

**EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE DIFERENTES CONFIGURACIONES PARA UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE POTENCIA CON BASE EN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA INTEGRADO A UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE BIOMASA.**

**EDGAR ANDRÉS NARANJO ANAYA  
JUAN SEBASTIÁN GAMARRA QUINTERO**



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECHANICAS  
PROGRAMA INGENIERÍA EN ENERGÍA**

**2017**

**EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE DIFERENTES CONFIGURACIONES PARA UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE POTENCIA CON BASE EN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA INTEGRADO A UN SISTEMA DE GASIFICACIÓN DE BIOMASA.**

**EDGAR ANDRÉS NARANJO ANAYA  
JUAN SEBASTIÁN GAMARRA QUINTERO**

**Proyecto de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero en Energía.**

**Director  
M. Sc. Carlos Alirio Díaz Gonzales.**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAICAS  
PROGRAMA INGENIERÍA EN ENERGÍA**

**2017**

Nota de Aceptación

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

Firma del Jurado

---

Firma de calificador

Bucaramanga, Noviembre de 2017

## DEDICATORIA

A Dios y a nuestra familia por brindarnos cariño, apoyo, comprensión, fortaleza y voz de aliento en momentos difíciles, y a todas las demás personas que nos acompañaron en el desarrollo de este proyecto.

## **AGRADECIMIENTO**

Agradecemos en primer lugar a Dios, por habernos dado las habilidades necesarias para alcanzar este sueño. También agradecemos a todas las personas que contribuyeron en nuestros procesos de formación profesional y que directa o indirectamente nos apoyaron en la realización de este trabajo.

A nuestro director de Proyecto de grado, M.Sc. Carlos Alirio Días González, por su guía, enseñanza y comprensión durante este desarrollo, a nuestro co-director de grado, PhD Leonardo Esteban Pacheco Sandoval por su comprensión, paciencia y enseñanza.

Los autores del proyecto.

## Contenido

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN .....	11
PLANTEAMIENTO.....	12
ANTECEDENTES .....	13
OBJETIVOS .....	15
METODOLOGÍA .....	16
CAPITULO 2 MARCO CONCEPTUAL .....	18
2-1 GENERACIÓN EN ZONAS NO INTERCONECTADAS .....	18
2-2 ANÁLISIS DEL SISTEMA DE GENERACIÓN DE POTENCIA.....	24
2-3 FUNDAMENTOS ANÁLISIS TERMODINÁMICO .....	29
2-4 FUNDAMENTOS ANÁLISIS EXERGÉTICO.....	39
2-5 FUNDAMENTOS ANÁLISIS TERMoeCONÓMICO .....	41
2-6 INDICADORES DE EFICIENCIA ENERGÉTICA .....	44
CAPITULO 3 DESARROLLO DEL PROYECTO .....	48
3-1 PARÁMETROS INICIALES DEL SISTEMA .....	50
3-2 ANÁLISIS TERMODINÁMICO DEL SISTEMA.....	53
3-3 ANÁLISIS EXERGÉTICO DEL SISTEMA.....	59
3-4 ANÁLISIS TERMoeCONÓMICO .....	65
3-4-1 Análisis Primera Configuración .....	65
3-4-2 Análisis Segunda Configuración.....	68
CAPITULO 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	70
CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES.....	81
BIBLIOGRAFIA.....	83
ANEXOS .....	87

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> KW/Usuario para ZNI.....	20
<b>Tabla 2.</b> Horas diarias de servicio/ No. de usuarios. ....	21
<b>Tabla 3.</b> Costo de Prestación del Servicio.....	21
<b>Tabla 4.</b> Demanda Total Diaria Caso de Estudio .....	50
<b>Tabla 5.</b> Parámetros del Sistema de Gasificación de Biomasa .....	51
<b>Tabla 6.</b> Características del Motor GENRAC RG022.....	52
<b>Tabla 7.</b> Composición del Gas de Síntesis.....	53
<b>Tabla 8.</b> Balance Estequiométrico .....	53
<b>Tabla 9.</b> Entalpías de Formación y Sensibles .....	54
<b>Tabla 10.</b> Formulaciones Estados del Ciclo de Potencia.....	58
<b>Tabla 11.</b> Relación de Consumo/Potencia para el Banco de Baterías .....	62
<b>Tabla 12.</b> Energía a Almacenar en Banco de Baterías.....	62
<b>Tabla 13.</b> Parámetros del Dimensionado para Banco de Baterías.....	63
<b>Tabla 14.</b> Especificaciones Técnicas Batería SBS Serie STT .....	63
<b>Tabla 15.</b> Configuración Banco de Baterías.....	64

## LISTA DE CUADROS

<b>Cuadro 1.</b> Metodología del Proyecto.....	17
<b>Cuadro 2.</b> Marco Normativo para Zonas No Interconectadas. ....	19
<b>Cuadro 3.</b> Clasificación de Motores de Combustión Interna. ....	25
<b>Cuadro 4.</b> Características del Motor Otto. ....	33
<b>Cuadro 5.</b> Clasificación de los Compresores.....	35
<b>Cuadro 6.</b> Diferencia Análisis Económico y Termodinámico .....	41
<b>Cuadro 7.</b> Criterios de Asignación de Costos Primera Configuración.....	68
<b>Cuadro 8.</b> Criterios de Asignación de Costos Segunda Configuración .....	69



## LISTA DE GRÁFICOS

<b>Grafica 1.</b> Curva Demanda Total Diaria Zona Caso de Estudio.....	51
<b>Grafica 2.</b> Temperatura de Combustión en relación a Hora de Demanda .....	70
<b>Grafica 3.</b> Irreversibilidades Primera Configuración .....	71
<b>Grafica 4.</b> Irreversibilidades Segunda Configuración .....	72
<b>Grafica 5.</b> Irreversibilidades Totales para Ambas Configuraciones.....	73
<b>Grafica 6.</b> Irreversibilidades Torales para Ambas Configuraciones .....	73
<b>Grafica 7.</b> Eficiencias Primera Configuración.....	74
<b>Grafica 8.</b> Eficiencias Segunda Configuración .....	75
<b>Grafica 9.</b> Costo de Almacenamiento Primera Configuración .....	76
<b>Grafica 10.</b> Costo Almacenamiento Segunda Configuración.....	77
<b>Grafica 11.</b> Costo Kilovatio-Hora para la Población en Primera y Segunda Configuración .....	78
<b>Grafica 12.</b> Variación Costo Energía Población por Variación del Costo del Gas de Síntesis Primera Configuración .....	79
<b>Grafica 13.</b> Variación Costo Energía Población por Variación del Costo del Gas de Síntesis Segunda Configuración .....	80

## LISTA TABLA DE ANEXOS

<b>Tabla A 1.</b> Consumo Volumétrico para el MCI a Cargas Parciales y Gas Natural .....	87
<b>Tabla A 2.</b> Consumo Volumétrico para el MCI a Cargas Parciales y Gas de Síntesis .....	88
<b>Tabla A 3.</b> Consumo Volumétrico para el MCI a Carga Constante y Gas de Síntesis .....	88
<b>Tabla A 4.</b> Estados de Entrada y Compresión para Primera Configuración .....	88
<b>Tabla A 5.</b> Estados de Combustión y Expansión para Primera Configuración .....	88
<b>Tabla A 6.</b> Estados de Combustión y Expansión para Segunda Configuración .....	89
<b>Tabla A 7.</b> Balance de Potencias Primera Configuración .....	89
<b>Tabla A 8.</b> Resultados Análisis Exergético MCI y Generador Primera Configuración .....	91
<b>Tabla A 9.</b> Resultados Análisis Exergético MCI y Generador Segunda Configuración .....	91
<b>Tabla A 10.</b> Resultados Análisis Exergético Compresor .....	91
<b>Tabla A 11.</b> Resultados Análisis Termodinámico Compresor .....	92
<b>Tabla A 12.</b> Resultados Análisis Exergético Tanque de Almacenamiento .....	92
<b>Tabla A 13.</b> Resultados Análisis Exergético Banco de Baterías .....	92
<b>Tabla A 14.</b> Irreversibilidades Totales Primera Configuración .....	93
<b>Tabla A 15.</b> Irreversibilidades Totales Segunda Configuración .....	93
<b>Tabla A 16.</b> Costo Equipos Sistema de Generación .....	94
<b>Tabla A 17.</b> Costo Exergoeconómico Unitario Primera Configuración .....	94
<b>Tabla A 18.</b> Costo Exergoeconómico Unitario Segunda Configuración .....	95
<b>Tabla A 19.</b> Costo Energía Población ante Variación del Costo del Gas de Síntesis Primera Configuración .....	95
<b>Tabla A 20.</b> Costo Energía Población ante Variación del Costo del Gas de Síntesis Segunda Configuración .....	96

## CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN

El presente proyecto, modeló y evaluó de manera termodinámica y exergoeconomica el desempeño de dos configuraciones de almacenamiento para un sistema de generación basado en gasificación de biomasa para una comunidad de la Orinoquia Colombiana no interconectada a la red eléctrica nacional. El modelo fue desarrollado en función de la curva de demanda de energía eléctrica de dicha comunidad. Se inició con la selección del motor a utilizar de acuerdo a la demanda máxima de potencia que tuviese la comunidad, posteriormente se realizó una búsqueda bibliográfica para escoger una composición de syngas que fuese adecuada para las condiciones del sitio, consecutivamente se realizó el modelado termodinámico y análisis exergoeconomico dando cumplimiento a los objetivos planteados. Con el proyecto se pretende dar un criterio de decisión al momento de llevar a cabo este tipo de proyectos en las zonas no interconectadas aportando así a la mejora en las soluciones que se brindan a las mismas. El criterio está fundamentado en el análisis de resultados realizado en el presente proyecto. En este documento se presenta el marco conceptual ubicando los conceptos teóricos necesarios para realizar las actividades presentadas en la metodología; el desarrollo del proyecto, donde se exponen de manera consecutiva y acorde al modelado del sistema, las ecuaciones y balances termodinámicos, exergéticos y termoeconomicos implementando el software de ingeniería EES<sup>1</sup>. Posteriormente se analizan y discuten los resultados mediante graficas que muestran el comportamiento de las variables del sistema. Finalmente se muestran las observaciones y conclusiones del proyecto realizado, discutiendo aspectos importantes para la evaluación del desempeño de cada configuración de acuerdo a los objetivos planteados. Los Anexos presentan los resultados numéricos del modelo.

---

<sup>1</sup> Engineering Equation Solver

## PLANTEAMIENTO

Las zonas no interconectadas representan el 52% del territorio nacional, el cual incluye 90 municipios. Esta extensión de territorio cuenta con importantes recursos hídricos y riqueza natural donde habitan 1'400.000 colombianos. La implementación de energías no convencionales como soluciones energéticas en dichas zonas no interconectadas mejora las condiciones de vida de estas poblaciones a través de la elaboración de proyectos con criterios de eficacia, eficiencia, efectividad y responsabilidad ambiental llevando energía sostenible a las localidades donde no la poseen o la prestación del servicio es deficiente, esto también ayuda a diversificar la matriz energética del país.

El uso de reservas energéticas fósiles, el cambio climático, el aumento poblacional, la corta vida proyectada para las reservas probadas y probables de combustibles han incrementado aparatosamente la inestabilidad mundial. El consumo global de energía se ha duplicado en los últimos 40 años. En el entorno de la generación de energía, las fuentes renovables desempeñan un papel esencial de acuerdo al potencial sostenible que presenta cada una de ellas.

En este contexto la gasificación de biomasa, plantea una posibilidad real a la solución de la problemática de producción energética a partir de fuentes no renovables de energía para las zonas no interconectadas, dicho problema es solucionado comúnmente con plantas de generación diésel. La biomasa y en específico aquella de origen vegetal (madera, residuos agrícolas, cultivos energéticos), figura entre los candidatos más prometedores para cambiar el escenario vigente hacia un entorno sostenible. Nag destacó que el cambio desde el petróleo hacia la biomasa es la clave para el desarrollo de una sociedad sostenible, la independencia energética y la gerencia de las emisiones con efecto invernadero.

En Colombia muchas regiones poseen extensiones de tierra sin uso productivo, en el caso de estudio del presente proyecto es común encontrar hectáreas con cultivos de caña brava la cual puede ser usada como cultivo energético para suplir la demanda de energía eléctrica de áreas aledañas al municipio que hacen parte de las zonas no interconectadas de Colombia.

## ANTECEDENTES

Un primer trabajo corresponde a Durango (2015), quien realizó el: “*Análisis termoeconómico de gasificación integrada a motores de combustión interna, empleando cascarilla de arroz en el departamento de Córdoba*”. Este trabajo se desarrolló en cuatro etapas, en la primera calculan el potencial productivo para la biomasa residual de cascarilla de arroz en el departamento de Córdoba y establecen una producción promedio anual mediante un modelo matemático de pronóstico (Suavizamiento exponencial simple), en la segunda etapa realizan la modelación de un sistema de gasificación de la biomasa integrado a un MCI en ASPEN HYSYS obteniendo un gas pobre con poder calorífico de 2,82 MJ/Kg, en la tercera etapa consiste en un análisis de sensibilidad para optimizar las eficiencias energéticas y la cuarta etapa es un análisis termoeconómico para conocer la viabilidad de la tecnología con economías de escala obteniendo un Costo unitario de producción de 633 COP por kWh.

En el trabajo de Gonzales (2003), presenta un estado del arte del uso del gas de gasificación termoquímica de biomasa en MCIA, Publican la experiencia adquirida por el centro de investigaciones energéticas, medioambientales y tecnológicas (CIEMAT) en el uso del gas de gasificación termoquímica de biomasa en MCIA, Inician enmarcando histórica y técnicamente la tecnología, estudian el mecanismo de producción del gas de gasificación, características químicas y físicas del gas en la salida del gasificador, sistemas de tratamiento del gas para el uso en MCIA, Luego realizan una revisión de los fundamentos generales de MCI alimentados con gas de gasificación y finalmente un recuento de las experiencias más recientes del uso de gas de gasificación en MCI a nivel comercial e investigativo.

En el estudio de Zainal (2001), diseñaron un sistema de gasificación de flujo descendente con aire soplado acoplado a un MCIA de 20 kW, enfocados en la caracterización de los procesos que ocurren dentro del gasificador como la variación de temperatura dentro del gasificador, así como en la salida caracterizan el poder calorífico del gas y la velocidad del flujo. El gas producido lo usaron como vector energético en el MCIA para una carga de 12 kWe.

El IPSE en convenio con la Universidad Nacional de Colombia construyó para el 2009 en el municipio del Necoclí una central de generación de 40 kW a partir de gasificación de madera con la infraestructura de gasificación y eléctrica para distribución en media y baja tensión. En la primera etapa del proyecto instalaron un gasificador de lecho fijo para producir un gas pobre que inyectaron a un grupo electrógeno convencional. Esta energía fue conducida a 48 hogares con seis horas de servicio en promedio.

El trabajo de Pérez (2011) “*Gas pobre factibilidad de su uso en los motores ZIL-130*” realiza un estudio de los gasificadores existentes y el estado actual de la tecnología para

lo cual escoge el gasificador Downdraft Imbert Modificado por la ventajas que tiene para el acoplamiento a un MCI, dichas ventajas son: baja concentración de alquitrán en el gas pobre ( $<10\text{mg/Nm}^3$ ) y baja temperatura del gas producido a la salida. En el estudio realizaron diferentes cálculos teóricos para ver el comportamiento al cambiar el combustible por gas pobre, también una valoración económica de dicho cambio y dimensionaron el gasificador que alimenta el motor.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Estudiar el desempeño de un sistema de generación de potencia con base en motor de combustión interna integrado a un sistema de gasificación de biomasa para cada configuración de almacenamiento y generación de energía.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Modelar las diferentes configuraciones del sistema de generación de potencia con base en motor de combustión interna integrado a un sistema de gasificación de biomasa.
- Determinar los parámetros de desempeño energético y termoeconómico de las diferentes configuraciones del sistema de generación de potencia con base en motor de combustión interna integrado a un sistema de gasificación de biomasa.
- Establecer indicadores de desempeño energéticos y termoeconómicos que permitan comparar las diferentes configuraciones del sistema de generación de potencia.

## METODOLOGÍA

La metodología del proyecto se basa en cada uno de los objetivos planteados; el modelamiento de las dos configuraciones del sistema de generación y la determinación de los parámetros e indicadores de desempeño energético y termo económico. Esto se realizara en un total de cuatro fases, las cuales se explicaran a continuación.

La primera fase comprende una revisión y recolección de información sobre la zona del caso de estudio, datos de carga y potencia, así como también la composición del gas pobre obtenido del proceso de gasificación. Se realiza una selección preliminar de los distintos equipos que se usaran en el modelado como son el motor de combustión interna, las baterías de almacenamiento, los tanques de almacenamiento, las válvulas de regulación de presión y de caudal entre otros.

La segunda fase del estudio abarca el modelado matemático de las dos configuraciones en el software de trabajo EES (Engineering Equation Solver). En esta fase se hace una revisión teórica de diferentes modelos matemáticos, ecuaciones matemáticas y los diferentes parámetros de desempeño del sistema de generación de potencia relacionados al que se trabajara en este proyecto. De igual forma se hace una revisión teórica del motor de combustión interna y los diferentes equipos que hacen parte de las dos configuraciones establecidas.

Siguiente a esto se procede al establecimiento de los indicadores de desempeño energéticos (IDEns) y económico. Estos indicadores permiten la evaluación del sistema de potencia para cada configuración en base a parámetros de desempeño como características del sitio y variaciones de carga. Los indicadores básicos a revisar son eficiencia global del sistema, costo de kilovatio hora producida, relación generación de gas pobre y generación de potencia eléctrica, entre otros.

La última fase del proyecto integra la comparación y análisis de los resultados obtenidos en las dos configuraciones definiendo de esta manera la mejor alternativa de configuración de acuerdo a los distintos escenarios para cada configuración.

A continuación el Cuadro 1 muestra a modo de resumen el proceso metodológico del proyecto.



**Cuadro 1. Metodología del Proyecto.**

<b>Fase</b>	<b>Descripción de Fase</b>
<b>Fase 1</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Revisión y recolección datos e información de sitio.</li><li>• Caracterización de gas de gasificación.</li><li>• Selección preliminar de equipos a usar en el modelamiento de cada configuración.</li></ul>
<b>Fase 2</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Modelamiento matemático y termodinámico de las dos configuraciones en software de trabajo.</li><li>• Revisión teórica de diferentes modelos matemáticos, ecuaciones matemáticas y los diferentes parámetros de desempeño del sistema de generación de potencia.</li><li>• Revisión teórica y conceptual de los equipos usados en ambas configuraciones.</li></ul>
<b>Fase 3</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Establecimiento de indicadores de desempeño energéticos (IDEns) y económicos.</li></ul>
<b>Fase 4</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Comparación y análisis de las configuraciones en base a los IDEns y otros factores relevantes.</li></ul>

Fuente: Autores del proyecto.

