeno teórico necesario para la combustión completa[35]; en este caso se utilizó el aire como agente gasificante de acuerdo a lo anteriormente mencionado se hicieron los cálculos respectivos para obtener la relación aire-biomasa.

Figura L-1. Diagrama simulación de gasificación del raquis de plátano

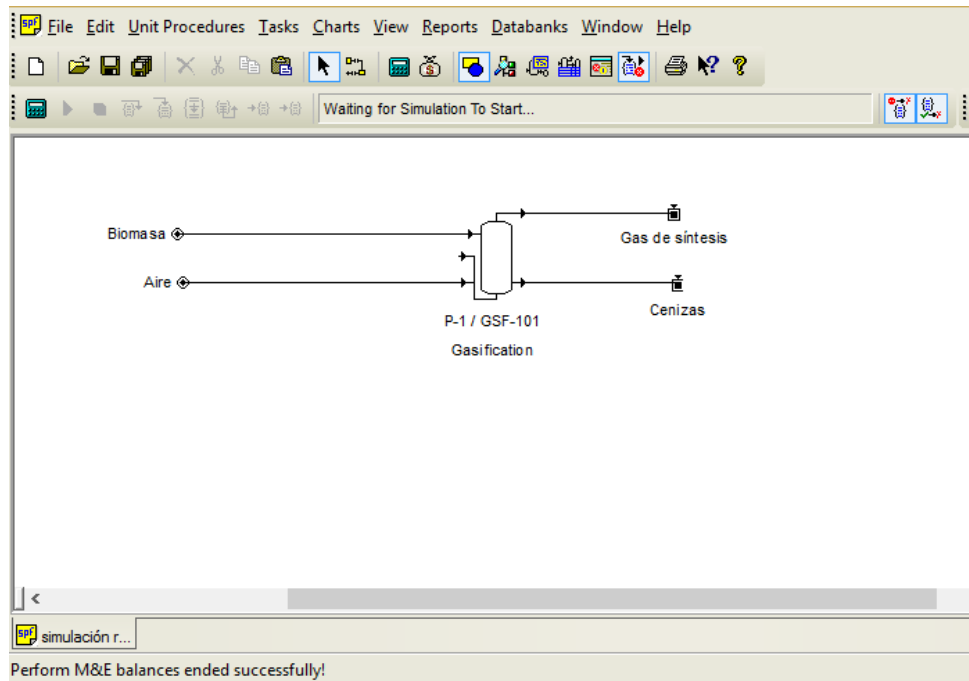


Figura L-2. Condiciones de operación del equipo.

The screenshot displays the '12. PROCEDURE / OPERATION DATA' window for the 'GASIFY-1 (Gasification) in P-1' process. The interface includes several sections:

- Oper. Cond's:** Fuel, Species, Numerics, Energy Balance, Labor, etc., Description, Batch Sheet, Scheduling.
- Oxidant Stream (Air or O2):** Name: Air, Amount: Available in Oxidant Stream (checked).
- Moderator Stream (Steam):** Name: <None>, Amount: Available in Moderator Stream (unchecked).
- Chemical Equilibrium Based On:** Equilibrium Constants (selected), Gibbs Energy Minimization.
- Shift from Chemical Equilibrium:** Use? (unchecked).
- Steam Gasification Reaction:** 0.00 %
- Boudouard Reaction:** 0.00 %
- Methane Reaction:** 0.00 %
- Optional Inputs:**

Variable	Set ?	Value	Units
1 Equivalence Ratio	<input type="checkbox"/>	27.48	%
2 Steam/Carbon Ratio	<input type="checkbox"/>	0.0000	mol/mol
3 Carbon Conversion	<input type="checkbox"/>	99.54	%
4 Gasification Temperature	<input type="checkbox"/>	636.82	°C
- Efficiency:**
  - Cold Gas Eff. on LHV Basis: 83.13 %
  - Cold Gas Eff. on HHV Basis: 82.25 %
  - Hot Gas Eff. on LHV Basis: 98.24 %
  - Hot Gas Eff. on HHV Basis: 98.54 %
- Operating Pressure:** 1.01325 bar
- Heat Losses:** 0.00 %
- Volumetric Dry Gas Production Rate (STP):** 4182729.71 L/h

On the right side, there is a detailed table for 'Composition and HHV of Dry Fuel Components on Dry Basis' and 'Associated Species with Pure Components'.

Figura L-3. Condiciones iniciales de biomasa en Medio Atrato escenario bajo

The screenshot displays the 'Stream Biomasa (INPUT --> P-1)' window. It shows the composition and flow parameters for the biomass input stream.

**Registered Ingredients:** Ash, Biomass, Carb. Dioxide, Carbon, Carbon Monoxide, Hydr. Sulfide, Hydrogen, Methane, Nitrogen, Oxygen, Sulfur, Water.

**Composition Table:**

Ingredient Name	Comp ?	Flowrate (kg/batch)	Mass Comp. (%)	Concentration (g/L)
Biomass	<input checked="" type="checkbox"/>	1643.82000	100.0000	1050.00000

**Flow Parameters:**

- Total Flowrates:** Auto-Adjust (unchecked)
- Temperature:** 25.0 °C
- Pressure:** 1.013 bar
- Enthalpy:** 47.738 kW-h/batch
- Set Mass Flow:** 1643.820 kg/batch
- Set Vol. Flow:** 1565.543 L/batch

**Units:** Mass [kg], Vol. [L], Composition [0...1], Conc. [g/L], Enthalpy [kW-h]

**Time Reference for Flows:** Batch (selected), Source Cycle, Destination Cycle, Time Avg (per RCT), h

Figura L-4. Condiciones iniciales de aire en Medio Atrato escenario bajo

The screenshot shows the 'Stream Aire (INPUT --> P-1)' window. On the left, under 'Registered Ingredients', 'Air' is selected. The 'Composition' table is as follows:

Ingredient Name	Comp ?	Flowrate (kg/batch)	Mass Comp (%)	Concentration (g/L)
Air	<input type="checkbox"/>	1174.14000	100.0000	1.17922

Below the table, 'Set Mass Composition' is selected. The 'Total Flowrates' section shows: Set Mass Flow 1174.140 kg/batch, Set Vol. Flow 995690.708 L/batch. Properties include Temperature 25.0 °C, Pressure 1.013 bar, and Enthalpy 8.255 kW-h/batch. Units are set to Mass kg, Vol L, Composition %, Conc. g/L, and Enthalpy kW-h.

Figura L-5. Gas de síntesis en Medio Atrato escenario bajo

The screenshot shows the 'Stream Gas de síntesis (P-1 --> OUTPUT)' window. The 'Stream Contents' are set to 'Total'. The 'Composition Data' table is as follows:

Component	Flowrate (kg/batch)	Mass Comp. (%)	Concentration (g/L)
1 Carb. Dioxide	819.30310	32.1628	0.108871
2 Carbon Monoxide	612.40978	24.0409	0.081379
3 Hydr. Sulfide	4.36791	0.1715	0.000580
4 Hydrogen	37.55427	1.4742	0.004990
5 Methane	15.39304	0.6043	0.002045
6 Nitrogen	916.64856	35.9842	0.121807
7 Water	141.68797	5.5621	0.018828

Below the table, 'Total Flowrates' are shown: Mass Flow 2547.365 kg/batch, Volumetric Flow 7525418.846 L/batch. Properties include Temperature 636.8 °C, Pressure 1.013 bar, and Enthalpy 760.689 kW-h/batch. Units are set to Mass kg, Vol L, Composition %, Conc. g/L, and Enthalpy kW-h.