## CAPITULO 2 MARCO CONCEPTUAL

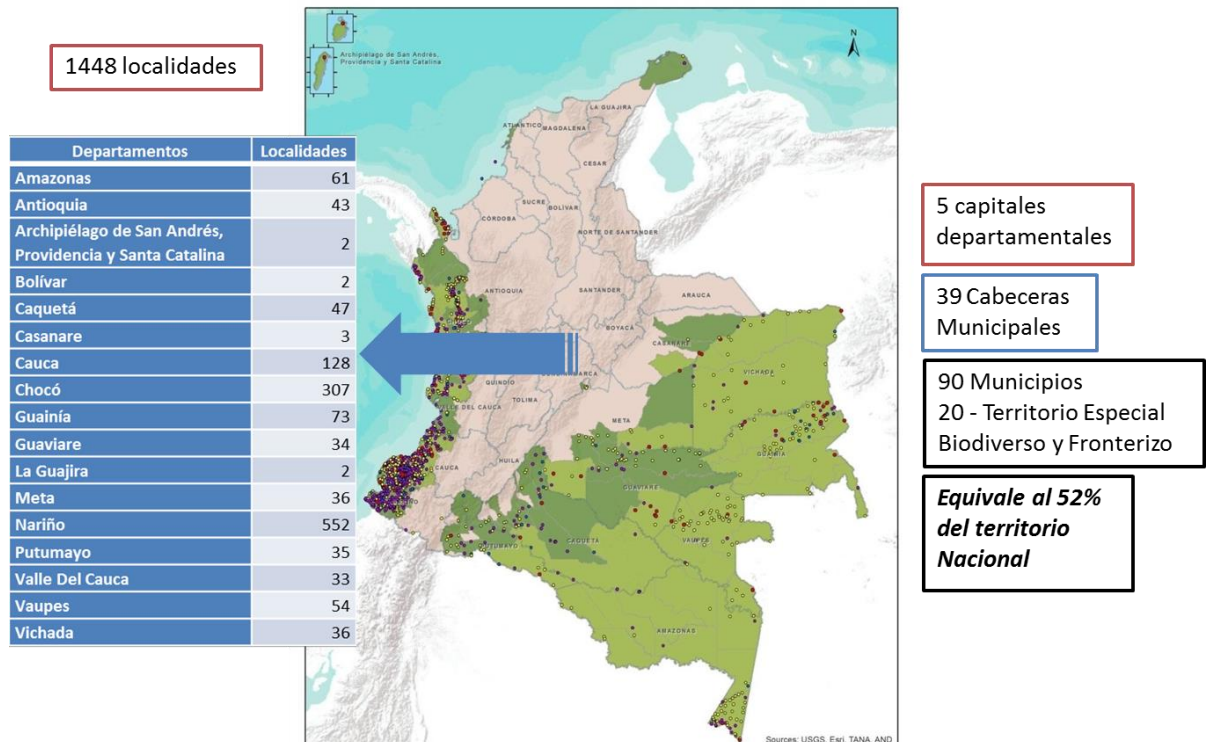
El contenido de este capítulo pretende hacer un contexto de los temas más relevantes del proyecto. Se comentara acerca de la generación actual en Colombia en zonas no interconectadas, así como una contextualización de temas como la gasificación, el gas de gasificación, los motores de combustión interna y el análisis exergético.

El capítulo se divide en las siguientes secciones fundamentales: Generación en Zonas no Interconectadas, Análisis del Sistema de Generación de Potencia y Fundamentos del Análisis Exergético, Fundamentos del Análisis Termoeconómico e Indicadores Energéticos.

### 2-1 GENERACIÓN EN ZONAS NO INTERCONECTADAS

Para todos los efectos relacionados con la prestación del servicio público de energía eléctrica se entiende por Zonas No Interconectadas a los municipios, corregimientos, localidades y caseríos no conectados al Sistema Interconectado Nacional, SIN.<sup>2</sup>

**Figura 1. Área de acción del IPSE.**



<sup>2</sup> Artículo 1°, Ley 855 de 2003.

Fuente: Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas de Colombia.

En Colombia el Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas - IPSE, atiende las necesidades energéticas de los habitantes que no cuentan con este servicio; identificando, implementando y monitoreando soluciones energéticas sostenibles con criterios de eficacia, eficiencia y efectividad en las Zonas no Interconectadas- ZNI, mejorando las condiciones de vida de sus pobladores y construyendo equidad en el país, a su vez impulsando el uso de las energías renovables con el fin de que Colombia goce de energías limpias y disminuya las emisiones de gases de efecto invernadero aportando así a los compromisos adquiridos por la meta impuesta en el COP21<sup>3</sup>.

### Marco Normativo

**Cuadro 2. Marco Normativo para Zonas No Interconectadas.**

RESOLUCIONES	NOMBRE O ASUNTO	DESCRIPCIÓN
RESOLUCIÓN MME 180961 de 2004	Por la cual se fijan las fórmulas para el cálculo y asignación de los subsidios destinados a los usuarios pertenecientes a los estratos socioeconómicos 1, 2 y 3 ubicados, en las Zonas No Interconectadas y se delegan unas funciones al Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas, IPSE.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Establece la potencia requerida por usuario y las horas de prestación de servicio diferenciando rangos, de acuerdo con el número de usuarios en cada localidad.</li> </ul>
RESOLUCIÓN CREG 091 de 2007	Por la cual se establecen las metodologías generales para remunerar las actividades de generación, distribución y comercialización de energía eléctrica, y las fórmulas tarifarias generales para establecer el costo unitario de prestación del servicio público de energía eléctrica en Zonas No Interconectadas.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Se definen las áreas de servicio exclusivo con sus respectivas reglas de conformación.</li> <li>Se definen la formulas tarifarias generales aplicables a áreas de servicio exclusivo.</li> </ul>
RESOLUCIÓN CREG 082	Por la cual se aprueban los costos unitarios máximos de prestación del servicio de	<ul style="list-style-type: none"> <li>Se fijan los costos máximos de prestación de servicio para cada</li> </ul>

<sup>3</sup> <http://www.ipse.gov.co/ipse/quienes-somos>

de 1997	electricidad para establecer las tarifas aplicables a los Usuarios finales en las Zonas No Interconectadas (ZNI) del territorio nacional.	uno de los departamentos que conforman las ZNI
RESOLUCIÓN CREG 077 de 1997	Por la cual se aprueba la fórmula general que permite determinar el costo de prestación del servicio y la fórmula tarifaria para establecer las tarifas aplicables a los usuarios del Servicio de electricidad en las Zonas No interconectadas (ZNI) del territorio nacional.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se establece la fórmula general de costos de prestación de servicio.</li> <li>• Se establece la estructura y fórmulas tarifarias.</li> </ul>
RESOLUCIÓN CREG 114 de 1996	Por la cual se establece la metodología para el cálculo del costo de prestación del servicio de energía eléctrica y se definen las fórmulas tarifarias para las Zonas No Interconectadas (ZNI) del territorio nacional.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Establece la metodología para el cálculo del costo de prestación del servicio, la fórmula tarifaria, y el cargo o tarifa máxima de conexión.</li> </ul>

Fuente: Autores del Proyecto.

### Condiciones de Prestación del Servicio de Energía en ZNI

En resolución 180961 del 2004 del Ministerio de Minas y Energía se define: la *relación Kilovatio/Usuario* la cual es el promedio de demanda de potencia por usuario de cada localidad, el número de horas de prestación del servicio (hora/día) refiriéndose a el promedio de horas al día que la localidad recibe el servicio de electricidad de acuerdo con la capacidad requerida por el número de usuarios en cada localidad, el factor de perdidas reconocido el cual es fijado en 20% para todas la localidades y el costo de prestación del servicio (\$/kWh)<sup>4</sup>.

**Tabla 1.** KW/Usuario para ZNI.

Rango	1	2	3	4	5	6
No. Usuarios	0-50	51-150	151-300	301-500	501-800	801->3001
kW/Usuario	0.28	0.3	0.32	0.34	0.35	0.4

Fuente: Resolución 180961 del 2004 del Ministerio de Minas y Energía.

<sup>4</sup> Artículo 1, Resolución 180961 de 2004.

**Tabla 2.** Horas diarias de servicio/ No. de usuarios.

Rango	1	2	3	4	5	6	7	8	9
No. Usuarios	0-50	51-150	151-300	301-500	501-800	801-1000	1001-2000	2001-3000	>3001
Horas diarias de servicio	4	5	8	10	12	14	16	18	20

Fuente: Resolución 180961 del 2004 del Ministerio de Minas y Energía.

La Tabla 3 muestra los costos unitarios máximos de prestación del servicio de electricidad para establecer las tarifas aplicables a los usuarios finales en las Zonas No Interconectadas (ZNI) aprobados por La Comisión de Regulación de energía y Gas mediante la resolución 082 de 1997.

**Tabla 3.** Costo de Prestación del Servicio.

Departamento	Costo de generación [\$/kWh]	Costo de distribución y comercialización [\$/kWh]	Costo máximo de prestación del servicio [\$/kWh]
Amazonas	190	36	226,1
Antioquia	191,4	34,1	225,5
Arauca	188,9	35,3	224,2
Caquetá	204,2	32,6	236,8
Casanare	201,7	35	236,7
Cauca	197,6	37,5	235,1
Choco	232,5	41	273,6
Guainía	117,8	25,7	143,4
Guaviare	187,1	36,8	223,9
Meta	196,5	34,2	230,7
Nariño	187,3	41,9	229,2
Putumayo	156	36,5	192,4
Vaupés	344,2	36,6	380,8
Vichada	196,2	36,9	233,1

Fuente: Resolución 180961 del 2004 del Ministerio de Minas y Energía.

A continuación se define los conceptos de energía, energía eléctrica y energía térmica que son fundamentales para el desarrollo del proyecto, también se describen las fuentes y tecnologías de generación de energía comúnmente usadas en Colombia para mejorar la calidad de vida de los habitantes de las Zonas No Interconectadas.

## **Energía**

La energía se define como la capacidad de trabajo que un sistema puede producir. Está presente en el entorno de diferentes formas, como por ejemplo: La energía potencial asociada a la ubicación relativa entre objetos dentro de un sistema; la energía cinética relacionada con el movimiento; la energía eléctrica asociada al flujo de electrones, la energía térmica, entre otras.

- *Energía Eléctrica*

Es la energía con mayor exergía, debido a que tiene el más alto potencial de realizar trabajo, por lo tanto es usada para realizar la mayor parte de las actividades. Es generada por la diferencia de potencial llamado voltaje entre dos puntos de un conductor lo que genera un flujo de electrones entre dichos dos puntos formando un corriente eléctrica.

- *Energía Térmica*

Es la energía que posee una sustancia por el movimiento de las moléculas que la constituyen, dicho movimiento implica una energía cinética de las partículas conocida como energía térmica, calor o energía calorífica.

## **Gasificación de Biomasa**

La biomasa se refiere al material orgánico que se utiliza para la producción de energía. Este proceso de producción de energía se conoce como Bioenergía. La biomasa se encuentra principalmente en forma de plantas vivas o recientemente vivas y desechos biológicos de uso industrial y doméstico. Debido a la amplitud del término, la composición física de la biomasa es inconsistente, pero generalmente incluye carbono, agua y compuestos volátiles orgánicos.

Para la producción de energía a partir de biomasa, la materia prima debe convertirse a una forma de energía utilizable a través de uno o muchos procesos que para el caso del presente proyecto se realiza mediante la gasificación, la cual es la conversión de biomasa en una mezcla de gases combustibles llamado gas de síntesis o syngas ( $H_2 + CO + CH_4 + CO_2$ ). El proceso de gasificación utiliza calor, presión y combustión parcial para crear gas de síntesis, que luego puede utilizarse en lugar de gas natural.

Algunas materias primas son más propicias para ciertos procesos de conversión de biomasa. La determinación de la materia prima y el proceso a usar esta determinada en gran medida por la disponibilidad de recursos y la energía final deseada. El uso de biomasa es altamente contextual para la región en la que se utilice debido a la disponibilidad de recursos, tecnología y la viabilidad económica son factores que impulsan el uso de biomasa.

## **Energía Solar Fotovoltaica (SFV)**

La energía solar fotovoltaica es una tecnología que convierte la radiación solar en electricidad de corriente continua mediante el uso de semiconductores. En el momento que el sol incide en el semiconductor dentro de la célula fotovoltaica, los electrones se liberan y forman una corriente eléctrica.

La tecnología solar fotovoltaica generalmente se emplea en un panel por lo que las células fotovoltaicas se encuentran conectadas entre sí y montadas en un módulo permitiendo conectar varios módulos para formar una matriz, que se puede ampliar o reducir para producir la energía necesaria.

Las celdas fotovoltaicas pueden estar hechas de diversos materiales semiconductores (Silicio monocristalino, Silicio policristalino, Silicio amorfo, Teluro de cadmio y selenio de galio indio y cobre) donde cada tipo de material tiene diferentes atributos, lo que resulta en diferentes aplicaciones y eficiencias que pueden variar entre 10% y 46%<sup>5</sup>.

## **Pequeñas Centrales Hidráulicas (PCH)**

Las Pequeñas Centrales Hidráulicas son una alternativa a las centrales convencionales que pueden generar desde 10 kW hasta 20 MW<sup>6</sup> aplicables a zonas no interconectadas con el potencial geográfico para llevar a cabo estos proyectos de generación, teniendo en cuenta que todas ellas operan generalmente a filo de agua de forma aislada o conectada a la red.

El agua embalsada en el río es desviada por un canal de generación donde se aprovecha la energía cinética de una masa de agua mediante el movimiento de una turbina que transfiere por un eje la energía cinética a un generador eléctrico.

## **Energía Eólica**

La energía eólica toma el viento natural del entorno y convierte el movimiento del aire en energía mecánica. El viento es causado por las diferencias de presión atmosférica. La velocidad del viento varía según la topografía, temporada y geografía. Debido a esto hay algunos lugares más adecuados para la generación de energía eólica que otros. En general las velocidades del viento son más altas cerca a la costa por la menor cantidad de montañas, vegetación y edificios.

El mecanismo para convertir el movimiento del aire en electricidad son los aerogeneradores los cuales básicamente son una turbina diseñada para funcionar con aire y acoplada a un generador eléctrico magnético.

---

<sup>5</sup> <https://www.nrel.gov/pv/assets/images/efficiency-chart.png>

<sup>6</sup> <http://www.unilibre.edu.co/revistaingenioliberal/revista-12/ar9.pdf>

Una de las grandes ventajas de la generación de energía eólica es que es una energía renovable la cual no genera emisiones directas de carbono ni contaminantes al aire y no consume agua. Sin embargo, la energía eólica no es estable debido a que las velocidades del viento pueden variar durante el día y el año lo que causa problemas de intermitencia en las redes eléctricas.

Para obtener buenos rendimientos de las turbinas de viento se debe realizar un estudio previo del sitio donde se estará ubicado, en dicho estudio previo se debe medir la velocidad y dirección del viento a diferentes alturas para establecer la mejor ubicación de los aerogeneradores. Los parques eólicos deben ubicarse distante de las áreas urbanas para evitar la contaminación acústica.

### **Plantas Diésel**

Las plantas diésel son sistemas de generación eléctrica generalmente integrados por un motor de combustión interna, alternador, sistema de control y un sistema de gases de escape donde el trabajo producido por el motor es utilizado para mover un generador, el cual convierte la energía mecánica que se le ha transmitido desde el motor en energía eléctrica, a la unión de motor y generador se le denomina grupo electrógeno. Estos equipos generadores ofrecen aplicaciones estacionarias de reserva (Potencia standBy) o para funcionamiento continuo (Potencia prime), disponiendo de menor potencia en el caso de operación prime.

La mayor parte de los sistemas de generación en las zonas no interconectadas de Colombia operan con tecnología diésel. En 2001 en las ZNI se tenían ubicadas 1075 plantas de generación diésel con un total de 199,629.3 kW en el año 2001 donde más del 80% de la capacidad instalada en las ZNI son 860 plantas diésel de menos de 100 kW<sup>7</sup>.

## **2-2 ANÁLISIS DEL SISTEMA DE GENERACIÓN DE POTENCIA**

### **Motores de Combustión Interna**

Dentro de la sección se hablara sobre la clasificación de los motores, sus componentes fundamentales, la terminología básica y sus aplicaciones actuales.

Un motor es un dispositivo que transforma la energía química de un combustible a energía térmica la cual es usada para generar energía mecánica. Son llamados motores térmicos debido a la conversión de energía térmica a trabajo mecánico. Los motores térmicos generalmente se clasifican en: Motores de Combustión Externa (MCE) o

---

<sup>7</sup> Bases conceptuales para la regulación de la prestación del servicio de electricidad en las zonas no interconectadas



Motores de Combustión Interna (MCI), a su vez estos dos grupos se subdividen en más clasificaciones dependiendo de funciones específicas de los motores.

Como se mencionó anteriormente, el presente trabajo toma exclusivamente el funcionamiento de los MCI para el análisis, por este motivo se hablara exclusivamente de este tipo de motor.