Figura L-6. Cenizas de gasificación en Medio Atrato escenario bajo

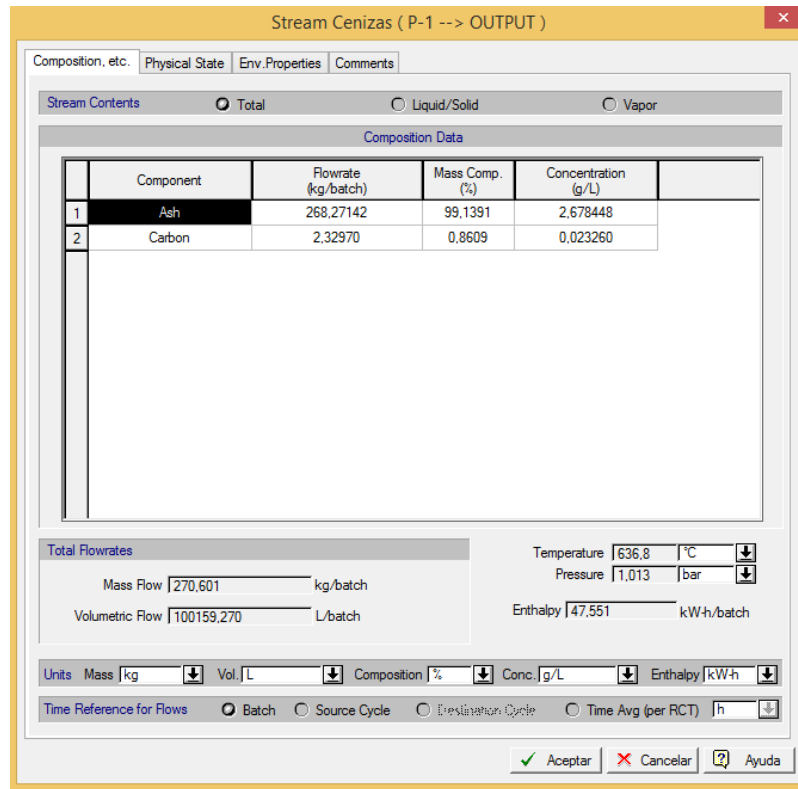


Figura L-7. Condiciones iniciales de biomasa en Medio Atrato escenario medio

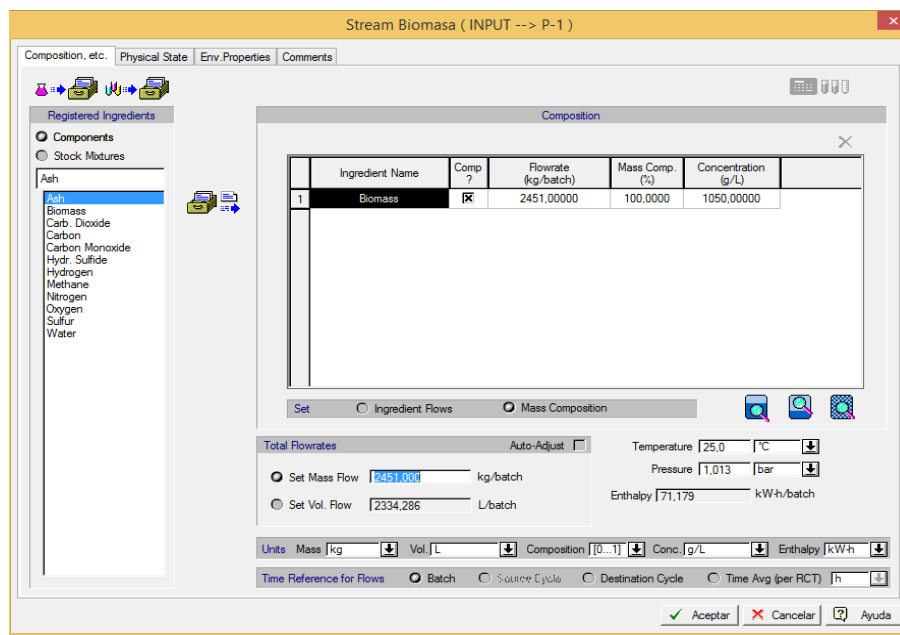


Figura L-8. Condiciones iniciales de aire en Medio Atrato escenario medio

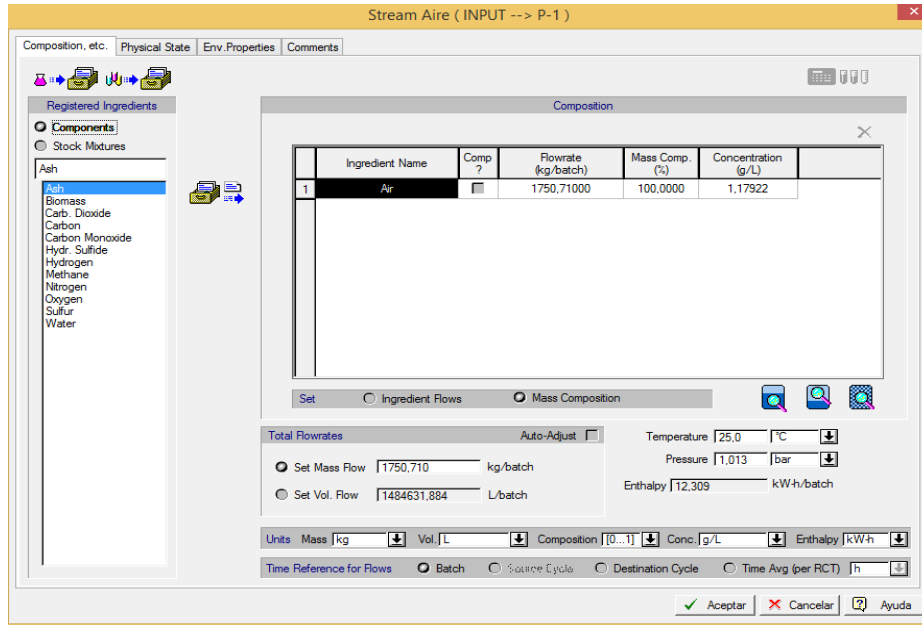


Figura L-9. Gas de síntesis en Medio Atrato escenario medio

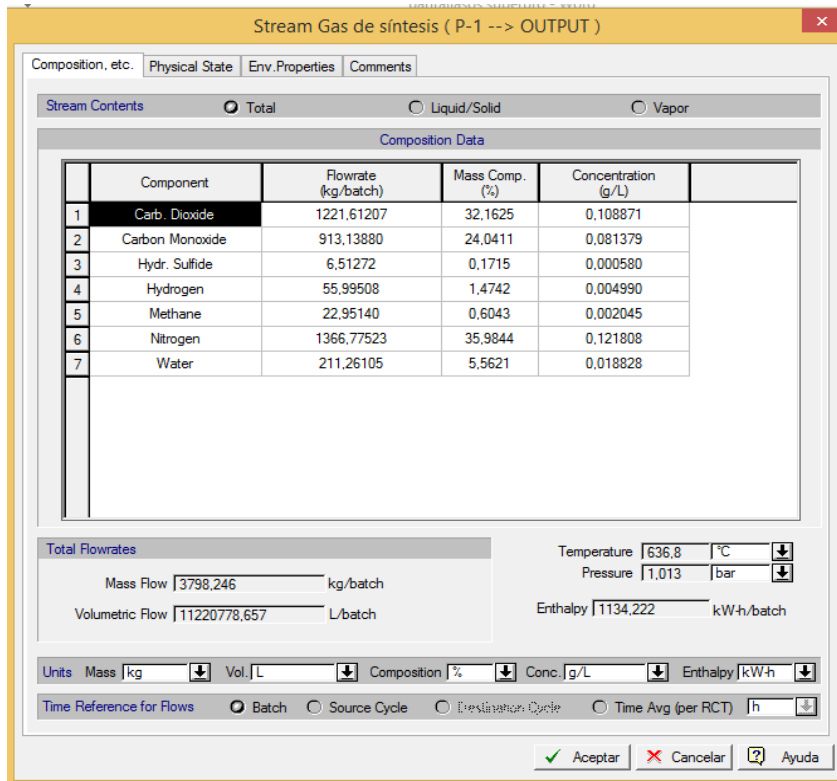


Figura L-10. Cenizas de gasificación en Medio Atrato escenario medio

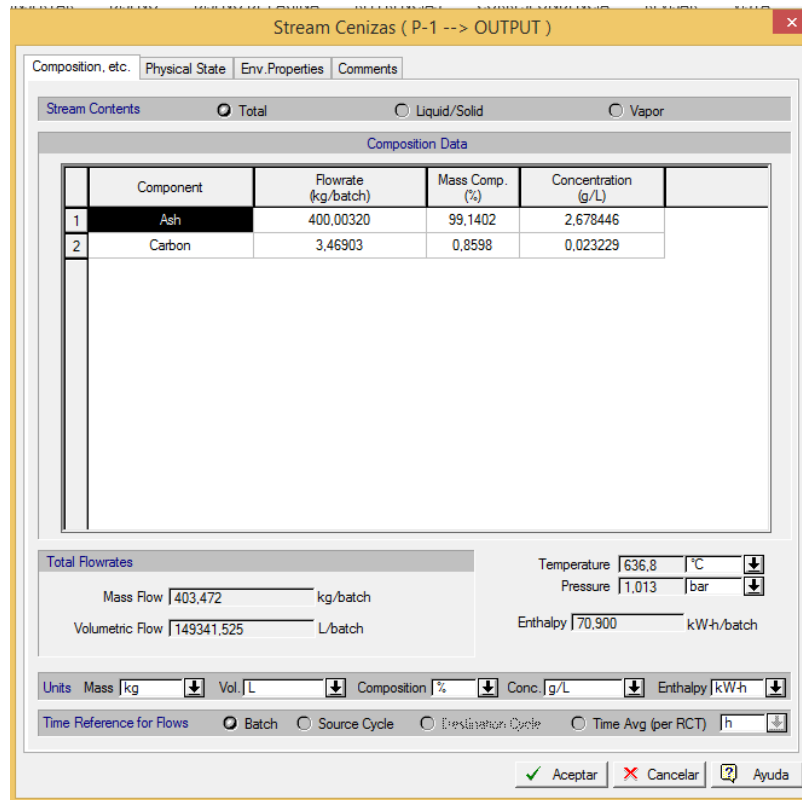


Figura L-11. Condiciones iniciales de biomasa en Medio Atrato escenario alto

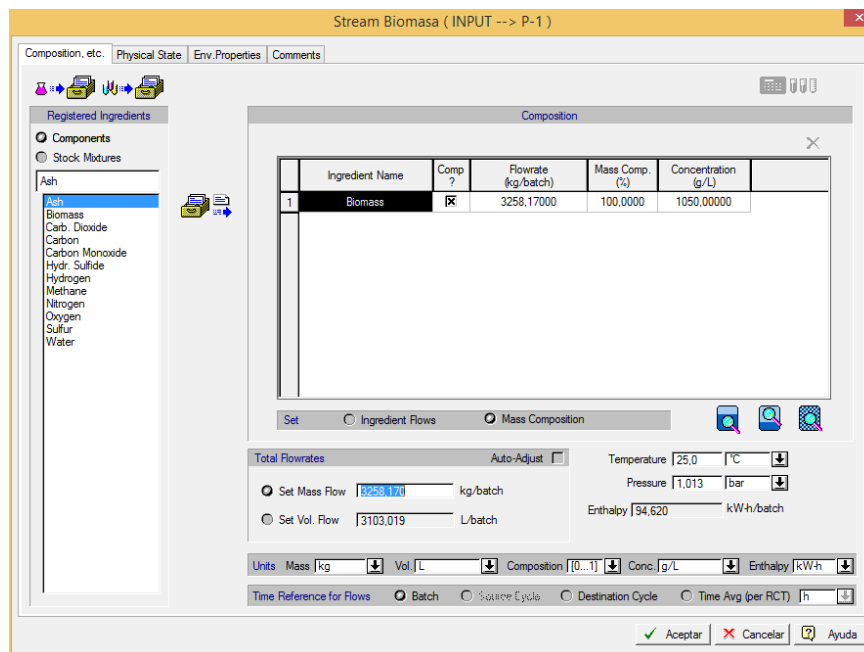


Figura L-12. Condiciones iniciales de aire en Medio Atrato escenario alto

Stream Aire ( INPUT --> P-1 )

Composition

Ingredient Name	Comp ?	Flowrate (kg/batch)	Mass Comp. (%)	Concentration (g/L)
1 Air	<input type="checkbox"/>	2327.29000	100.0000	1.17922

Set  Ingredient Flows  Mass Composition

Total Flowrates Auto-Adjust  Temperature 25.0 °C  
 Set Mass Flow 2327.29000 kg/batch Pressure 1.013 bar  
 Set Vol. Flow 11973581.540 L/batch Enthalpy 16.363 kW-h/batch

Units Mass kg Vol. L Composition [%] Conc. g/L Enthalpy kW-h

Time Reference for Flows  Batch  Source Cycle  Destination Cycle  Time Avg (per RCT) h

Aceptar Cancelar Ayuda

Figura L-13. Gas de síntesis en Medio Atrato escenario alto

Stream Gas de síntesis ( P-1 --> OUTPUT )