En un motor de combustión interna, la combustión del combustible se produce dentro del cilindro del motor. Las principales ventajas de un MCI frente a un MCE son las siguientes:

- Simplicidad mecánica
- Menor costo inicial
- Mayor eficiencia térmica

### **Clasificación Motores de Combustión Interna**

Los motores de combustión interna se clasifican de distinta manera siguiendo los siguientes principios:

**Cuadro 3.** Clasificación de Motores de Combustión Interna.

<b>Clasificación Motores de Combustión Interna (MCI)</b>	
<b>Ciclos Termodinámicos de Maquinas Térmicas de Potencia a Gas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ciclo Otto (Volumen constante de calor suministrado)</li> <li>• Ciclo Diésel (Presión constante de calor suministrado)</li> <li>• Ciclo Dual (Presión y volumen parcialmente constante de calor suministrado)</li> <li>• Ciclo Brayton</li> </ul>
<b>Ciclo de Trabajo</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ciclo de 4T – aspiración natural</li> <li>• Ciclo de 2T – Presión de cigüeñal</li> </ul>
<b>Tipo de Combustible</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Motores de aceite liviano (kerosene o petróleo)</li> <li>• Motores de aceite pesado (diésel o aceites minerales)</li> <li>• Motores a gas (GN, GLP, Hidrogeno, etc.)</li> <li>• Motores Bi-Combustibles (uso de gas como combustible principal y combustibles líquidos al encendido del motor)</li> </ul>
<b>Método de Ignición</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ignición por chispa</li> <li>• Ignición por compresión</li> <li>• Inyección controlada de combustibles en un motor a gas</li> </ul>

<b>Método de Enfriamiento</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Enfriado con agua</li> <li>• Enfriado con aire</li> </ul>
<b>Velocidad</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Motor de baja velocidad</li> <li>• Motor de media velocidad</li> <li>• Motor de alta velocidad</li> </ul>
<b>Sistema de Lubricación</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lubricación húmeda</li> <li>• Lubricación seca</li> <li>• Lubricación por presión</li> </ul>
<b>Diseño Básico del Motor</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Motores Reciprocantes</li> <li>• Motores Rotativos</li> </ul>
<b>Numero de Cilindros</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Motor de Único-cilindro</li> <li>• Motor Multi-Cilindro</li> </ul>
<b>Diseño de Cámara</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cámara abierta</li> <li>• Cámara Dividida</li> </ul>
<b>Arreglo de Cilindros</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• En línea</li> <li>• Tipo V</li> <li>• Cilindro opuesto</li> <li>• Pistón opuesto</li> <li>• Radial</li> <li>• Tipo H</li> <li>• Tipo X</li> </ul>

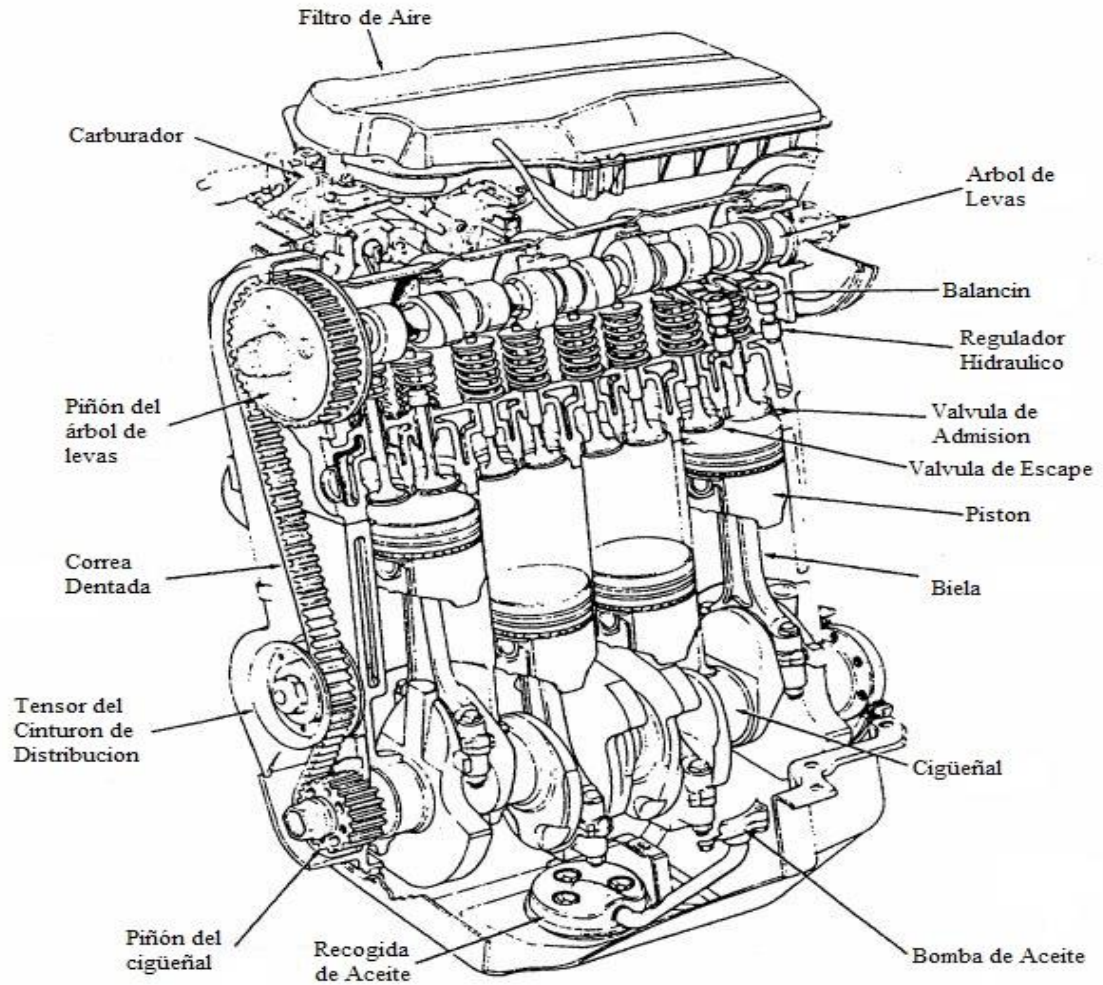
Fuente: Fundamentals of Internal Combustion Engines (Gupta, 2006)

En el proyecto se utilizó para los análisis un motor de combustión interna de tipo alternativo de 4T multi cilindros. En el capítulo de metodología del proyecto se presentara detalladamente las características del motor seleccionado para el desarrollo del trabajo.

### **Componentes del Motor de Combustión Interna**

En la Figura 2 se muestra un MCI de tipo Chrysler de 2.2 Lt, 4 cilindros, 4T y de ignición por chispa.

**Figura 2.** Componentes del Motor de Combustión Interna.

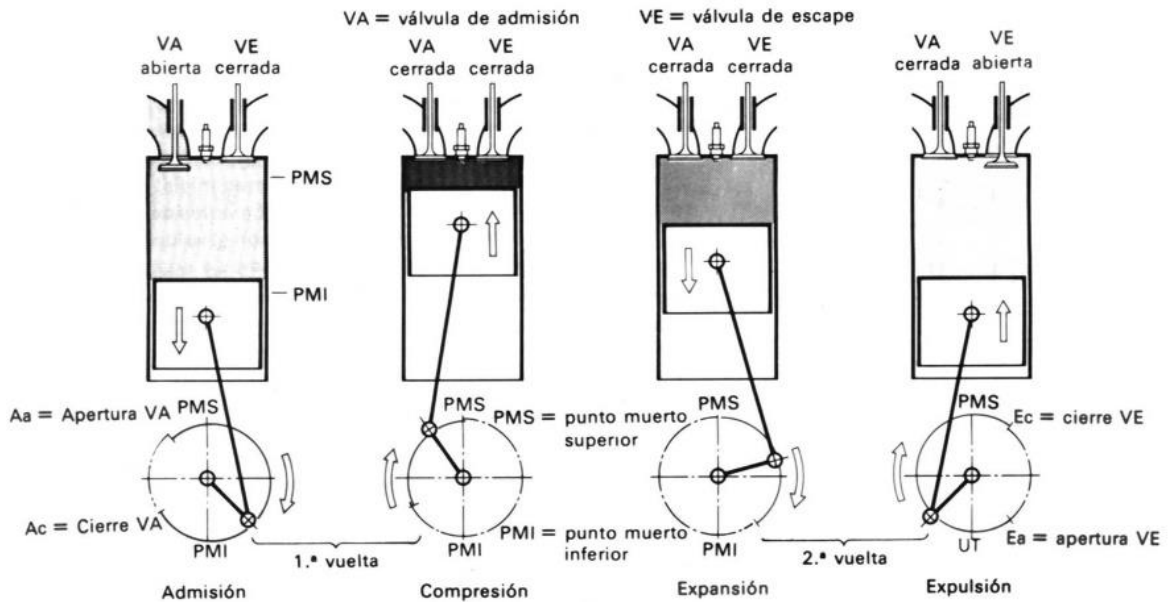


Fuente: Fundamentals of Internal Combustion Engines (Gupta, 2006)

### **Terminología Básica de Motores de Combustión Interna**

A continuación se muestra en la Figura 3 el funcionamiento cíclico del motor de combustión interna mostrando el proceso de apertura y cierre de las válvulas de admisión y escape en función al PMS y al PMI.

**Figura 3. Ciclo del Motor de Combustión Interna.**



Fuente: Termodinámica (Cengel, 2011)

La terminología básica para comprender el funcionamiento del ciclo de un motor de combustión interna se muestra a continuación (Gupta, 2006), esta terminología se aplicara en el capítulo de Desarrollo del Proyecto.

- *Diámetro Interno (d)*: Diámetro interior del cilindro del motor
- *Carrera (L)*: Distancia de recorrido del pistón de una posición superior limite como una posición límite inferior.
- *Punto Muerto Superior (PMS)*: Es el límite superior de la carrera del pistón.
- *Punto Muerto Inferior (PMI)*: Llamado así al límite inferior de la carrera del pistón.
- *Volumen de Liquidación (Vc)*: Cuando el pistón está en la posición (PMS), el volumen contenido en el cilindro por encima de la parte superior del pistón.
- *Volumen de Barrido (Vs)*: Es el volumen barrido por el pistón en su movimiento entre el PMS y el PMI.

$$V_s = \frac{\pi}{4} d^2 L \quad (1)$$

- *Volumen del Cilindro (V)*: Es el volumen total del cilindro e incluye el volumen de liquidación y el volumen de barrido.

$$V = V_s + V_c \quad (2)$$

- *Ratio de Compresión (r)*: Es el ratio del volumen de la posición PMI al volumen de la posición PMS.

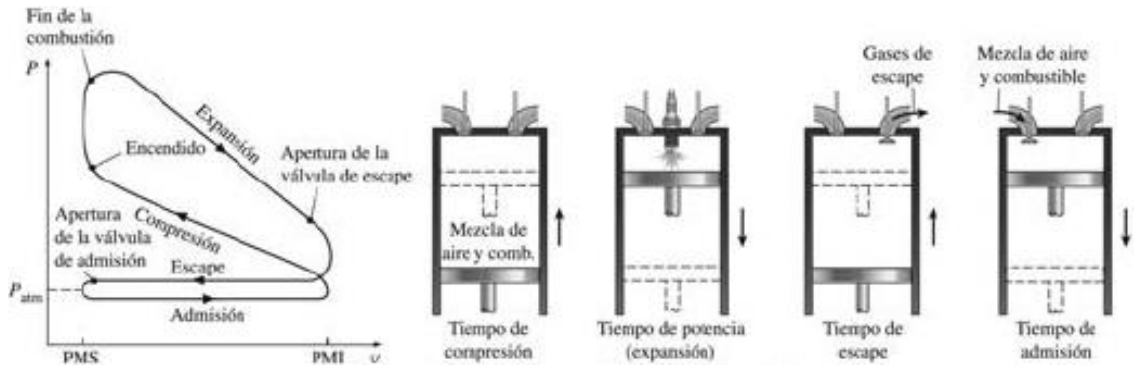
$$r = \frac{V_c + V_s}{V_c} \quad (3)$$

## 2-3 FUNDAMENTOS ANÁLISIS TERMODINÁMICO

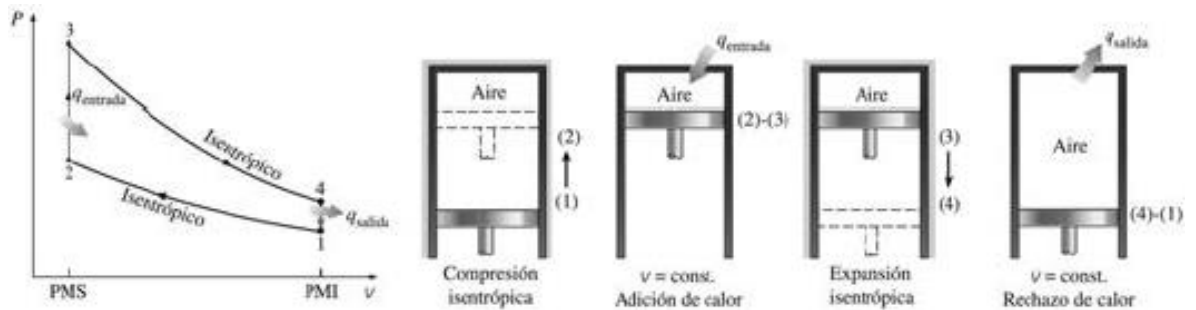
### Potencia del Ciclo

El ciclo Otto se define como un ciclo termodinámico que modela el comportamiento de las máquinas de combustión interna alternativas (MCIA) de encendido provocado (MEP) o por chispa. En la Figura 4 se muestra el Ciclo Otto ideal y real.

**Figura 4. Ciclo Otto Real.**



**Figura 5. Ciclo Otto Ideal.**



Fuente: Termodinámica (Cengel, 2011)

Como se observa en el diagrama P-v, el ciclo Otto real se compone de los siguientes procesos:

- Admisión del fluido de trabajo
- Compresión del fluido de trabajo
- Adición de calor
- Expansión del fluido de trabajo
- Rechazo de calor
- Expulsión del fluido

De los procesos mencionados anteriormente, los que componen el ciclo de trabajo o potencia son:

- Compresión del fluido
- Adición de Calor
- Expansión del fluido
- Rechazo de Calor

Estos se observan en la Figura 5 y son la base del desarrollo termodinámico del motor.

A continuación se explican brevemente en qué consisten los procesos del ciclo Otto real.

- *Admisión del fluido de trabajo:* Es la entrada de la mezcla aire-combustible e idealmente se considera una entrada desde la atmósfera por lo que no se tienen en cuenta pérdidas, es por este motivo que la presión durante este proceso es constante e igual a la atmosférica. El pistón baja con la válvula de admisión abierta, esto aumenta la cantidad de mezcla aire-combustible en la cámara
- *Compresión del fluido de trabajo:* El pistón sube comprimiendo la mezcla. Este proceso ocurre rápidamente por lo que el fluido de trabajo no intercambia calor con el medio, debido a esto el proceso se considera adiabático, esta suposición es muy acertada a lo que realmente sucede en un motor de combustión interna.
- *Adición de Calor:* Este es el proceso de combustión, el volumen se considera constante durante el proceso debido a que al producirse la chispa, la combustión se realiza instantáneamente. El calor generado calienta bruscamente el aire, incrementa su temperatura a un volumen prácticamente constante como se mencionó anteriormente.
- *Expansión del fluido de trabajo:* En este proceso los gases a alta presión y temperatura se expanden y producen trabajo. Este proceso sucede rápidamente

por lo que los gases no alcanzan a intercambiar calor con el medio, por lo que este proceso se considera adiabático.

- *Rechazo de Calor:* La apertura de la válvula de escape es instantánea produciendo una salida inmediata de los gases y una pérdida de calor igualmente instantánea a un volumen constante.
- *Expulsión del fluido:* En este proceso los gases remanente en el cilindro son empujados hacia la atmosfera. Se considera que no existe resistencia a esta salida debido a que la presión es constante e igual a la atmosférica. En la realidad existe una pérdida de carga.

El análisis termodinámico de los ciclos reales de dos y cuatro tiempos no es una tarea simple. Sin embargo se pueden hacer suposiciones en base a su ciclo de potencia.

- Compresión isentrópica
- Adición de calor a volumen constante
- Expansión isentrópica
- Rechazo de calor a volumen constante

El balance de energía para cualquier proceso del ciclo Otto se expresa, por unidad de masa de la siguiente manera

$$(q_{entrada} - q_{salida}) + (w_{entrada} - w_{salida}) = \Delta u \quad [kJ / kg] \quad (4)$$

La transferencia de calor en los procesos de adición y rechazo de calor se pueden expresar de la siguiente manera

$$\text{Entrada de calor a volumen constante} \quad Q_{en} = C_v(T_3 - T_2) \quad [kJ]$$

$$\text{Salida de calor a volumen constante} \quad Q_{sal} = C_v(T_4 - T_1) \quad [kJ]$$

La eficiencia térmica del ciclo Otto se puede expresar de la siguiente manera

$$\eta_{Otto} = \frac{w_{neto}}{q_{en}} = \frac{Q_{en} - Q_{sal}}{Q_{en}} = 1 - \frac{(T_4 - T_1)}{(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1 \left( \frac{T_4}{T_1} - 1 \right)}{T_2 \left( \frac{T_3}{T_2} - 1 \right)}$$

Para los procesos de compresión y expansión son isentrópicos. Por lo tanto se obtienen las siguientes expresiones

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{k-1}$$

$$\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{V_4}{V_3}\right)^{k-1}$$

También se tiene en cuenta que la adición y rechazo de calor se producen a volumen constante, por lo tanto

$$V_1 = V_4 \text{ y } V_2 = V_3$$

Finalmente se obtiene que

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_4} \text{ y } \frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3}{T_2}$$

Sustituyendo estas relaciones de temperaturas en la relación de eficiencia térmica del ciclo y simplificando se obtiene

$$\eta_{Otto} = 1 - \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{k-1} \quad (5)$$

Donde  $\frac{V_1}{V_2} = r$  la cual es la relación de compresión. Finalmente la eficiencia térmica del ciclo Otto se puede expresar de la siguiente manera

$$\eta_{Otto} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}} \quad (6)$$

Donde  $k = \frac{c_p}{c_v}$  es la relación de calores específicos.

La potencia entregada por un motor de combustión interna en ciclo Otto sigue las características propias del motor como son los ciclos por segundo, el número de cilindros, las revoluciones por minuto y los volúmenes característicos del mismo. A continuación se muestra la manera para analizar la potencia del motor siguiendo estas características.

$$\dot{W} = W_{ciclo,cilindro} \frac{Ciclos}{s} N_{cilindros} [kW] \quad (7)$$

Donde,

$$W_{ciclo,cilindro} = m_{ciclo} [C_v(T_3 - T_2) - C_v(T_4 - T_1)] \left[ \frac{kJ}{ciclo} \right] \quad (8)$$

$$\frac{Ciclos}{s} = \frac{RPM}{120} \quad (9)$$



$$m_{ciclo} = m_{admisión} + m_{remanente} = \frac{P_1(V_{remanente} + V_{desplazado})}{RT_1} \quad (10)$$

$$= \frac{P_1(cV_{desplazado} + V_{desplazado})}{RT_1}$$

$$c = \frac{V_{muerto}}{V_{desplazado}} \qquad m_{admisión} = \frac{P_1V_{desplazado}}{RT_1}$$

Finalmente se obtiene que la masa por ciclo se puede expresar de la siguiente manera

$$m_{ciclo} = \frac{P_1V_{desplazado}(c + 1)}{RT_1} \quad (11)$$

En el Cuadro 4 se observan las características más sobresalientes respecto a los motores Otto.

**Cuadro 4.** Características del Motor Otto.

<b>Características de los Motores Otto</b>	
<b>Alimentación</b>	Mezcla aire combustible, encendida por una chispa al llevar la mezcla a su temperatura de ignición. La combustión es suave y progresiva.
<b>Compresión</b>	Está limitada por la temperatura de ignición del combustible, llega hasta una relación de compresión de 10:1.
<b>Combustible</b>	Ligero y altamente volátil, para obtener una buena mezcla con el aire.
<b>Emisiones</b>	NOx, VOC's, HC's, CO
<b>Mezcla de aire combustible</b>	Cercana a la estequiometria (mezcla rica)
<b>Regulación de Potencia</b>	Se realiza admitiendo más o menos mezcla.

Fuente: Autores del proyecto.

### **Análisis de Combustión**

La combustión es la combinación rápida del oxígeno con los elementos inflamables del combustible. En la mayoría de los combustibles se encuentran tres componentes significativos  $C$ ,  $H_2$  y  $S$ . El objetivo principal de la combustión es la liberación completa de la energía interna del combustible, mientras se eliminan pérdidas derivadas de la imperfección de la combustión y del exceso de aire.

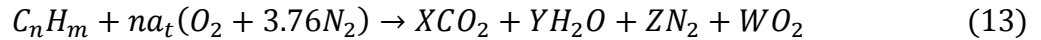
La combustión requiere de tres requisitos:

- Temperatura alta para la ignición de los elementos inflamables
- Turbulencia que facilite el intimo contacto entre el combustible y el oxigeno
- Tiempo para completar el proceso.

Cualquier proceso de *combustión teórica* se rige mediante la siguiente expresión



El proceso de combustión real varía de acuerdo a la cantidad de aire en exceso de la cantidad estequiometria, a esta cantidad de aire se le llama *exceso de aire*. A continuación se muestra el proceso de combustión con exceso de aire



Una cantidad utilizada frecuentemente en el análisis de procesos de combustión para mostrar las cantidades de combustible y aire es la relación aire-combustible. Esta relación representa la cantidad de aire utilizada por unidad de masa de combustible durante un proceso de combustión. (Cengel, 2011)

$$\left(\frac{A}{C}\right) = \frac{m_{aire}}{m_{comb}} = \frac{N_{aire}}{N_{comb}} \quad (14)$$

Esta relación se puede expresar en base másica como se representa anteriormente o en base molar, mediante la relación de masa y numero de moles  $m = NM$  donde  $M$  es el peso molecular de la sustancia.

### **Poder Calorífico y Sistemas Reactivos**

El poder calorífico del combustible se define como la cantidad de calor liberado cuando un combustible se quema por completo en un proceso. La importancia de entender este término radica en conocer la energía que contiene el gas de síntesis obtenido del proceso de gasificación y mediante esto compararlo con otros combustibles gaseosos como son el gas natural.

Es igualmente importante mencionar que la transferencia de calor durante un proceso de combustión debe ser igual a la diferencia entre la entalpia de los productos y la entalpia de los reactivos.

$$Q = H_{prod} - H_{react} \quad (15)$$

Para hallar el Poder Calorífico Inferior *PCI* de un combustible se suele igualar a la entalpia de combustión  $h_c$  que representa la cantidad de energía liberada cuando un combustible se quema durante un proceso de flujo estacionario a un estado especificado. Esto se expresa así,

$$PCI = h_c = H_{prod} - H_{react} \quad (16)$$

La entalpia de un componente químico a un estado especificado es la suma de la entalpia del componente a 25°C, 1 atm ( $h_f^\circ$ ), y la entalpia sensible del componente relativo a 25 °C y 1 atm. (Cengel, 2011) Esto se expresa de la siguiente manera

$$H = \bar{h}_f^\circ + (\bar{h} - \bar{h}^\circ) \quad (17)$$

En este sentido se pueden expresar las entalpias de los productos y reactivos de la siguiente manera,

$$H_{prod} = \sum N_p (\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ)_p \left[ \frac{kJ}{kmol} \right] \quad (18)$$

$$H_{react} = \sum N_r (\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ)_R \left[ \frac{kJ}{kmol} \right] \quad (19)$$

Finalmente, el *Poder Calorífico Inferior* se expresa

$$PCI = \sum N_p (\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ)_p - \sum N_r (\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ)_R \left[ \frac{kJ}{kmol} \right] \quad (20)$$

### Compresor, Almacenamiento Térmico y Electroquímico

En la siguiente sección se hablara acerca los fundamentos teóricos de los dos métodos de almacenamiento que consideramos en el estudio. Se tocaran temas como compresores, tanques de almacenamiento de gas, y sistemas de bancos de baterías.

#### Compresores

Los compresores son dispositivos que se utilizan para incrementar la presión de un fluido. (Cengel, 2011)Un ventilador es útil para movilizar un gas, no aumenta significativamente la presión del mismo, el compresor por el contrario es capaz de comprimir el gas a presiones muy elevadas. Es por esta razón que la presión de compresión es el factor más determinante al momento de escoger un compresor. En el Cuadro 5 se muestra la principal clasificación de los compresores

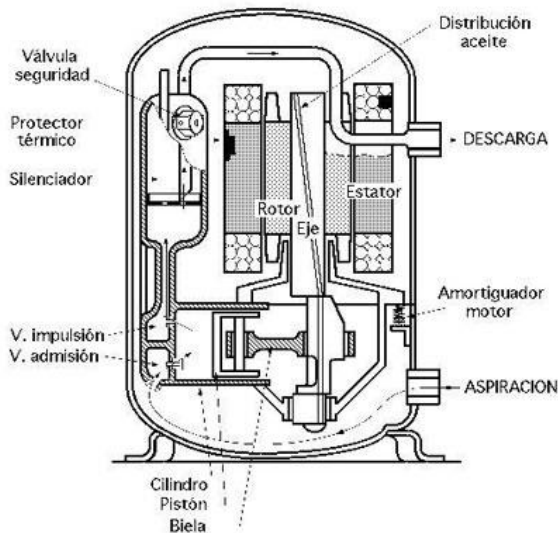
**Cuadro 5.** Clasificación de los Compresores.

<b>Principal Clasificación de los Compresores</b>	
Compresores de Desplazamiento Positivo (Se basa en la disminución del volumen del fluido)	Compresor de Pistón
	Compresor de Tornillo
	Compresor de Paletas
	Compresor de Lóbulos
	Compresores Scroll
	Bombas de Vacío
Compresores Dinámicos	Compresores Centrífugos Radiales

(Se basa en la aceleración molecular del fluido)	Compresores Centrífugos Axiales
--	------------------------------------

Fuente: Autores del proyecto.

**Figura 6.** Componentes del Compresor.



Fuente: Tecnología de los diferentes tipos de compresores y sus funcionalidades (Gurrea, 2014)

La transferencia de calor, cambios en energía potencial y cinética son insignificantes en los compresores, a menos que haya un enfriamiento intencional en el caso de transferencia de calor.

El análisis termodinámico de un compresor se puede expresar de la siguiente manera

$$\dot{E}_{en} - \dot{E}_{sal} = 0 \quad (21)$$

Esto se debe a que no existe cambios de energías interna, cinética y potencial.

$$\dot{W}_{en} + \dot{m}h_1 = \dot{Q}_{en} + \dot{m}h_2 \quad (22)$$

### Tanque de Almacenamiento (Almacenamiento Térmico)

Los tanques de almacenamiento de gas son equipos construidos para soportar altas presiones y de esta manera poder almacenar fluidos gaseosos. Su dimensionamiento se basa en el volumen total del tanque, el cual se relaciona con la presión de entrada del gas a almacenar, la cual será la misma del interior del tanque. El grosor de las paredes del tanque debe soportar la presión interna de los gases sin deformarse o sufrir algún daño estructural.

Los tanques se rigen principal y fundamentalmente de la ley de presiones aditivas de Dalton, la cual establece que la presión de una mezcla de gases es igual a la suma de las presiones de cada gas a la temperatura y volumen de la mezcla. Esta ley se muestra a continuación

$$P_m = \sum P_i(T_m, V_m) \quad (23)$$

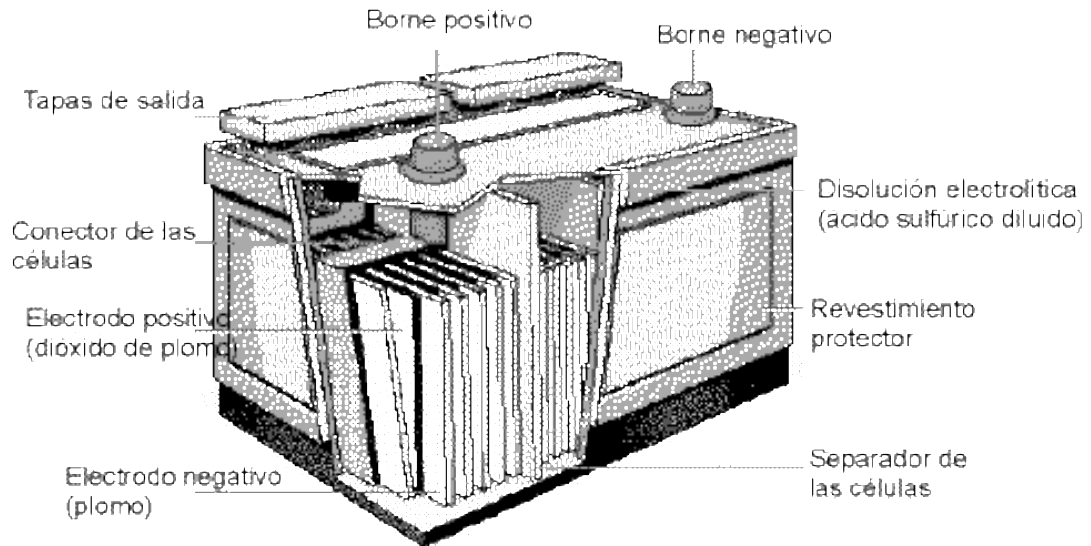
**Figura 7.** Diagrama Tanque de Almacenamiento de Gas.



Fuente: Chemical Process Equipment (Couper, 1988)

## Banco de Baterías (Almacenamiento Electroquímico)

Figura 8. Diagrama Batería Electroquímica



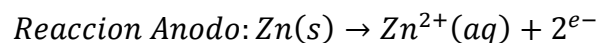
Fuente: Chemical Process Equipment (Couper, 1988)

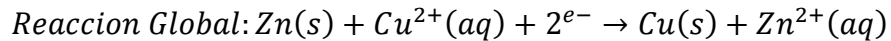
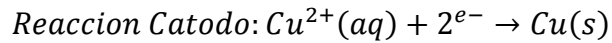
La batería es un dispositivo que almacena energía en forma electroquímica, es altamente usada en distintas aplicaciones debido a su confiabilidad y fácil manejo. Existen dos tipos de baterías:

- *Batería Primaria:* Su reacción electroquímica es irreversible, esto quiere decir que después de su ciclo de descargado, la batería no puede volver a cargarse. Estas son las comúnmente usadas en aparatos electrónicos básicos como controles, radios etc.
- *Batería Secundaria:* Su reacción electroquímica es reversible, al cumplir su ciclo de descarga, la batería puede ser cargada nuevamente. Su eficiencia entre un ciclo de carga y descarga esta entre 70% y 80%.

El funcionamiento básico de una batería se basa directamente en una celda electroquímica. Estas celdas electroquímicas tienen dos electrodos, un ánodo y un cátodo.

El cátodo es el electrodo donde se efectúa la reducción, y el ánodo es el electrodo donde se lleva a cabo la oxidación. Las expresiones a continuación muestran las reacciones que se llevan a cabo en el ánodo y cátodo, además de su reacción global.





Para la investigación, el funcionamiento interno de una batería no es trascendental, sin embargo tocaremos tres características base que son necesarias para el desarrollo del proyecto.

- Cantidad de energía que puede almacenar una batería: Es el valor en Wh que puede calcularse mediante el producto del voltaje nominal y el valor de Ah.
- Máxima corriente en descarga: se muestra como un número fraccionario. Por ejemplo, una batería de 200[Ah], una relación tipo C/20=10A quiere decir que puede entregar una corriente de 10A por 20 horas.
- Profundidad de descarga: representa la cantidad de energía que puede extraerse de una batería, se da en forma porcentual. Normalmente varía entre 60% y 90% siendo esta última las baterías más eficientes.

## 2-4 FUNDAMENTOS ANÁLISIS EXERGÉTICO

El análisis exergético permite conocer el potencial de trabajo útil de una fuente o la verdadera energía disponible, sin tener en cuenta la energía de desecho. La exergía es una herramienta importante en la determinación de la calidad de la energía y en la comparación de los potenciales de trabajo de diferentes fuentes de energía o sistema. La exergía es la función termodinámica de estado que hace posible formular la equivalencia entre diferentes flujos de energía o masa de un sistema. Mediante un análisis exergético se es posible localizar y cuantificar irreversibilidades en un proceso. (Kotas, 1985)

Estas irreversibilidades pueden verse como el potencial de trabajo desperdiciado o la oportunidad perdida para realizar trabajo. De igual manera, estas irreversibilidades representan la energía útil perdida o destruida en todo proceso físico y es usada para señalar las ineficiencias reales de un proceso industrial. A menor irreversibilidad asociada a un proceso, mayor es el trabajo que se produce. A mayor irreversibilidad en un proceso, más recursos son consumidos. El balance de exergía contabiliza la degradación de la exergía. Siempre la exergía de entrada es mayor a la de salida. (Cengel, 2011)

### Balance de Exergía

$$\text{Exergía de entrada} - \text{Exergía de salida} = \text{Irreversibilidades} > 0$$

El costo exergético de una corriente de masa o energía es la cantidad de exergía requerida para producirla. Generalmente el costo exergético de la potencia neta producida es la exergía suministrada por combustible usado para generar esa potencia.

### Exergía de un sistema cerrado (sin flujo)

*Exergía de Flujo:*

$$X = (U - U_0) + P_0(V - V_0) - T_0(S - S_0) \quad (24)$$

*Cambio de Exergía:*

$$\Delta X = X_2 - X_1 = (U_2 - U_1) + P_0(V_2 - V_1) - T_0(S_2 - S_1) \quad (25)$$

### Exergía de flujo (o corriente)

*Exergía de flujo:*

$$X = (H - H_0) - T_0(S - S_0) \quad (26)$$

*Cambio de Exergía:*

$$\Delta X = X_2 - X_1 = (H_2 - H_1) - T_0(S_2 - S_1) \quad (27)$$

El balance de exergía para cualquier sistema que experimenta cualquier proceso se expresa de la siguiente manera

$$\underbrace{\frac{X_{ent} - X_{sal}}{\text{Transferencia neta de exergía por calor, trabajo y masa}}}_{\text{Transferencia neta de exergía por calor, trabajo y masa}} - \underbrace{\frac{X_{destruida}}{\text{Destrucción de exergía}}}_{\text{Destrucción de exergía}} = \underbrace{\frac{\Delta X_{sistema}}{\text{Cambio en exergía}}}_{\text{Cambio en exergía}} \quad (28)$$

Donde la exergía destruida se evalúa directamente con la expresión 29 y la transferencia de exergía por calor se define en la expresión 30.

$$X_{destruida} = T_0 S_{gen} \quad (29)$$

$$X_{calor} = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) Q \quad (30)$$

También es posible el análisis exergético mediante la composición de la exergía térmica. La exergía térmica se compone de dos partes: una exergía física y otra exergía química, ambas son propias del compuesto. La exergía química es el máximo trabajo que se obtiene de una sustancia que se encuentra a la presión y temperatura del entorno y alcanza un estado de equilibrio termodinámico por medio de reacciones químicas, un ejemplo sería el proceso de combustión. Por el otro lado, la exergía física es el trabajo que se puede obtener sometiendo una sustancia a procesos físicos reversibles a una temperatura y presión iniciales. (Kotas, 1985)

$$\text{Exergía Física } \psi_{física} = C_p(T - T_0) - T_0 C_p \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) \quad (31)$$



$$\text{Exergía Química } \psi_{química} = \sum y_i \psi_{qi}^{\circ} + R_u T_0 \sum y_i \ln(y_i) \quad (32)$$

## 2-5 FUNDAMENTOS ANÁLISIS TERMOECONÓMICO

La termoeconomía es la ciencia de ahorro de recursos que conecta estudios termodinámicos y físicos con estudios de economía mediante la segunda ley de la termodinámica. Una planta de generación o producción son ejemplos de sistemas energéticos formados por una serie de procesos. Estos procesos interactúan con el medio, consumiendo recursos externos, los cuales posteriormente son transformados en productos. El propósito de estas transformaciones es aumentar la utilidad económica.

Estos procesos de producción pueden ser estudiados en términos de su rentabilidad económica y eficiencia con respecto al consumo de recursos. La termoeconomía asesora en la mejoría de los costos de los recursos consumidos, del dinero y las irreversibilidades en términos del proceso de producción global.

**Cuadro 6.** Diferencia Análisis Económico y Termodinámico

<b>Análisis Termoeconómico</b>	
<b>Análisis Económico</b>	<b>Análisis Termodinámico</b>
Calcula costos de combustible, recursos, de la inversión, operación y mantenimiento para la planta en general o para componentes individuales del sistema energético.	Permite determinar la eficiencia de los procesos de la planta, localizar y cuantificar irreversibilidades. Sin embargo no permite evaluar la importancia de las mismas en términos del proceso de producción global.

Fuente: Autores del proyecto

Teniendo esto en mente, el análisis termo económico combina estos dos análisis aplicando el concepto de costo a la exergía. La exergía es la propiedad termodinámica adecuada para este tipo de análisis, ya que toma en cuenta la calidad de la energía.

Algunas aplicaciones de la termoeconomía son las siguientes:

- Procesos de auditorías energéticas
- Evaluación de alternativas de diseño o decisiones de operación y maximización de rentabilidad
- Detección de ineficiencias y cálculo de sus efectos económicos en la operación de la planta
- Mejora de precios de productos de una planta, basándose en criterios físicos.

Para entender mejor el análisis termoeconómico, es importante hablar del costo exergético, el cual se puede expresar como la cantidad de exergía requerida para producir una corriente de masa o energía. En el caso de estudio de la investigación, el costo exergético de la potencia neta producida por el motor es la exergía suministrada por el gas de síntesis para generar esa potencia eléctrica.

### Costo Exergético

El costo exergoeconómico define la cantidad de dinero para generar una corriente de masa o energía, este costo se puede escribir como:

$$\dot{C}_P = c_F \dot{E}_F + \dot{Z} \text{ [$/s]} \quad (33)$$

Donde  $c_F$  es el costo económico del combustible [\$/MJ],  $\dot{E}_F$  es el flujo exergetico del combustible [MJ/s] y  $\dot{Z}$  es el costo de la instalación y operación de la planta [\$/s]

Similarmente existe el costo exergoeconómico unitario de un flujo de masa o energía el cual mide la cantidad de unidades monetarias por cada unidad de exergía requerida para obtener este flujo de producto de masa o energía. Este costo exergoeconómico unitario se expresa:

$$c_P = \frac{c_F \dot{E}_F + \dot{Z}}{\dot{E}_P} \text{ [$/MJ]} \quad (34)$$

Donde  $\dot{E}_P$  es el flujo exergetico de los productos [MJ/s]

También existen otro tipo de costos dentro del análisis termoeconómico, el costo de oportunidad por ejemplo es la máxima tasa de retorno que se podría obtener por cada unidad extra disponible de un recurso. También se encuentra el costo de descuento que es la cantidad de recursos requeridos para eliminar una salida indeseada, subproductos, residuo o desecho.

### Contabilidad de Costos Exergéticos

La contabilidad de costos es el procedimiento de determinar y estimar los costos totales de producción por unidad de salida de producto en un sistema térmico. De esta manera, para cada producto hay costos directos que están asociados a los recursos y materiales; y costos indirectos.

Mediante la aplicación de la contabilidad de costos es posible:

- Determinar el costo real de los productos
- Proveer medios para controlar costos
- Formar una base para toma de decisiones de operación

Es igualmente valioso contabilizar los costos de productos internos de una planta, no solo los costos de productos finales. Mediante la comparación de estos costos con costos

estándares ya definidos, es posible controlar y evitar el uso excesivo de recurso, este es propósito principal de un análisis termoeconómico.

El balance de costos para cada componente del sistema se puede formular de la siguiente manera:

$$\sum c_i \dot{E}_i + \dot{Z} = \sum c_j \dot{E}_j \quad (35)$$

Donde  $c_i$  y  $c_j$  representa el costo unitario del flujo [\$/MJ],  $\dot{E}_i$  y  $\dot{E}_j$  representa la exergia de flujos [MJ/s] y  $\dot{Z}$  flujo de costo de cada equipo a analizar [\$/s]

Existen tres métodos para asignar costos de cada producto los cuales requieren un criterio respecto del propósito de cada unidad de la planta y distribuir los costos proporcionalmente al contenido exergético de los flujos.