Stream Contents  Total  Liquid/Solid  Vapor

Composition Data

Component	Flowrate (kg/batch)	Mass Comp. (%)	Concentration (g/L)
1 Carb. Dioxide	1623.91531	32.1623	0.108870
2 Carbon Monoxide	1213.87363	24.0412	0.081380
3 Hydr. Sulfide	8.65751	0.1715	0.000580
4 Hydrogen	74.43583	1.4742	0.004990
5 Methane	30.50948	0.6043	0.002045
6 Nitrogen	1816.90947	35.9846	0.121808
7 Water	280.83224	5.5620	0.018827

Total Flowrates Temperature 636.8 °C  
 Mass Flow 5049.133 kg/batch Pressure 1.013 bar  
 Volumetric Flow 14916160.716 L/batch Enthalpy 1507.755 kW-h/batch

Units Mass kg Vol. L Composition % Conc. g/L Enthalpy kW-h

Time Reference for Flows  Batch  Source Cycle  Destination Cycle  Time Avg (per RCT) h

Aceptar Cancelar Ayuda

Figura L-14. Cenizas de gasificación en Medio Atrato escenario alto

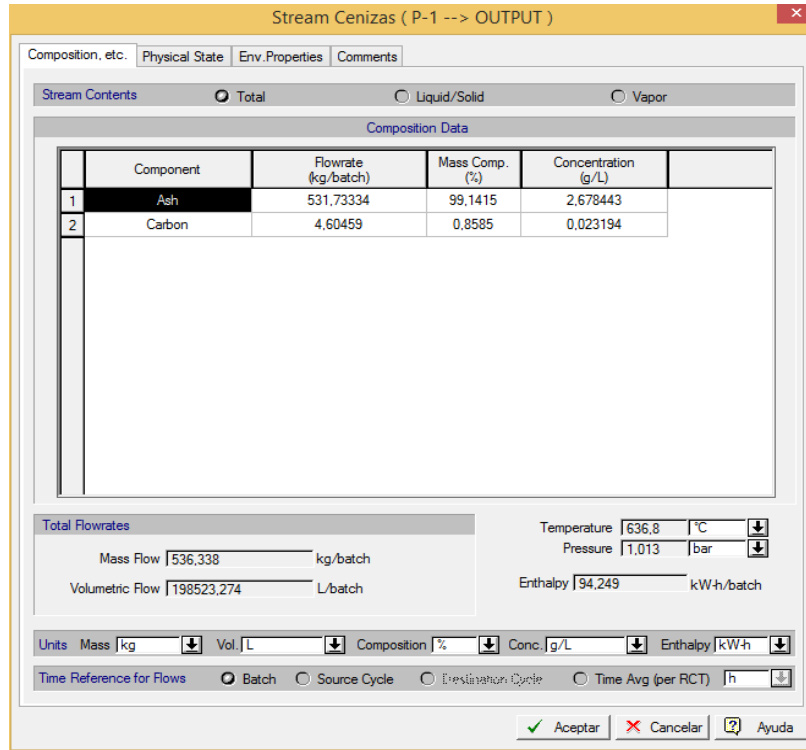


Figura L-15. Balances energéticos en Medio Atrato escenario bajo