Las metodologías de la contabilidad de costos se basan en reglas de asignación de costos, las cuales atribuyen a cada producto útil de cada componente del sistema, el sacrificio de los recursos requeridos para obtenerlo y distribuye sus costos proporcionalmente a sus exergías.

- *Método de Igualdad:*

Considera que la generación de dos o más productos (Ej. Potencia eléctrica, vapor, etc.) Tienen la misma prioridad, así, el costo es cargado a las salidas proporcionalmente a sus exergías.

$$C_{\text{producto 1}} = C_{\text{producto 2}}$$

- *Método de Extracción:*

Considera el propósito del equipo (Ej. Turbinas, motores, compresores, intercambiadores de calor, etc.) De manera que el costo del equipo y sus irreversibilidades se cargan al costo del producto (Ej. Potencia eléctrica) de dicha unidad. Esto resulta en que el costo del flujo de exergia de entrada al equipo será el mismo del flujo remanente (Ej. Vapor a baja presión, gases de combustión, etc.) Que sale del equipo.

$$C_{\text{flujo de entrada}} = C_{\text{salida de remanente}}$$

- *Método de Subproducto:*

Asume que el costo de uno de los productos se conoce. Entonces se puede asumir que la generación del flujo remanente (Ej. Vapor a baja presión) es esencial aun si no se genera un producto (Ej. Potencia eléctrica.). Por lo tanto, la exergia del remanente de

proceso se costea como si fuera producido de un equipo aparte (Ej. Caldera de baja presión).

Esto permite obtener el costo del producto por medio del balance de costos. Si el costo del producto resulta competitivo, entonces se decide por la cogeneración. Un procedimiento equivalente puede hacerse asumiendo el costo del producto para determinar el costo del remanente.

El criterio racional al momento de definir la eficiencia para cada componente de la planta es clave para la aplicación de estos procedimientos, es decir, definir cuál corriente es un combustible, cual sería alimentación de materia, cual corriente son productos y cuales se consideran de “combustible no gastado”.

Esto es importante al saber que criterio de asignación de costos es el más adecuado para cada escenario.

También es importante decidir que corriente podría ser analizada como un residuo, desperdicio o subproducto. Esto permite asignar ciertos costos a cero.

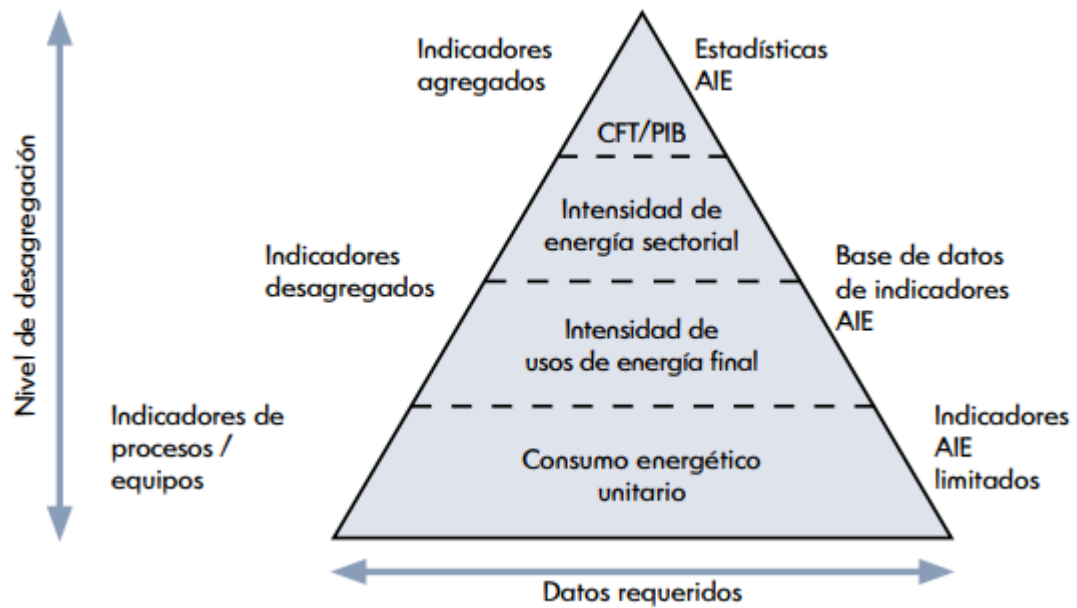
## **2-6 INDICADORES DE EFICIENCIA ENERGÉTICA**

Los indicadores energéticos son una herramienta importante para analizar interacciones entre la actividad económica y humana, el consumo de energía y las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). (IEA, 2017)

La Agencia Internacional de Energía (AIE) es una organización internacional que busca garantizar la energía asequible, confiable y limpia para los 29 países miembros. Se basa en cuatro áreas: seguridad energética, desarrollo económico, conciencia ambiental y compromiso con el mundo. (IEA, 2017)

En este sentido, la AIE desarrollo un método de implementación de indicadores energéticos, basándose en la jerarquía de los mismos, desde los más detallados hasta los menos detallados.

Figura 9. Jerarquía Indicadores Energéticos



Fuente: International Energy Agency (IEA, 2017)

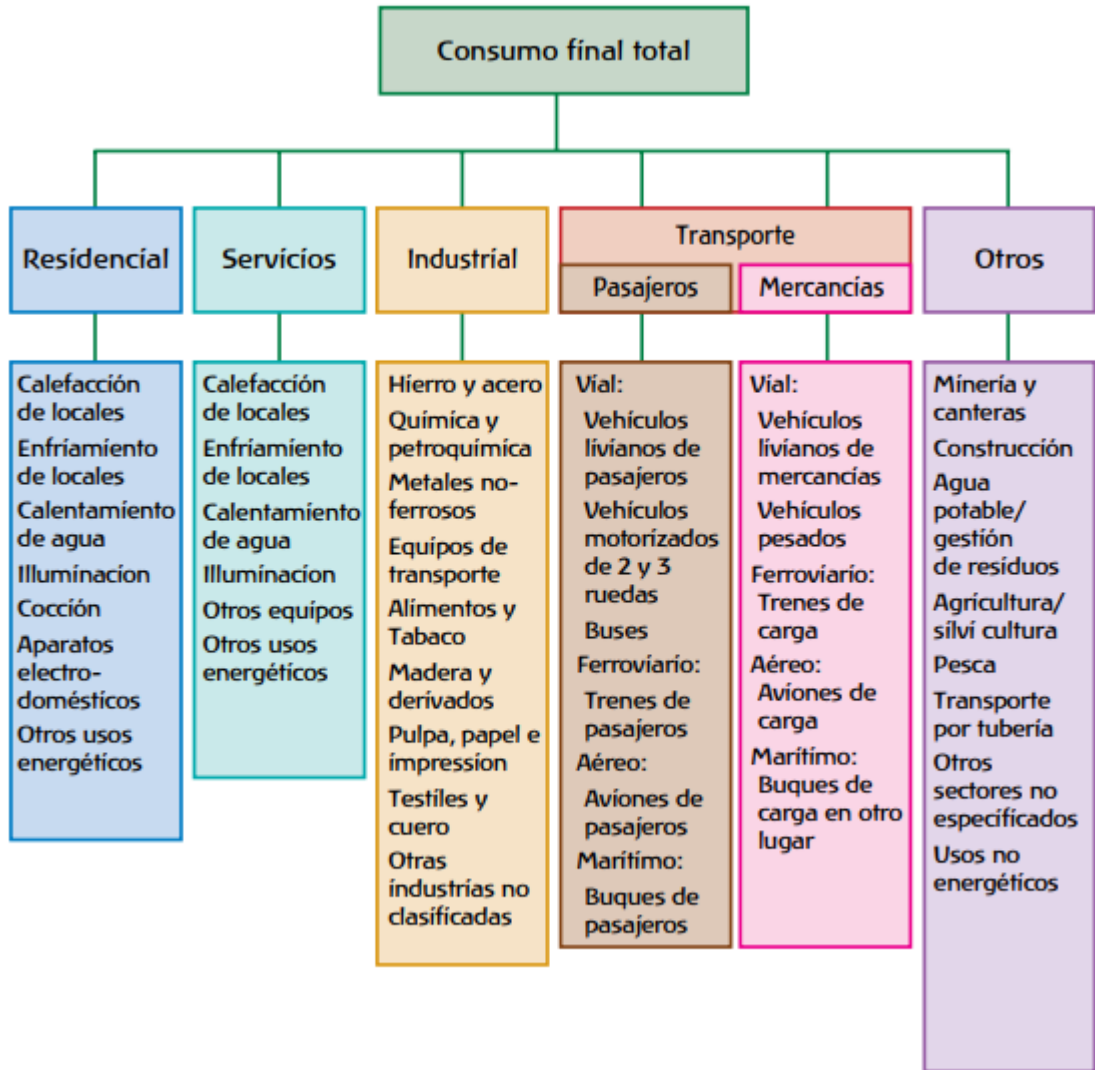
*Indicadores Agregados:* definida como la relación del consumo energético y el PIB. Básicamente es la relación del consumo de energía y otra variable macroeconómica.

*Indicadores Desagregados:* Intensidad energética de cada gran sector, se mide en base al consumo energético por unidad de actividad en cada sector.

*Indicadores de procesos/equipos:* representan sub-sectores o usos finales que conforman cada sector y aportan progresivamente más detalle a la caracterización de los servicios energéticos particulares, procesos físicos etc.

A medida que se desciende de la pirámide se van requiriendo datos y análisis más complejos y detallados, de procesos específicos. Estos resultados luego serán agregados hasta el nivel más alto y así generar indicadores mucho más globales. En la Figura 10 se observan los consumos finales para cada sector de análisis energético.

Figura 10. Clasificación Indicadores Energéticos en base a Consumo Final Total



Fuente: International Energy Agency (IEA, 2017)

### Indicadores Exergéticos

Los indicadores exergéticos muestran varios aspectos del desempeño termodinámico de un sistema, se usan para tener un mejor entendimiento de las irreversibilidades y pérdidas exergéticas de un sistema. A continuación se muestran algunos de los indicadores exergéticos más usados, tomados de (Filippos K. Zisopoulos Msc, 2015)

- *Eficiencia Exergética (Exergetic Efficiency)*

$$\eta_{exer} = \frac{\sum X_{sal}}{\sum X_{en}} \quad (36)$$

- *Perdidas Exergéticas (Exergy Losses)*

$$\sum X_{perdida} = \sum X_{*destruida} + \sum X_{desperdiciada} \quad (37)$$

- *Potencial de Mejoramiento (Improvement Potential)*

$$PM = (1 - \eta_{exer}) \sum X_{perdida} \quad (38)$$

- *Ratio Exergía Destrucción (Exergy Destruction Ratio)*

$$D_p = \frac{\sum X_{destruida}}{\sum X_{en}} = 1 - \eta_{exer} \quad (39)$$

- *Índice de Sostenibilidad (Sustainability Index)*

$$IS = \frac{1}{D_p} \quad (40)$$

- *Consumo Exergético Acumulativo (Cumulative Exergy Consumption)*

$$CEA = \sum X_{en} \quad (41)$$

- *Perdidas Exergéticas Acumulativas (Cumulative Exergy Losses)*

$$PEA = CEA - \sum X_{util} \quad (42)$$

- *Factor Exergético (Exergetic Factor)*

$$f_{exer} = \frac{X_{comb}}{\sum X_{comb\ en}} \quad (43)$$

### CAPITULO 3 DESARROLLO DEL PROYECTO

El objetivo principal del proyecto se basa en la evaluación y análisis de dos configuraciones de generación de potencia con motor de combustión interna a base de gas de síntesis. Las dos configuraciones son parecidas entre sí en cuanto a la generación a base del motor de combustión interna para suplir la misma demanda de la localidad estudiada y varían en ciertos puntos clave.

#### *Primera Configuración:*

La primera configuración consta del motor de combustión interna, el generador, un compresor y un tanque de almacenamiento. El propósito del tanque de almacenamiento de gas es poder acumular el gas de síntesis sobrante dependiendo de la curva de consumo de la localidad. La carga del motor depende de este consumo además del consumo del compresor debido a que será alimentado con parte de la potencia proporcionada por el motor. Más adelante en el desarrollo del capítulo se comentara el análisis respectivo a esta configuración.

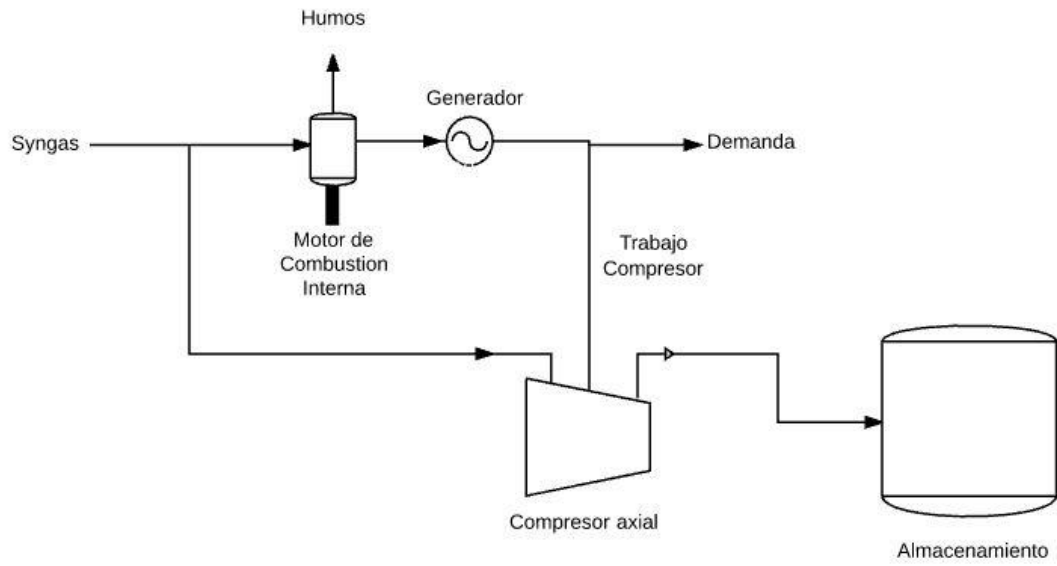
#### *Segunda Configuración:*

La segunda configuración consta del motor de combustión interna, el generador y un banco de baterías. Esta configuración es mucho más sencilla debido a que el motor de combustión interna trabajará a plena carga durante las horas de consumo de la localidad. Al igual que la configuración anterior, habrá un excedente de energía, en este caso eléctrica, la cual se debe almacenar en un banco de baterías para su posterior uso.

Las dos configuraciones se evalúan termodinámicamente y exergéticamente para generar resultados y poder evaluar el desempeño de las mismas, de acuerdo a los objetivos planteados en el proyecto. A continuación se muestra un esquema de las dos configuraciones.

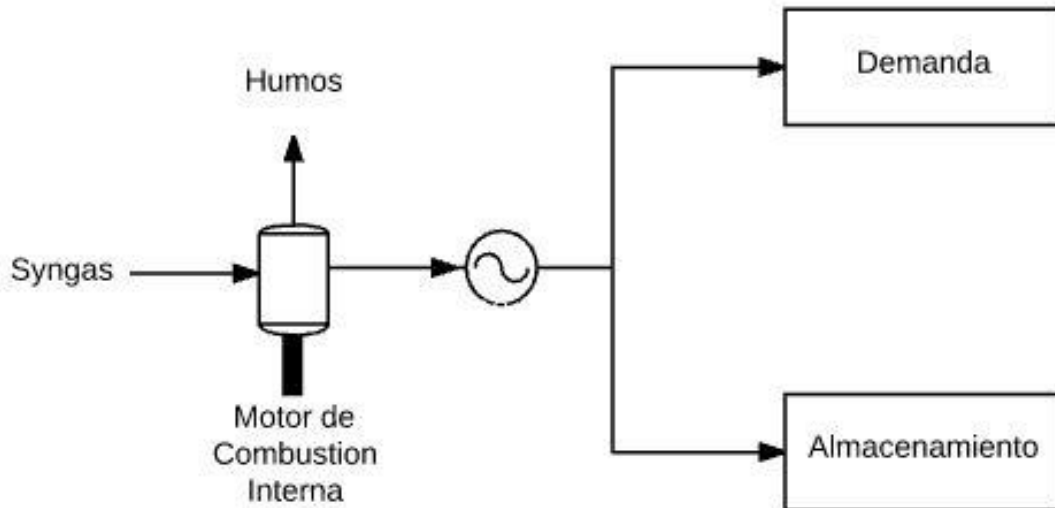


**Figura 11.** Primera Configuración Sistema de Generación



Fuente: Autores del Proyecto

**Figura 12.** Segunda Configuración Sistema de Generación



Fuente: Autores del Proyecto

### 3-1 PARÁMETROS INICIALES DEL SISTEMA

Se inició con la recolección de los datos de consumo de la zona del caso de estudio. Estos datos se obtuvieron de una memoria de diseño la cual fue proporcionada por el IPSE<sup>8</sup>. De este mismo documento se obtuvieron datos acerca del gasificador, la biomasa, y los flujos de gas que proporciona el gasificador mencionado anteriormente. El consumo diario de la localidad se observa en la Tabla 4 a continuación. (IPSE, 2016)

**Tabla 4.** Demanda Total Diaria Caso de Estudio

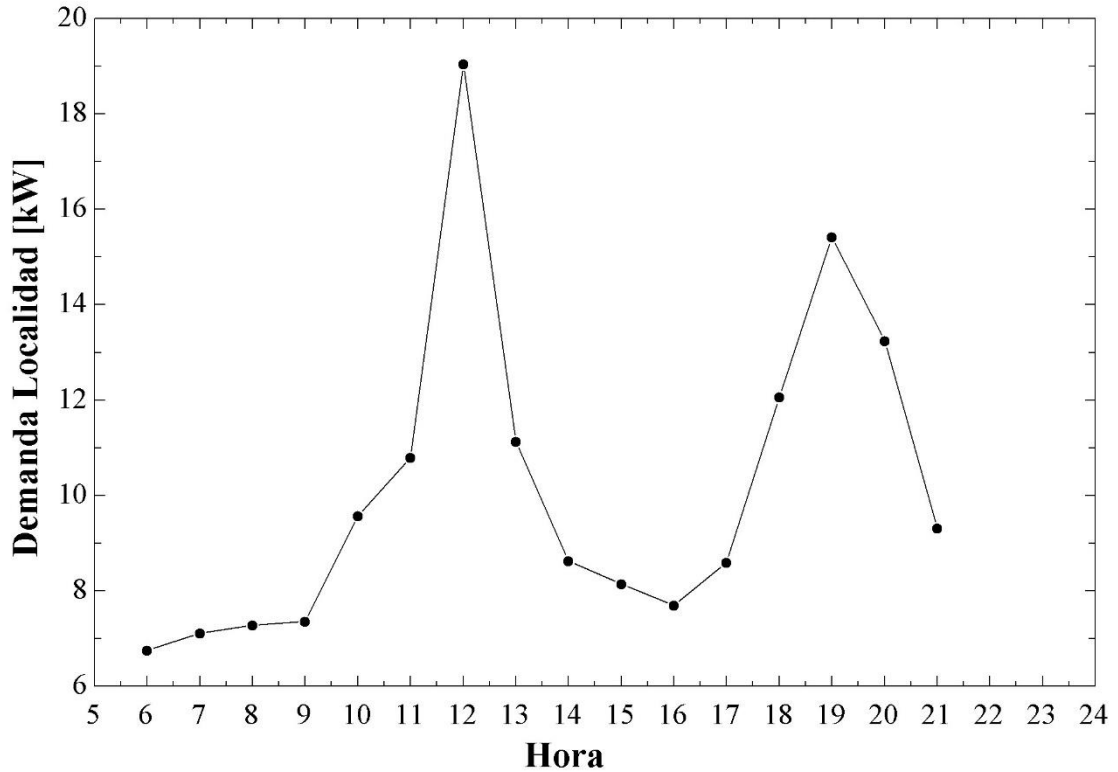
<b>Demanda Total Diaria para el Caso de Estudio</b>	
<b>Hora</b>	<b>Consumo (W)</b>
0	0
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0
6	6750
7	7110
8	7280
9	7390
10	9573
11	10793
12	19048
13	11128
14	8630
15	8140
16	7690
17	8590
18	12065
19	15425
20	13240
21	9308
22	0
23	0
<b>Total</b>	<b>162160</b>

Fuente: Adaptación propia. (IPSE, 2016)

---

<sup>8</sup> Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas

**Grafica 1.** Curva Demanda Total Diaria Zona Caso de Estudio



Fuente: Adaptación Propia. (IPSE, 2016)

En la Grafica 1 se muestra la curva de demanda de la localidad estudiada haciendo referencia a la Tabla 4.