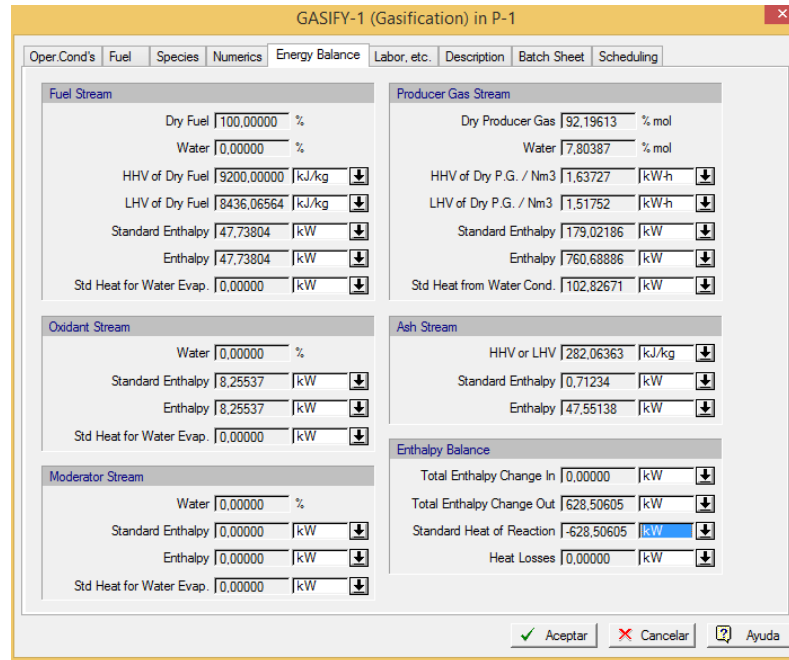


Figura L-16. Balances energéticos en Medio Atrato escenario medio

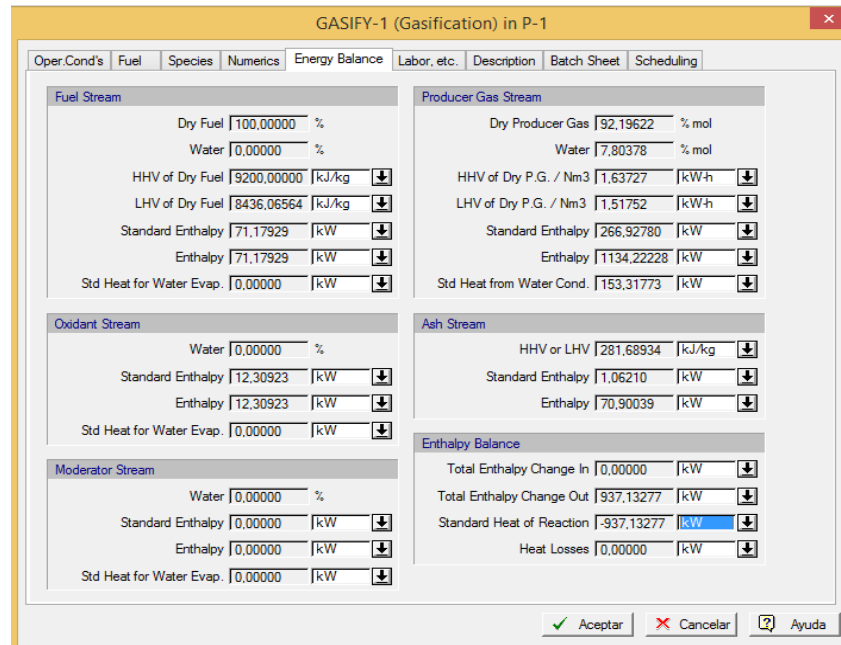
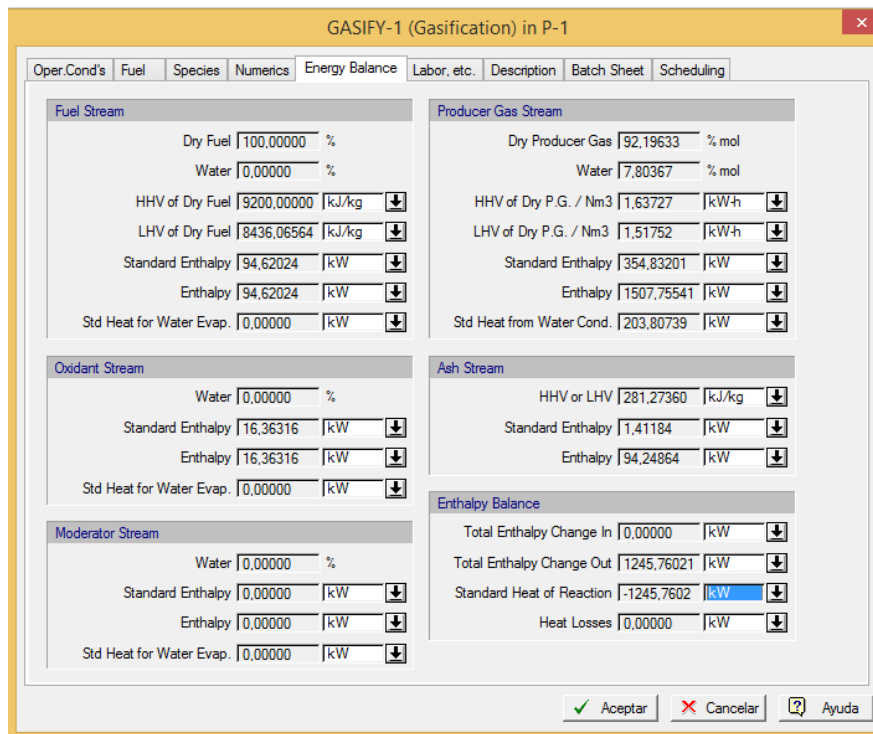
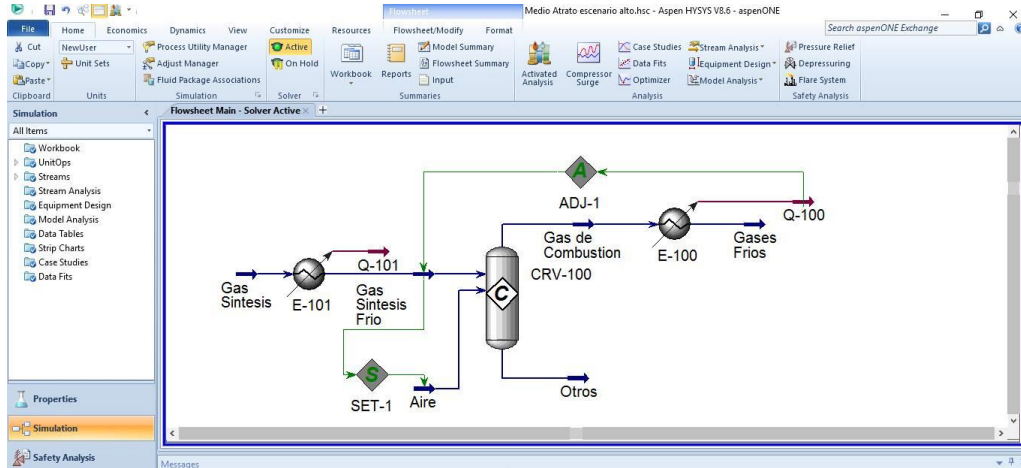


Figura L-17. Balances energéticos en Medio Atrato escenario alto



## ANEXO M. Simulación generación de energía eléctrica con raquis de plátano

Figura M-1. Diagrama de simulación transformación gas de síntesis en energía eléctrica



En el proceso de transformación de gas de síntesis a energía eléctrica mediante un motor de combustión interna se llevó a cabo la siguiente reacción:

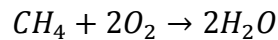
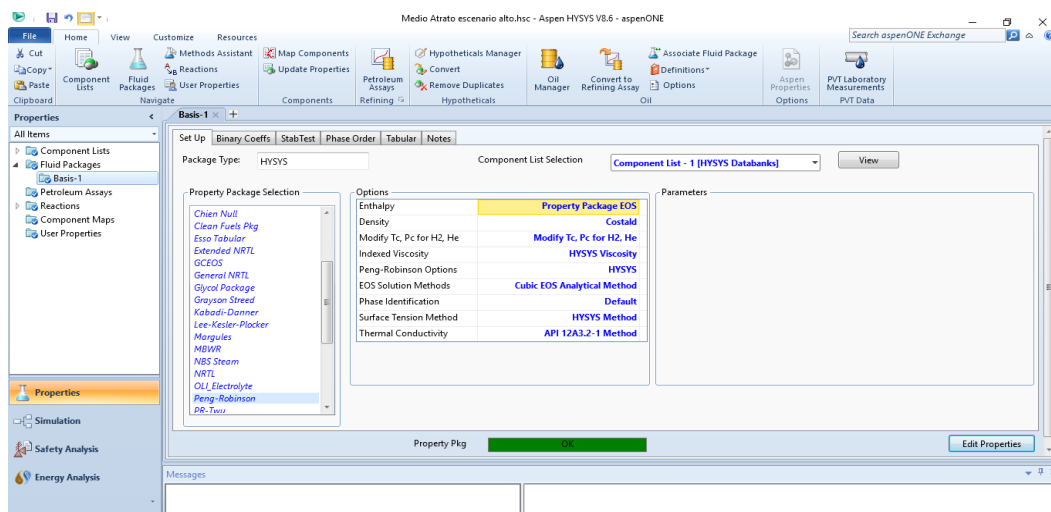


Figura M-2. Paquete termodinámico



Como se muestra en la figura L-2 el paquete termodinámico del software utilizado fue Peng- Robinson.

Figura M-3. Condiciones de entrada del gas de síntesis Medio Atrato escenario bajo