En la Tabla 5 se muestran los parámetros del sistema de gasificación de biomasa, de los cuales usamos la capacidad de producción de gas de síntesis para el análisis termodinámico del sistema de generación, el cual se mostrará más adelante.

**Tabla 5.** Parámetros del Sistema de Gasificación de Biomasa

<b>Parámetros del Sistema de Gasificación con Biomasa</b>	
Capacidad de Producción de gas de síntesis	50 (m <sup>3</sup> /h)
Flujo de biomasa para producción	300 (kg/h)
Tipo de gasificador a usar	Gasificador de Lecho Fijo

Fuente: Adaptación Propia. (IPSE, 2016)

Consecutivamente de conocer las medidas por las cuales se realizaría el proyecto, se procedió a la selección del motor de combustión interna. Los parámetros que limitaron la selección del motor fueron los siguientes:

- Potencia Neta
- Tipo de Combustible
- Consumo de Combustible

Se debía escoger un motor que pudiera cumplir con el pico de consumo el cual se encontraba al medio día y era de aproximadamente 19 kW, esto se observa en la Tabla 4. De igual manera se debía cumplir un aumento de carga de aproximadamente 5% para los próximos 5 años. Siguiendo esto se determinó que el motor a escoger debía generar una potencia aproximada de 22 kW a plena carga. Una restricción importante a considerar era que el motor no debía estar altamente sobre dimensionado a la potencia real de 22 kW, esto se debe a una disminución de la eficiencia del motor debida a la carga.

De igual manera se seleccionó un motor que trabajara con Gas Natural, de esta manera no se debía hacer ningún cambio físico del motor debido al cambio de características de combustible. También se consideró la selección de un motor de gas natural por la similitud del combustible a usar, el cual era gas de síntesis. Se tenía conocimiento del bajo Poder Calorífico del gas de síntesis, sin embargo mediante el ajuste de la relación A/C del motor se podía compensar esta pérdida de energía.

Como se mencionó anteriormente, el consumo de combustible va afín con la relación A/C por lo cual era un parámetro importante a tener en cuenta. Se seleccionó un motor que tuviese un flujo de combustible acorde con una disminución de la relación aire-combustible, y el aumento del flujo de combustible típico del motor.

En la Tabla 6 se muestran los datos del motor de combustión interna seleccionado,

**Tabla 6.** Características del Motor GENRAC RG022.

<b>Motor de Combustión Interna Seleccionado – Modelo RG022 - GENRAC</b>		
Numero de Cilindros	4	-
Desplazamiento	2.4	Lt
Diámetro de pistón	86.5	mm
Carrera	100	mm
RPM Nominales	1800	rpm
Sistema de aspiración de aire	Naturalmente Aspirado	-
Tipo de Combustible	Gas natural, Vapor de propano	-
Flujo de salida de humos	4.7	m3/min
Aire requerido para combustión	1.9	m3/min
Consumo de combustible (m3/hr)	25 % Carga	4
	50 % Carga	5.9
	75 % Carga	7.8
	100 % Carga	9.7

Fuente: Autores del proyecto.

### 3-2 ANÁLISIS TERMODINÁMICO DEL SISTEMA

#### Gas de Síntesis

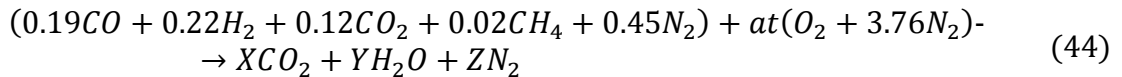
Lo siguiente que se realizó fue determinar el poder calorífico del gas de síntesis a utilizar, para esto se seleccionó una composición de un gas de síntesis similar a la caña flecha, esta composición se obtuvo de la investigación realizada por Bhaduri (Bhaduri, 2016). La composición se muestra en la Tabla 7.

**Tabla 7.** Composición del Gas de Síntesis.

<b>Composición Gas de Síntesis (Fracción Molar)</b>	
Monóxido de Carbono ( $CO$ )	0.19
Hidrogeno ( $H_2$ )	0.22
Dióxido de Carbono ( $CO_2$ )	0.12
Metano ( $CH_4$ )	0.02
Nitrógeno ( $N_2$ )	0.45

Fuente: Adaptación Propia. (Bhaduri, 2016)

Siguiendo la composición del gas de síntesis se procede a la implementación de la ecuación de combustión teórica. La ecuación de combustión teórica para el gas de síntesis que se selecciono es la siguiente



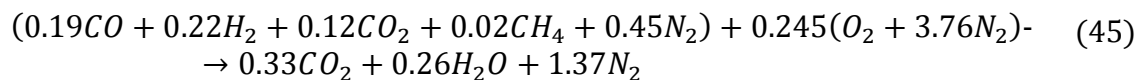
Resolviendo la combustión estequiométrica se obtiene lo siguiente

**Tabla 8.** Balance Estequiométrico

<b>Balance Estequiométrico</b>		
Carbonos	$0.19+0.12+0.02 = X$	$X = 0.33$
Hidrógenos	$0.44+0.08 = 2Y$	$Y = 0.26$
Oxígenos	$0.19+0.24+2at = 0.66+0.26$	$at = 0.245$
Nitrógenos	$0.9+1.8424 = 2Z$	$Z = 1.3712$

Fuente: Autores del Proyecto.

La ecuación de combustión teórica finalmente queda de la siguiente manera,



Del balance estequiométrico se obtiene el aire teórico necesario para que suceda la combustión, además de obtener las fracciones molares de los productos de la

combustión. Estos datos son necesarios para posteriormente hallar el poder calorífico del combustible, esto mediante la siguiente expresión

$$PCI = \sum N_p (\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ)_p - \sum N_r (\bar{h}_f^\circ + \bar{h} - \bar{h}^\circ)_R \left[ \frac{kJ}{kmol} \right] \quad (46)$$

Se tomó la temperatura de productos y reactivos como 25°C, por esta razón la entalpia usada para determinar el PCI es la entalpia de formación de cada compuesto.

**Tabla 9.** Entalpias de Formación y Sensibles

Entalpias de Formación y Sensibles	
Compuesto	$h_f^\circ$ [kJ/kmol]
CO	-110.4
H <sub>2</sub>	0
CO <sub>2</sub>	-393.5
CH <sub>4</sub>	-74.8
N <sub>2</sub>	0
O <sub>2</sub>	0
H <sub>2</sub> O	-241.6

Fuente: Autores del Proyecto.

Reemplazando los datos de entalpias en la ecuación 46 se obtiene lo siguiente

$$H_p = [(0.33)(-393.5) + (0.26)(-241.6) + (1.3712)(0)]_p \quad (47)$$

$$H_R = [(0.19)(-110.4) + (0.12)(-393.5) + (0.22)(0) + (0.45)(0) + (0.02)(-74.8) + (0.245)(0) + (0.9212)(0)]_R \quad (48)$$

$$PCI = H_p - H_R = 5133 \text{ [kJ/kmol]} \quad (49)$$

El valor de poder calorífico que se obtiene está dentro de los rangos normales de poder calorífico de un gas pobre. Como se había mencionado anteriormente el bajo poder calorífico del gas de síntesis se compensa con el cambio de la relación aire combustible, y por consiguiente un aumento de flujo de gas. Esta composición y poder calorífico es indiferente a la configuración del sistema.

### Relación Aire-Combustible

El motor originalmente tiene una relación aire-combustible (A/C) propia para gas natural. Sin embargo, para conocer el consumo volumétrico de aire y combustible para el gas de síntesis es necesario hallar la nueva relación aire-combustible mediante usando el concepto de exceso de aire. Para hallar el (A/C) propio del motor se usa la siguiente expresión.

$$\left(\frac{A}{C}\right)_{G.N} = \frac{V_a}{V_c} \quad (50)$$

Se conocen los valores de consumo de combustible y aire para plena carga, aplicándolos en la ecuación anterior,

$$\left(\frac{A}{C}\right)_{GN} = \frac{V_a}{V_c} = \frac{114}{9.7} = 11.7525 \left[ \frac{m^3_{aire}}{m^3_{combustible}} \right] \quad (51)$$

Es importante tener en cuenta que el análisis que se va a realizar al motor de combustión interna depende directamente del consumo de la población y del consumo del compresor, es decir, que la potencia entregada por el motor varía de acuerdo al consumo de la población y el consumo del compresor, el cual será alimentado por el motor de combustión interna.

Teniendo esto en cuenta, se debe tener una relación entre la carga que el motor debe suplir y la demanda total la cual está compuesta por el consumo de la localidad y el consumo del compresor. Esta relación se halló luego del análisis único del MCI, y comprendiendo que la carga del motor depende de dos parámetros variables y dependientes de sí mismos lo cuales son el compresor y el motor.

La relación final entre la carga del motor y la demanda de la población es la siguiente

$$Carga_1 = 0.0366\dot{W}_{pob} + 0.1749 \quad (52)$$

La relación en la segunda configuración es constante para todo el tiempo de trabajo del motor y esta se considera

$$Carga_2 = 98\% \quad (53)$$

Mediante esta relación se puede hallar la carga del motor dependiendo del consumo de la localidad, esta carga varia a cada hora del día.

Lo siguiente es hallar el consumo de aire y combustible de gas natural para cada valor de carga. Esto se logra hallando el consumo de combustible para cada carga y luego con el (A/C) hallar el consumo de aire respectivo. En las ecuaciones 54 y 55 se muestra esto además del consumo total de la mezcla en la ecuación 56.

$$V_{comb\ GN} = 7.6Carga + 2.1 \left[ \frac{m^3}{hr} \right] \quad (54)$$

$$V_{aire\ GN} = V_{comb\ GN} \left(\frac{A}{C}\right)_{GN} \left[ \frac{m^3}{hr} \right] \quad (55)$$

$$V_{mezcla\ GN} = V_{comb\ GN} + V_{aire\ GN} \left[ \frac{m^3}{hr} \right] \quad (56)$$

Al tener los datos de consumo de aire y combustible, es posible determinar el porcentaje de aire y combustible de la mezcla, esto se logra mediante las siguientes expresiones,

$$\%_{aire} = \frac{V_{aire\ GN}}{V_{mezcla\ GN}} = 7.8\%$$

$$\%_{comb} = \frac{V_{comb\ GN}}{V_{mezcla\ GN}} = 92.2\%$$

Para conocer los consumos de aire y combustible de gas de síntesis para el motor de combustión interna seleccionado se hallan mediante la relación (A/C) propia del motor trabajado con gas de síntesis, esta relación aire-combustible de gas de síntesis se halló usando el siguiente procedimiento

$$\left( \frac{A}{C} \right)_{masa} = \left( \frac{A}{C} \right)_{GN} \left( \frac{M_{aire}}{M_{CH_4}} \right) \left[ \frac{kg_{aire}}{kg_{CH_4}} \right] \quad (57)$$

Se halla la relación (A/C) másica para relacionarla con la relación (A/C) teórica del gas natural. Realizando esto podemos hallar el factor de aireación  $n$  del motor, el cual asumimos que es el mismo trabajando con gas de síntesis.

$$\left( \frac{A}{C} \right)_{teorica\ CH_4} = 17.16 \left[ \frac{kg_{aire}}{kg_{CH_4}} \right]$$

$$n = \frac{\left( \frac{A}{C} \right)_{masa}}{\left( \frac{A}{C} \right)_{teorica\ CH_4}} \quad (58)$$

Se conoce igualmente por literatura que la relación (A/C) para un gas de síntesis es  $1.4 \left[ \frac{kg_{aire}}{kg_{syngas}} \right]$ , sabiendo esto y el factor de aireación  $n$  se puede calcular la (A/C) real para el MCI trabajando con gas de síntesis.

$$\left( \frac{A}{C} \right)_{real\ syngas} = \left( \frac{A}{C} \right)_{syngas} n \left[ \frac{kg_{aire}}{kg_{syngas}} \right] \quad (59)$$

Para conocer la relación (A/C) en base molar o volumétrica se usa la siguiente expresión



$$\left(\frac{A}{C}\right)_{molar} = \left(\frac{\left(\frac{A}{C}\right)_{real\ syngas}}{M_{aire}}\right) M_{fuel}^{-1} \left[ \frac{kmol_{aire}}{kmol_{syngas}} \right] \quad (60)$$

$$\left(\frac{A}{C}\right)_{molar} = 1.436 \left[ \frac{kmol_{aire}}{kmol_{syngas}} \right] \quad (61)$$

Este valor de (A/C) molar es necesario para determinar los valores reales de consumo de aire y gas de síntesis para el motor de combustión interna el cual trabaja originalmente con gas natural.

El consumo de aire para el motor trabajando con gas de síntesis se halla de la siguiente manera

$$V_{aire} = \frac{V_{mezcla\ GN} \left(\frac{A}{C}\right)_{molar}}{1 + \left(\frac{A}{C}\right)_{molar}} \left[ \frac{m^3}{hr} \right] \quad (62)$$

$$V_{fuel} = V_{mezcla\ GN} - V_{aire} \left[ \frac{m^3}{hr} \right] \quad (63)$$

$$V_{mezcla} = V_{aire} + V_{fuel} \left[ \frac{m^3}{hr} \right] \quad (64)$$

De igual manera se puede hallar el volumen de la mezcla por ciclo del motor,

$$V_{ciclo} = \frac{V_{mezcla}}{3600\ cs} \left[ \frac{m^3}{ciclo} \right] \quad (65)$$

### Potencia del Ciclo

Se comienza el análisis del ciclo Otto de potencia para el motor de combustión interna seleccionado, para el desarrollo de esta sección nos basamos en las ecuaciones y relaciones mostradas en la sección de Análisis Termodinámico.

Debido a que el análisis que se realizó debía acercarse al ciclo de potencia real del motor, se tomaron parámetros efectivos los cuales se asemejan más al comportamiento real del motor de combustión interna al cambio de cargas.

*Presión Media Efectiva:* Es la media de todas las presiones instantáneas que se producen en la fase de combustión y expansión de los gases dentro del cilindro.

$$PME = \frac{rpc \times 2\pi \times Par \times rps}{Cilindraje \times rps} \quad (66)$$

Par:

$$Par = \frac{Potencia\ Neta}{raps \eta_{gen}} \quad (67)$$

*Potencia Media Efectiva:* es un parámetro que puede ser usada para comparar el desempeño de máquinas recíprocas de igual tamaño. Entre mayor PME la máquina entregara mayor trabajo neto por ciclo y se desempeñara mejor.

$$W_{ef} = PME \text{ Cilindraje} \left( \frac{rpm}{120} \right) \quad (68)$$

*Ratio de Presión:*

$$rp = \frac{(P_1 rc^k) + (k^{rc} PME) - (k PME) - (P_1 rc) - (rc PME) + PME}{P_1 (rc^k - rc)} \quad (69)$$

Estos parámetros efectivos son propios del motor y esto permite conocer los estados reales del ciclo de potencia del motor, en la Tabla 10 se muestra a modo de resumen los cuatro estados con las respectivas ecuaciones para determinarlos.

**Tabla 10.** Formulaciones Estados del Ciclo de Potencia

Estados Ciclos de Potencia		
Estado	Descripción	Formulación
Admisión	La presión y temperatura de entrada al ciclo se toman como las de sitio.	$P_1 = P_{atm}$ $T_1 = T_{amb}$ $V_1 = V_{total}$
Compresión	Es el punto en el cual se produce la combustión por la compresión isentrópica del combustible.	$P_2 = P_1 (rc^k)$ $T_2 = T_1 (rc^{k-1})$ $V_2 = V_c$
Expansión	Trabajo realizado debido a la expansión por la combustión dentro de la cámara del pistón	$P_3 = rp P_2$ $T_3 = \frac{P_3 T_2}{P_2}$ $V_3 = V_2$
Escape	Salida de los humos de combustión.	$P_4 = P_3 \left( \frac{1}{rc} \right)^k$ $T_4 = T_3 \left( \frac{1}{rc} \right)^{k-1}$ $V_4 = V_1$

Fuente: Autores del Proyecto.

### 3-3 ANÁLISIS EXERGÉTICO DEL SISTEMA

En esta sección se muestra el análisis exergético para las dos configuraciones del estudio. Está dividido en cada equipo de las dos configuraciones teniendo en cuenta las consideraciones y adecuaciones que se debieron llevar a cabo para cada configuración. Los resultados de las irreversibilidades para cada configuración se muestran al final de la sección.

#### Motor de Combustión Interna

Para dar inicio al análisis exergético del motor de combustión interna para la primera configuración se determinaron las exergías químicas y físicas tanto del aire, combustible y mezcla. Esto se realiza para hallar los flujos exergéticos totales para cada estado del ciclo de potencia del motor. Como expresiones generales para calcular la exergía química y física se siguieron las siguientes dos expresiones

$$\psi_{física} = C_p(T - T_0) - T_0 C_p \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) \quad (70)$$

$$\psi_{química} = \sum y_i \psi_{qi}^\circ + R_u T_0 \sum y_i \ln(y_i) \quad (71)$$

Donde  $\psi_{qi}^\circ$  es la exergía química estándar para cada componente

De igual manera se debieron calcular los calores específicos para el combustible, el aire y la mezcla de la siguiente manera

$$C_{p_i} = \sum y_i C_{p_i} \left[ \frac{kJ}{kmol K} \right] \quad (72)$$

El propósito fundamental del análisis exergético es determinar las irreversibilidades de cada parte del volumen de control o sistema evaluado. En este sentido la ecuación 73 muestra el balance de irreversibilidades para el motor de combustión interna para ambas configuraciones.

$$\dot{I}_{motor} = \dot{X}_{comb} - \dot{X}_{calor} - \dot{W}_{ef} \quad (73)$$

El flujo de exergía del combustible se determinó de la siguiente manera,

$$\dot{X}_{comb} = (\psi_{química comb} + \psi_{física comb}) N_{comb} \quad (74)$$

Debido a que el análisis respectivo al motor de combustión interna se hace a cargas parciales y por ciclos del motor, es importante tener en cuenta el flujo molar, másico o volumétrico y los ciclos por segundos aplicables a cada situación.

El flujo de exergía por calor se determinó usando la ecuación (30) mostrada anteriormente en la sección 2-4 sobre Análisis Exergético.

Para la segunda configuración, el motor trabaja a una misma carga, y genera irreversibilidades constantes durante todo su funcionamiento. Esta observación se replica para varios equipos de la segunda configuración.

### Tanque de Almacenamiento

Para dimensionar el tanque de almacenamiento se requirieron dos parámetros importantes de diseño, el flujo de entrada de gas y la presión de entrada del mismo. El flujo de entrada de gas al tanque se determina mediante la diferencia del flujo de gas debido al consumo del motor (compresor y población) y el flujo total de gas entregado por el gasificador.

$$\dot{V}_{tanque} = \dot{V}_{syngas} - \dot{V}_{motor} \quad (75)$$

La presión de entrada al tanque depende del compresor que se seleccionó, en la sección de análisis del compresor se explica cómo se determinó este valor.

El balance exergético para el tanque de almacenamiento queda de la siguiente manera

$$\dot{I}_{TK} = \dot{X}_{en TK} + \dot{X}_{calor TK} \quad (76)$$

El flujo de calor en el tanque se determinó con la siguiente expresión

$$\dot{Q}_{TK} = \frac{(N_{comb}u_{en}) - (N_{comb}h_{en})}{3600} [kW] \quad (77)$$

Con el flujo de calor se determinó el flujo exergético de calor en el tanque usando la expresión (30) de la sección 2-4.

### Compresor

El desarrollo para el análisis exergético del compresor se fundamentó en determinar que potencia debía suministrarse al mismo para comprimir hasta cierta presión deseada el gas de síntesis. Por elección propia se decidió escoger una presión de trabajo del compresor de 10 atm, la cual es la misma a la entrada del tanque de almacenamiento. Se tomó esta presión para asegurar el tamaño del tanque de unas dimensiones aceptables.

Principalmente se determinó la temperatura del gas de síntesis a la salida del compresor  $T_{comp}$  haciendo la suposición que el compresor es adiabático.

$$\left(\frac{T_{comp}}{T_0}\right) = \left(\frac{P_{comp}}{P_0}\right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (78)$$

Donde  $P_{comp} = 1013.25 \text{ kPa}$  y  $k = 1.381$

Luego de determinar la temperatura de salida del compresor ideal, se prosiguió a determinar la temperatura del compresor real,

$$\eta_{comp} = \frac{(C_{p_{comb}} T_{comp}) - (C_{p_{comb}} T_0)}{(C_{p_{comb}} T_{comp \text{ real}}) - (C_{p_{comb}} T_0)} \quad (79)$$

Se tomó la eficiencia del compresor  $\eta_{comp} = 90\%$  de bibliografía.

Sabiendo esta temperatura real se halló la potencia requerida para comprimir el excedente de gas al tanque de almacenamiento. Esta potencia se determinó usando la expresión (80) a continuación,

$$\dot{W}_{comp} = \dot{N}_{TK} C_{p_{comb}} (T_{comp \text{ real}} - T_0) \quad (80)$$

Finalmente el balance exergético del compresor queda de la siguiente manera

$$\dot{I}_{comp} = \dot{X}_{en \text{ comp}} + \dot{W}_{comp} - \dot{X}_{sal \text{ comp}} \quad (81)$$

Los flujos exergéticos de entrada y salida del compresor se hallaron siguiendo las expresiones (70) y (74) en la sección de Análisis Exergético del Motor.

### **Generador y Banco de Baterías**

El estudio exergético del generador es bastante simple ya que se conocen las potencias de entrada y salida además de conocer la eficiencia del generador. Aplicando el balance exergético se obtiene la siguiente expresión

$$\dot{I}_{gen} = \dot{W}_{en} - \dot{W}_{sal} \quad (82)$$

En la segunda configuración esta irreversibilidad es constante debido a la carga constante del motor.

Para el caso de las baterías, lo primero que se determinó fue cuánta energía debería ser capaz de almacenar el banco de baterías dependiendo de un día de consumo de la localidad. Esto se determinó hallando la máxima potencia que proporcionaría el motor a un flujo constante de gas de síntesis. Se halló este valor mediante una relación de potencia y consumo, esta se muestra a continuación.

**Tabla 11.** Relación de Consumo/Potencia para el Banco de Baterías

<b>Relación de Consumo/Potencia para el Banco de Baterías</b>	
<b>Flujo de combustible [m<sup>3</sup>/hr]</b>	<b>Potencia Generada [kW]</b>
50	20.96
48.79	<b>21.48</b>

Fuente: Autores del Proyecto

Se determinó que la máxima potencia obtenida con el motor de combustión interna para un flujo de gas de síntesis de 48.79 [m<sup>3</sup>/hr] sería de 21.48 [kW]. En base a esto se determinó la energía a almacenar en las baterías para cada hora de día. Estos resultados se muestran en la Tabla 12.

**Tabla 12.** Energía a Almacenar en Banco de Baterías.

<b>Energía a Almacenar en Banco de Baterías</b>			
<b>Hora</b>	<b>Potencia Generada [W]</b>	<b>Potencia Consumo [W]</b>	<b>Energía a Almacenar [Wh]</b>
0	0	0	0
1	0	0	0
2	0	0	0
3	0	0	0
4	0	0	0
5	0	0	0
6	21480	6750	14730
7	21480	7110	14370
8	21480	7280	14200
9	21480	7390	14090
10	21480	9573	11907
11	21480	10793	10687
12	21480	19048	2432
13	21480	11128	10352
14	21480	8630	12850
15	21480	8140	13340
16	21480	7690	13790
17	21480	8590	12890
18	21480	12065	9415
19	21480	15425	6055
20	21480	13240	8240
21	21480	9308	12172
22	0	0	0
23	0	0	0
<b>TOTAL</b>	<b>343677</b>	<b>162160</b>	<b>181517</b>

Se tiene el voltaje de salida del generador e inversor, además se determinó el porcentaje de descarga máximo estacional del banco de baterías, el cual se tomó como medida de dimensionamiento del banco de baterías. Este valor por literatura se tomó como 70%. Conociendo la nueva capacidad del banco de baterías, se determinó los ampere hora [Ah] del banco de baterías mediante la siguiente expresión.

$$\text{Ampere Hora Banco de Bateria [Ah]} = \frac{\text{Capacidad Banco de Baterias [Wh]}}{\text{Voltaje Banco de Baterias [V]}} \quad (83)$$

Estos cálculos se muestran en la Tabla 13 a continuación

**Tabla 13. Parámetros del Dimensionado para Banco de Baterías**

<b>Dimensionado Parámetros Banco de Baterías</b>		
<b>Voltaje Salida Generador</b>	240	[V]
<b>Voltaje Salida Inversor</b>	24	[V]
<b>Energía a Almacenar</b>	181.517	[kWh]
<b>Porcentaje de Descarga Máximo Estacional</b>	70	[%]
<b>Capacidad Banco de Baterías</b>	259.31	[kWh]
<b>Ampere Hora Banco de Baterías</b>	129654.99	[Ah]

Fuente: Autores del Proyecto

Siguiendo los ampere hora [Ah] necesarios para el banco de baterías, se prosiguió a la selección de la unidad de batería del banco. Las especificaciones técnicas de la batería se muestran en la Tabla 14.

**Tabla 14. Especificaciones Técnicas Batería SBS Serie STT**

<b>Especificaciones Técnicas Batería Seleccionada SBS Serie STT</b>		
<b>Voltaje Nominal</b>	2	[V]
<b>Capacidad Nominal</b>	3585	[Ah]
<b>Longitud</b>	212	[mm]
<b>Ancho</b>	577	[mm]
<b>Alto</b>	828	[mm]
<b>Peso (Con electrolito)</b>	224.5	[kg]

Fuente: Adaptación Propia.

Lo siguiente a realizar fue determinar la configuración de las baterías, la cantidad en serie y en paralelo dependiendo del voltaje requerido y los ampere hora totales del banco de baterías, esto se muestra en la Tabla 15.

**Tabla 15.** Configuración Banco de Baterías

<b>Configuración Banco de Baterías</b>			
<b>Tipo Configuración</b>	<b>Numero de Baterías</b>	<b>Voltaje [V]</b>	<b>Ampere hora [Ah]</b>
Serie	12	24	3585
Paralelo	37	24	132645
<b>Total Baterías</b>	<b>181</b>	<b>24</b>	<b>132645</b>

Fuente: Autores del Proyecto.

La configuración en serie permite alcanzar al banco de baterías el voltaje de salida del inversor. La configuración en paralelo permite alcanzar los ampere hora totales del banco de baterías calculado anteriormente.

Estos valores permiten desarrollar a continuación el análisis exergético del sistema de almacenamiento electroquímico por baterías.

Las irreversibilidades del sistema de baterías se determinan usando la siguiente expresión (84)

$$\dot{I}_{BB} = \dot{X}_{en BB} - \dot{X}_2 \quad (84)$$

Donde la  $\dot{X}_{en Bat}$  y la  $\dot{X}_{2 Bat}$  se determinan de la siguiente manera,

$$\dot{X}_{en BB} = \dot{W}_{motor} - \dot{W}_{pob} \quad (85)$$

$\dot{W}_{motor}$  Se considera constante en la segunda configuración debido a la consideración de carga constante del motor.

$$\dot{X}_2 = \dot{X}_{en BB} \eta_{BB} \quad (86)$$

La  $\dot{X}_{2 Bat}$  es el flujo exergetico que entra a la batería teniendo en cuenta la eficiencia de la batería.

De igual manera, se define la exergía almacenada en la batería de la siguiente expresión (87),

$$\dot{X}_{alm} = \dot{X}_2 - \dot{X}_1 \quad (87)$$

Esta  $\dot{X}_1$  es la exergía remanente en la batería considerando una descarga máxima del 70% de la batería.

$$\dot{X}_1 = \dot{X}_2 0.3 \quad (88)$$



### 3-4 ANÁLISIS TERMOECONÓMICO

El análisis termoeconómico se realizó para cada configuración, por este motivo se dividió la sección en estas dos configuraciones. Se comentaran las suposiciones y consideraciones que se tuvieron en cuenta para el balance exergoeconómico.

Como dato preliminar, se debe conocer el valor del CEPCI<sup>9</sup> el cual se utilizó en nuestro proyecto como indicador económico, CEPCI 2001=394,3 y CEPCI 2017=562,1. La tasa de cambio se tomó como 3,021 COP/USD.

#### 3-4-1 Análisis Primera Configuración

Lo primero que se realizó fue determinar los costos de cada equipo  $Z$  [COP] y los costos de operación para cada equipo  $\dot{Z}$  [COP/s].

#### Motor de Combustión Interna y Generador

Para determinar los costos del motor y el generador se determinó un porcentaje de costo para cada equipo por separado del costo total del grupo electrógeno. Se conoce el costo del grupo electrógeno por cotización del fabricante, se debe tener en cuenta un factor de instalación y adecuación del equipo, este factor se determinó para la instalación del grupo electrógeno como un 50% del precio total del equipo. Este análisis se muestra en la siguiente formula,

$$Z_{grupo} = Z_{motor} + Z_{generador} \quad (89)$$

$$Z_{grupo} = \$9000 [USD] F_{inst\ gen} TC \quad (90)$$

Donde  $F_{inst\ gen}$  es el factor de instalación del grupo electrógeno y  $TC$  es la tasa de cambio.

Se consideró entonces que el costo del motor es el 90% del precio total del grupo electrógeno (considerando la instalación y adecuación), mientras que el costo del generador solo sería el 10% del costo total del grupo electrógeno.

#### Compresor

Para determinar el costo del compresor se basó en un informe sobre costos de equipos en el cual determinan el costo de diferentes equipos en base a propiedades del equipo como son HP's, Volumen, Dimensiones, etc. (Couper, 1988)

En el caso del compresor, la fórmula aplicada es la siguiente,

$$Z_{comp} = 1.49(HP)^{0.71} [KUSD] \quad (91)$$

---

<sup>9</sup> Chemical Engineering Plant Cost Index

Este costo se pasó a pesos colombianos usando la tasa de cambio.

### Tanque de Almacenamiento

El costo del tanque de almacenamiento se determinó usando el mismo informe de costos usado en el compresor. La expresión usada para determinar este costo del tanque fue la siguiente,

$$Z_{TK} = F_M^{2.631+1.3673(\ln V)-0.06309(\ln V)^2} \quad (92)$$

Donde  $F_M$  es el factor de costo dependiendo del material de construcción del tanque, en este caso se escogió un factor de 2.4 para acero inoxidable 304. (Couper, 1988)

Este costo se pasó a pesos colombianos usando la tasa de cambio.

Para determinar el costo de operación de los equipos de la primera configuración se implementó la expresión (93)

$$\dot{Z}_i = \frac{Z_i F_{OyM} CRF}{OP} \quad (93)$$

Donde  $Z_i$  es el costo del equipo,  $F_{OyM}$  es el factor de operación y mantenimiento del equipo el cual se determinó como un 8% del costo del equipo,  $CRF^{10}$  es el factor de recuperación del capital y se calcula siguiendo la expresión (94), y  $OP$  es la operación de la planta en [seg/año].

$$CRF = \frac{i}{1 - (1 + i)^{-n}} \quad (94)$$

Donde  $i$  es la tasa de retorno que se tomo como el 11% y  $n$  es el número de años de vida útil de la planta.

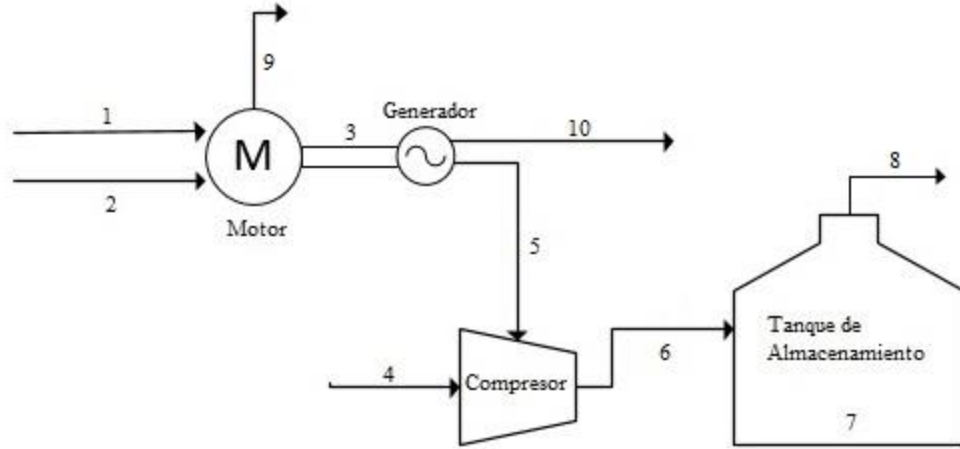
### Balance Exergoeconómico Primera Configuración

La Figura 13 muestra el diagrama que se siguió para la determinación de los costos exergoeconómicos de la primera configuración.

---

<sup>10</sup> Cost Recovery Factor

**Figura 13.** Diagrama Flujos Exergoeconómico Primera Configuración



Fuente: Autores del Proyecto

A continuación se muestra el balance Exergoeconómico de cada equipo:

*Motor*

$$c_1\dot{X}_{comb} + c_2\dot{X}_{aire} + \dot{Z}_{motor} = c_3\dot{W}_{ef} + c_9\dot{X}_{Q\ motor} \quad (95)$$

*Compresor*

$$c_4\dot{X}_{en\ comp} + c_5\dot{W}_{comp} + \dot{Z}_{comp} = c_6\dot{X}_{sal\ comp} \quad (96)$$

*Generador Eléctrico*

$$c_3\dot{W}_{ef} + \dot{Z}_{gen} = c_5\dot{W}_{comp} + c_{10}\dot{W}_{pob} \quad (97)$$

*Tanque de Almacenamiento*

$$c_6\dot{X}_{en\ TK} + \dot{Z}_{TK} = c_8\dot{X}_{Q\ TK} + c_7\dot{X}_{alm\ TK} \quad (98)$$

Previamente se determina el costo del combustible  $c_1$  usando la siguiente expresión

$$c_1 = \frac{Costo_{GN}}{\left(\frac{PCI}{M_{comb}}\right) \rho_{CH_4}} \left[ \frac{COP}{kJ} \right] \quad (99)$$

Se siguieron los siguientes criterios de asignación de costos para la determinación de costos

**Cuadro 7.** Criterios de Asignación de Costos Primera Configuración

<b>Criterios de Asignación de Costos Primera Configuración</b>	
$c_2 = 0$	Costo del Aire
$c_9 = 0$	Costo de los Humos de Combustión
$c_4 = c_1$	Son el mismo flujo de gas de síntesis
$c_3 = c_5$	Carga de costo total a C10
$c_7 = c_6$	Costo de entrada y salida son iguales

Fuente: Autores del Proyecto

### 3-4-2 Análisis Segunda Configuración

Al igual que la primera configuración, se comienza con la determinación del costo de los equipos y su respectivo costo de operación. Para el motor y el generador se usan los mismos costos obtenidos en el análisis de la primera configuración.

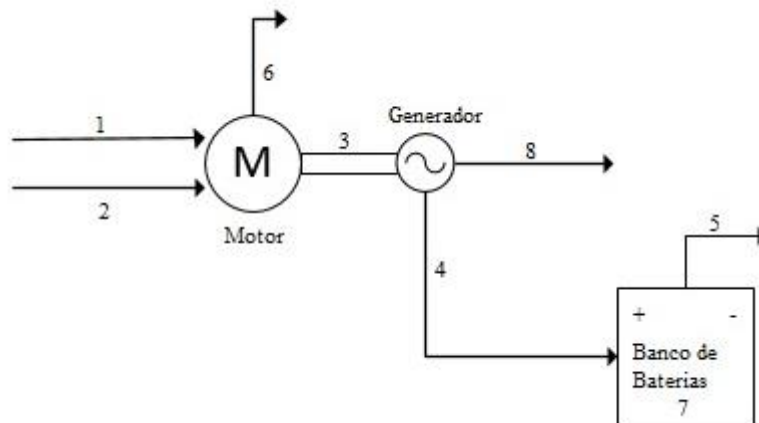
#### Banco de Baterías

El costo de las baterías por unidad se determinó de un informe de cotizaciones de baterías y el costo de operación de la misma se estableció usando la expresión (93) del análisis termoeconómico de la primera configuración.

#### Balance Exergoeconómico Segunda Configuración

El balance exergoeconómico de la segunda configuración se basó en la Figura 14, la cual muestra la asignación de estados para el respectivo análisis de costos.