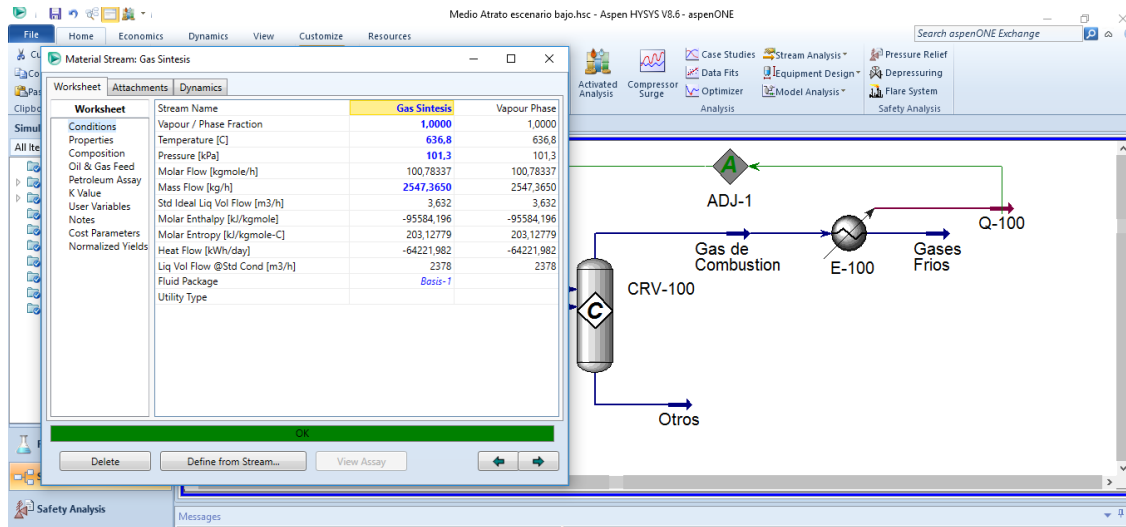


Figura M-4. Composición del gas de síntesis en Medio Atrato escenario bajo

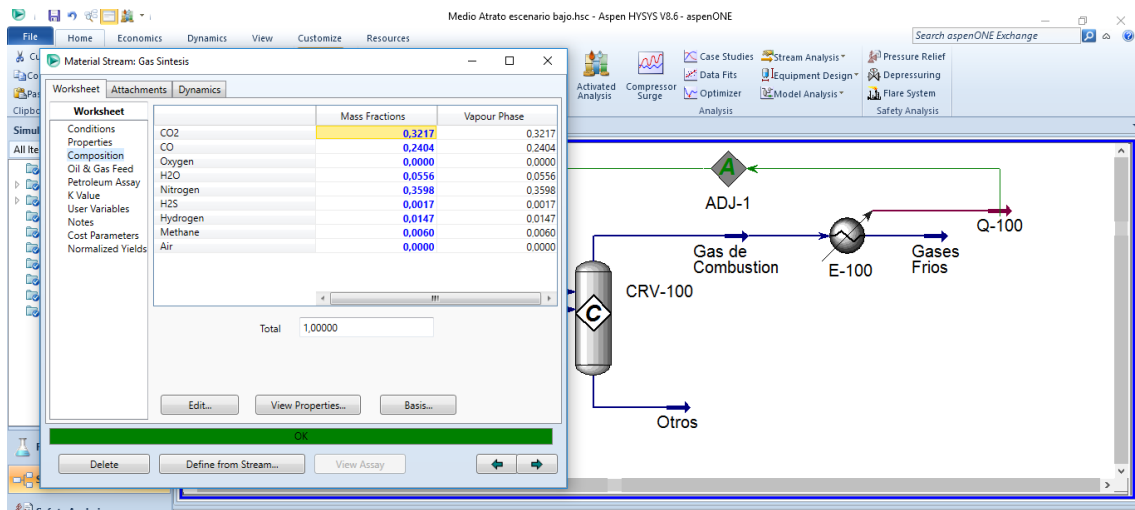


Figura M-5. Energía generada Medio Atrato escenario bajo

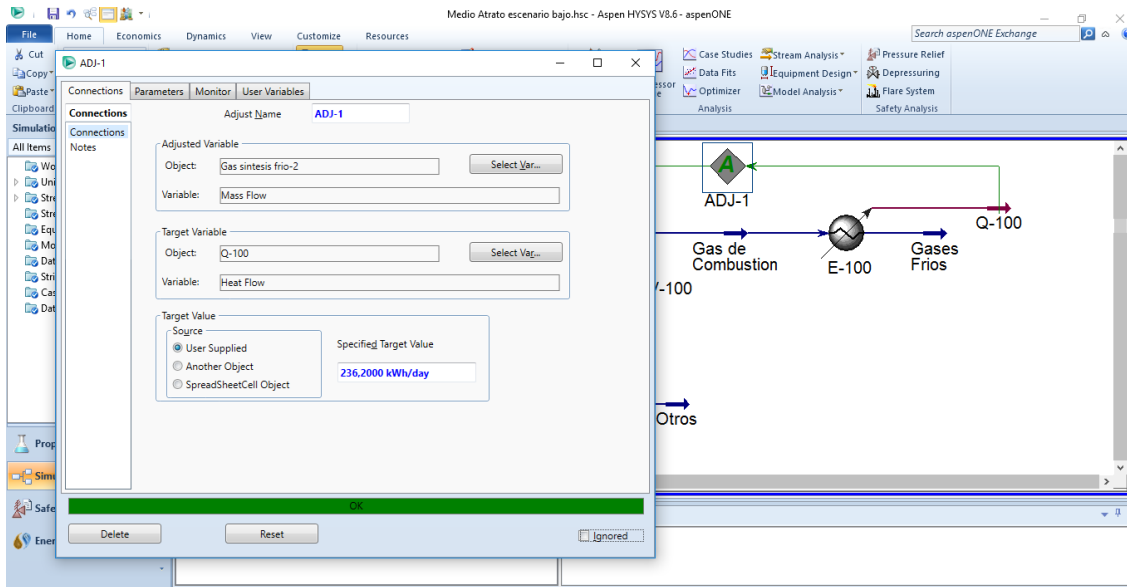


Figura M-6. Condiciones de entrada del gas de síntesis Medio Atrato escenario medio

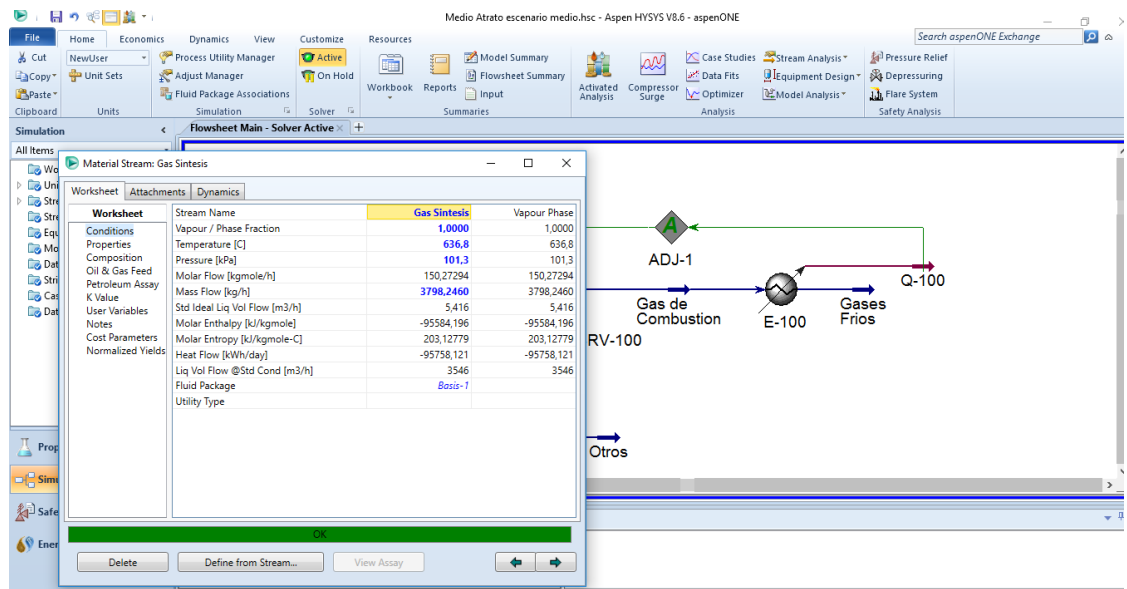


Figura M-7. Composición del gas de síntesis en Medio Atrato escenario medio

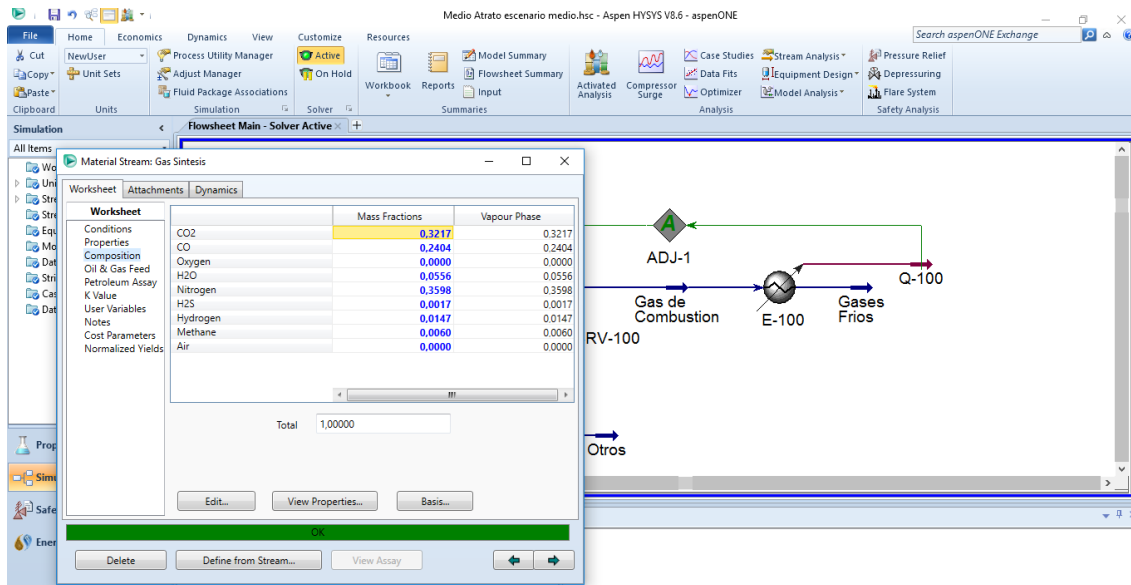


Figura M-8. Energía generada Medio Atrato escenario medio

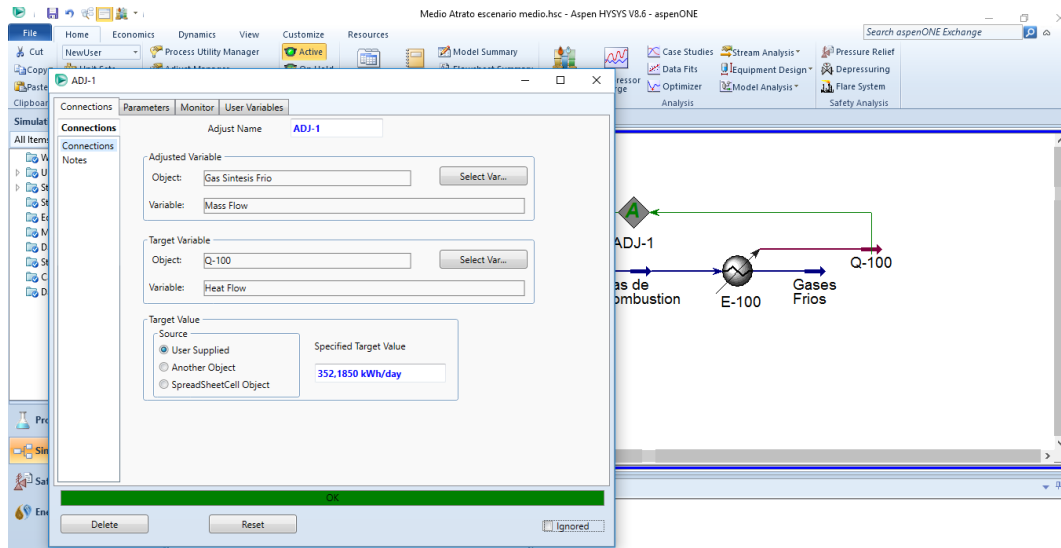


Figura M-9. Condiciones de entrada del gas de síntesis Medio Atrato escenario alto

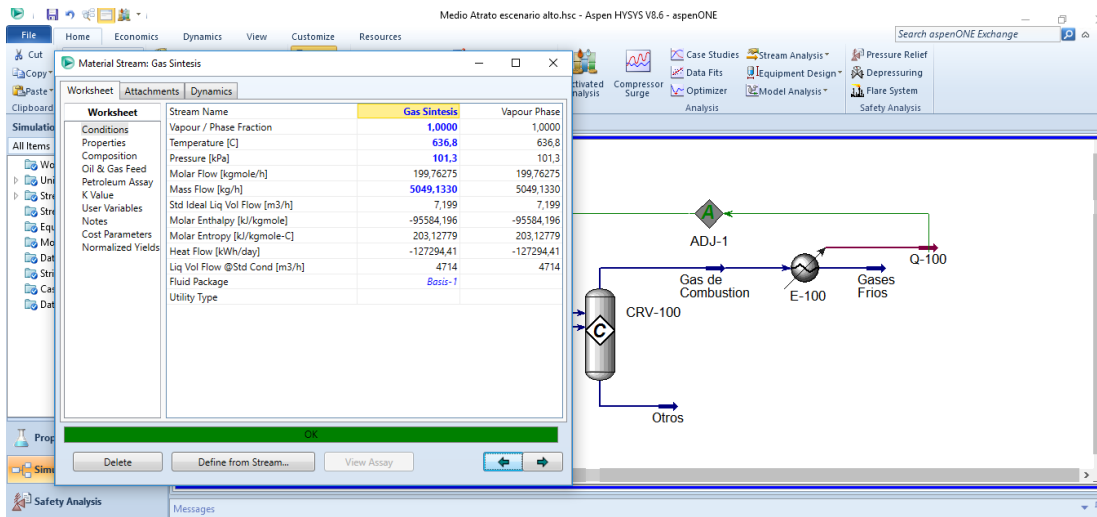


Figura M-10. Composición del gas de síntesis en Medio Atrato escenario alto

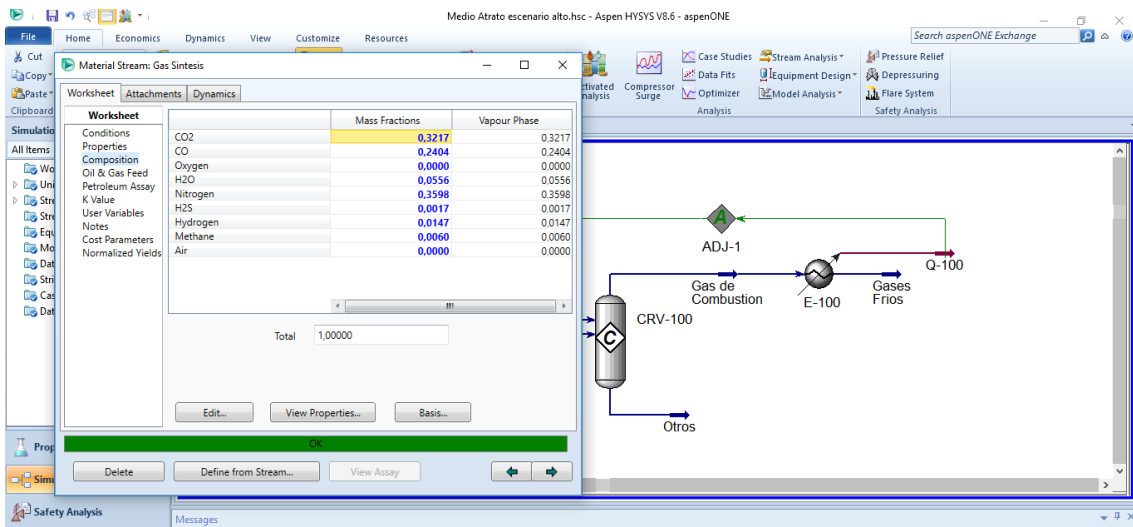


Figura M-11. Energía generada Medio Atrato escenario alto

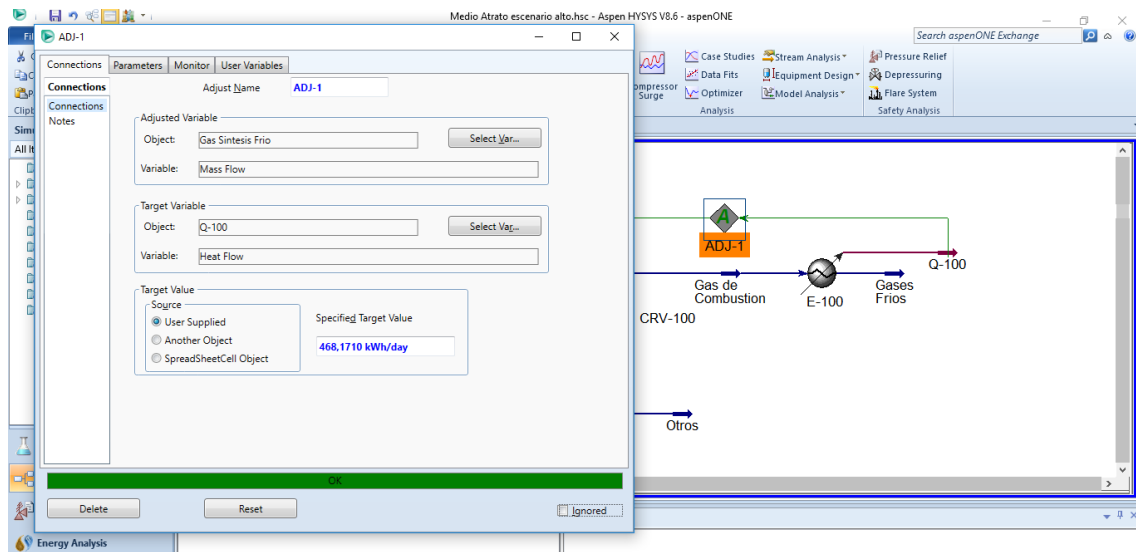


Figura M-12. Balances de materia Medio Atrato escenario bajo

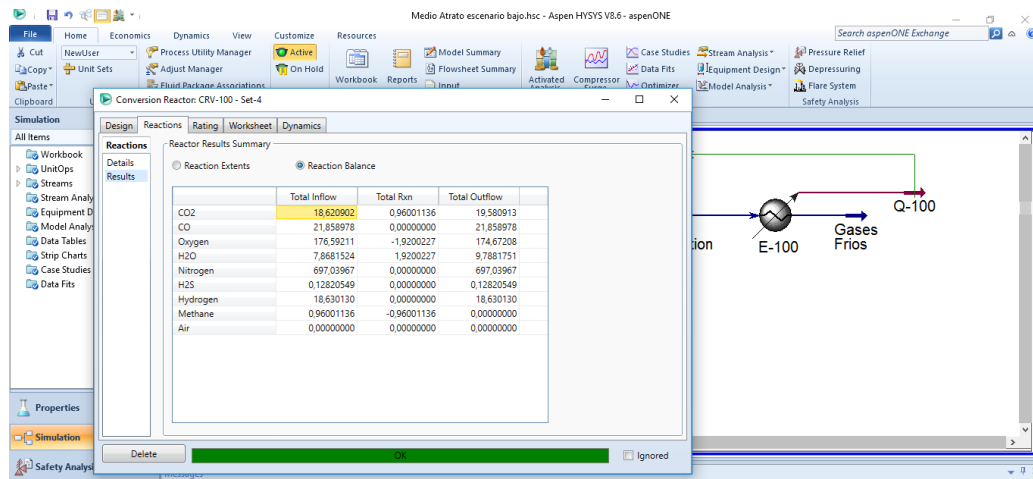


Figura M-13. Balances de materia Medio Atrato escenario medio

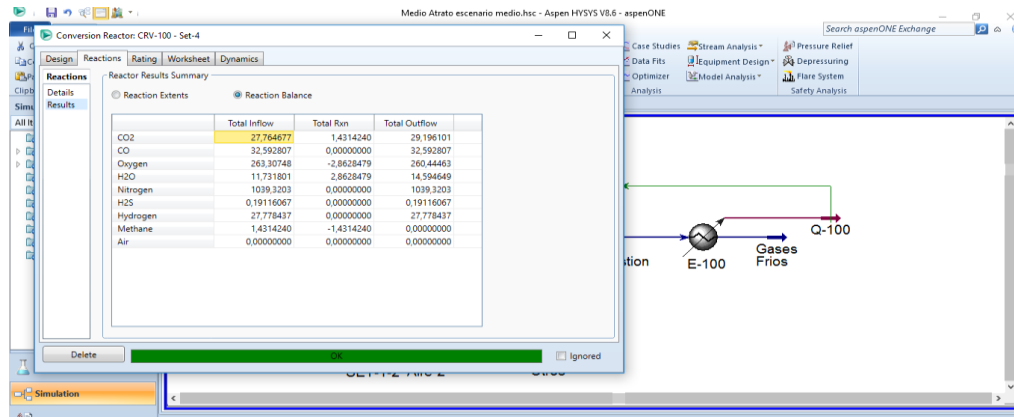


Figura M-14. Balances de materia Medio Atrato escenario alto