**Figura 14.** Diagrama Flujos Exergoeconómicos Segunda Configuración



Fuente: Autores del Proyecto

*Motor*

$$c_1\dot{X}_{comb} + c_2\dot{X}_{aire} + \dot{Z}_{motor} = c_3W_{ef} + c_6\dot{X}_{Q\ motor} \quad (100)$$

*Generador Eléctrico*

$$c_3\dot{W}_{ef} + \dot{Z}_{gen} = c_4\dot{X}_{en\ Bat} + c_8\dot{W}_{pob} \quad (101)$$

*Banco de Baterías*

$$c_4\dot{X}_{en\ Bat} + \dot{Z}_{Bat} = c_5\dot{I}_{Bat} + c_7\dot{X}_{alm\ Bat} \quad (102)$$

El costo de combustible se determina igual al de la primera configuración. Se siguieron los criterios de asignación mostrados a continuación para la determinación de costos.

**Cuadro 8.** Criterios de Asignación de Costos Segunda Configuración

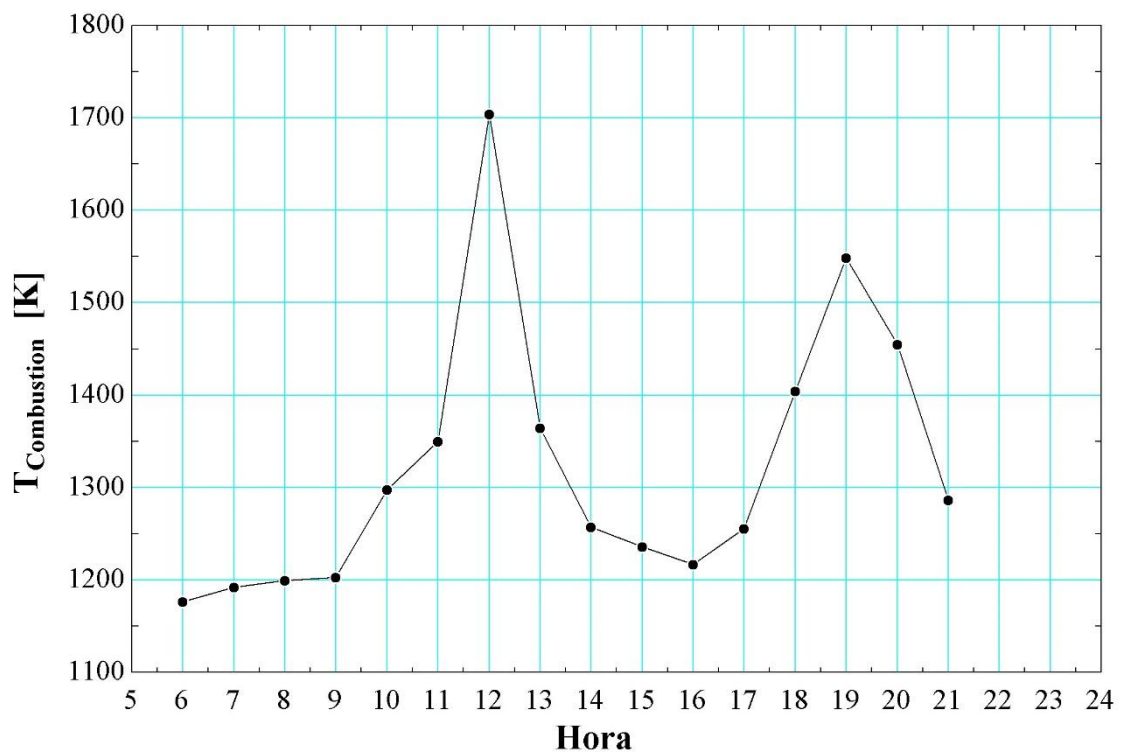
<b>Criterios de Asignación de Costos Segunda Configuración</b>	
$c_2 = 0$	Costo del Aire
$c_6 = 0$	Costo de los Humos de Combustión
$c_3 = c_4$	Carga de costo total a C8
$c_7 = c_4$	Costo de entrada y salida son iguales

Fuente: Autores del Proyecto

## CAPITULO 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se exponen, analizan y discuten los resultados obtenidos en las dos configuraciones del estudio mediante gráficas. Estas muestran el comportamiento de las variables significativas de las configuraciones. Los resultados se muestran de acuerdo a la secuencia de desarrollo del proyecto. De igual manera las tablas de resultados se muestran en los Anexos.

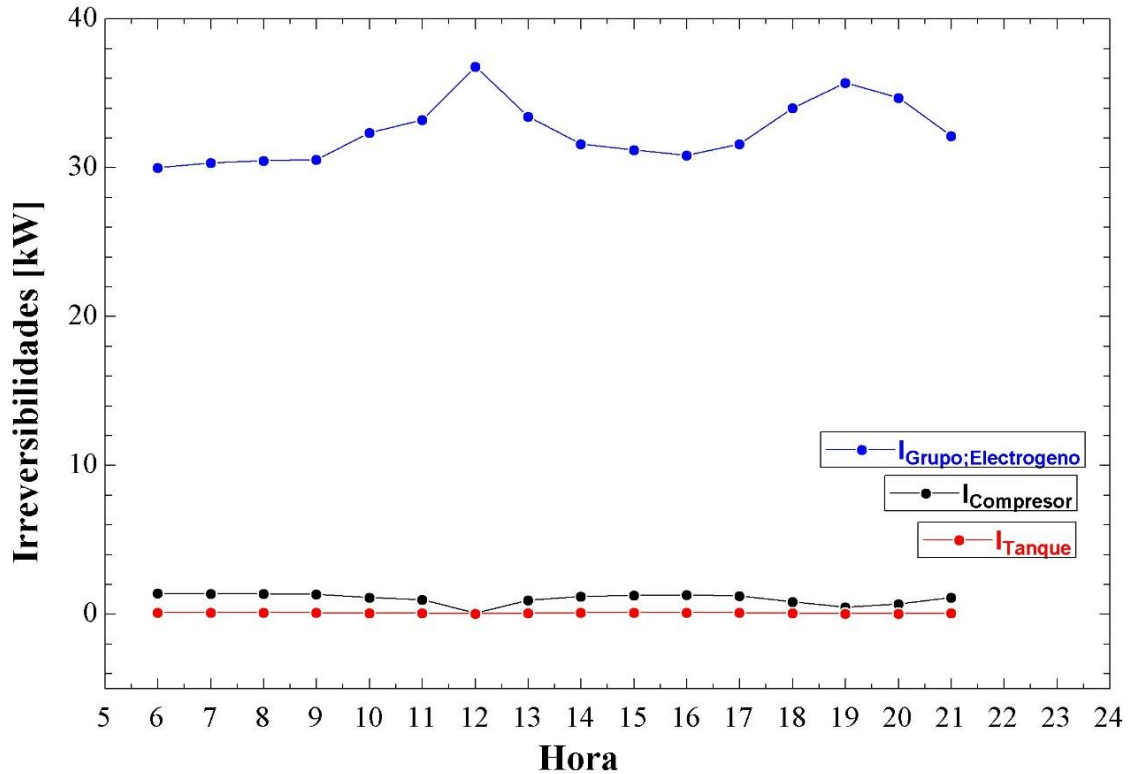
**Grafica 2.** Temperatura de Combustión en relación a Hora de Demanda



Fuente: Autores del Proyecto.

En la Grafica 2 se evidencia el comportamiento de la temperatura de combustión en el motor de combustión interna para la primera configuración. Se observa que la variable se comporta de acuerdo a la curva de demanda de la población, lo cual indica que el modelo termodinámico del motor es el adecuado para una configuración de cargas parciales. Los rangos de temperatura se encuentran dentro de los valores típicos de combustión para un motor del tipo al cual se realizó el estudio.

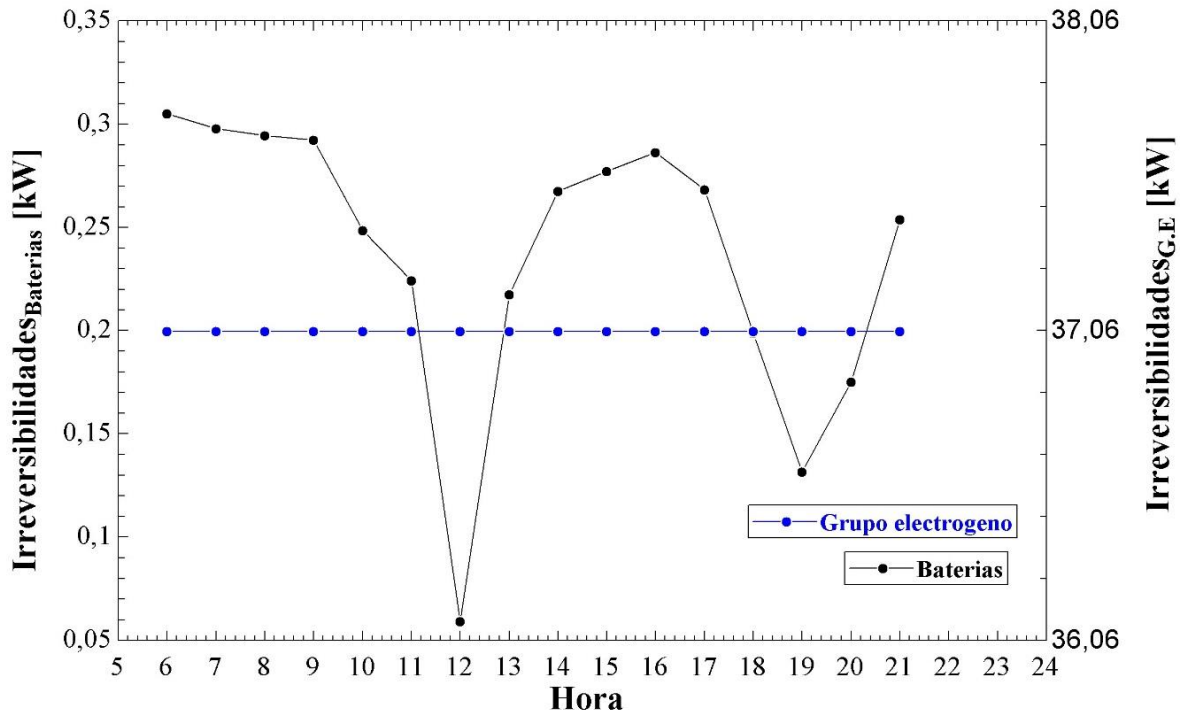
Grafica 3. Irreversibilidades Primera Configuración



Fuente: Autores del Proyecto.

La primera configuración del sistema de generación y almacenamiento de energía consta de tres unidades; grupo electrógeno, compresor y tanque de almacenamiento. La Grafica 3 muestra las irreversibilidades de cada componente del sistema para la primera configuración. Cabe resaltar que las irreversibilidades provenientes del compresor y el tanque son mínimas a comparación de las generadas por el grupo electrógeno en especial el motor de combustión interna. Esto se debe a que la conversión de energía en las maquinas térmicas poseen eficiencias bajas, lo cual producen gran cantidad de irreversibilidades.

**Grafica 4. Irreversibilidades Segunda Configuración**

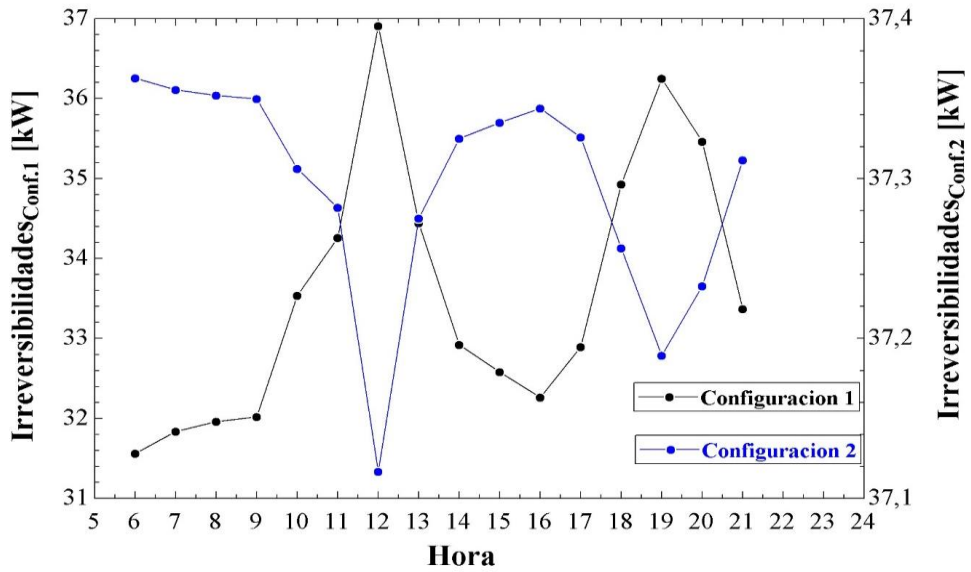


Fuente: Autores del Proyecto.

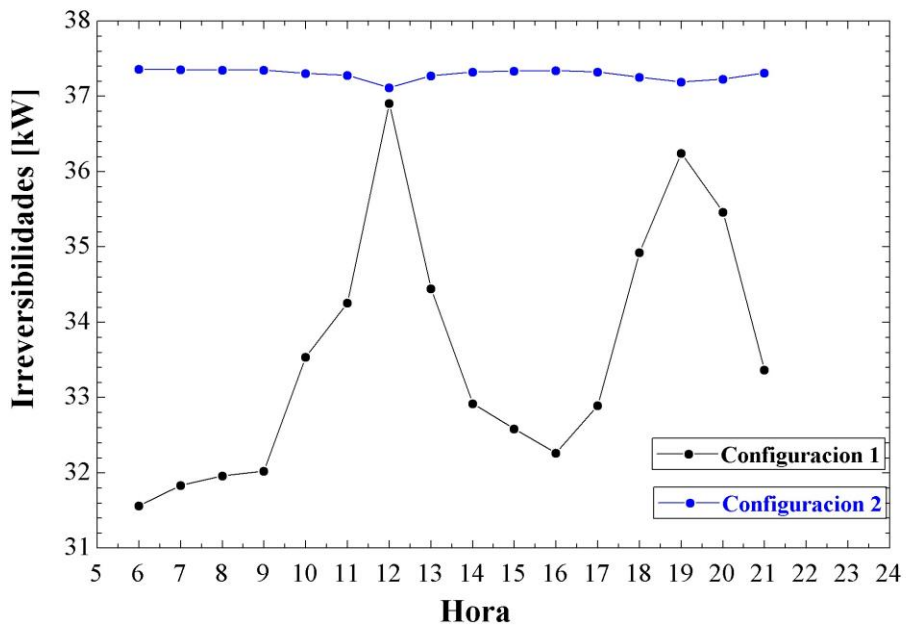
La segunda configuración del sistema de generación y almacenamiento de energía eléctrica consta de dos unidades; el grupo electrógeno y un banco de baterías. Las irreversibilidades del grupo electrógeno no varían de acuerdo a la demanda de la población, esto se debe a que el motor para esta configuración trabaja a carga constante. Por otra parte las irreversibilidades del banco de baterías fluctúan en valores de kilovatio-hora muy bajos y son afectadas principalmente por el consumo de energía eléctrica de la población. Esto se observa en la Grafica 4.



Grafica 5. Irreversibilidades Totales para Ambas Configuraciones



Grafica 6. Irreversibilidades Torales para Ambas Configuraciones

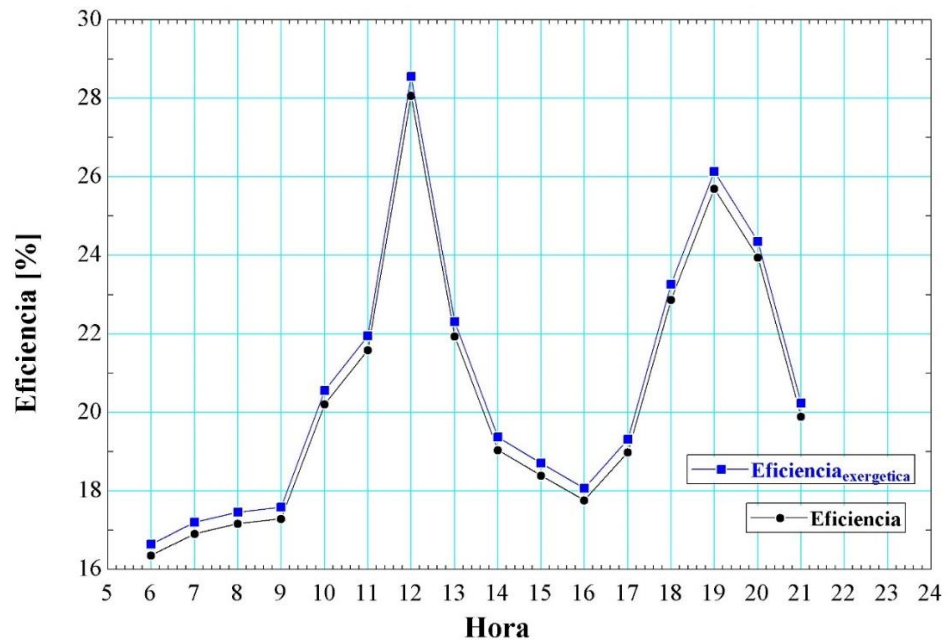


Fuente: Autores del Proyecto.

Las irreversibilidades de un sistema es una variable que permite determinar las pérdidas de energía útil y con ello estimar los costos de dichas perdidas. En la Grafica 5

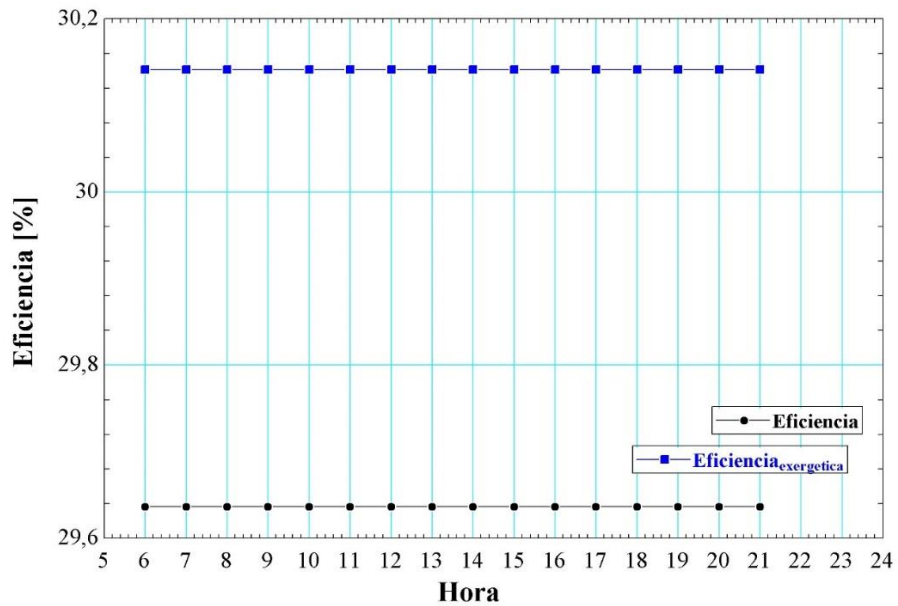
y 6 se presentan los resultados de las irreversibilidades totales obtenidas para cada configuración. En la primera configuración, el consumo de energía eléctrica por parte de la población es el factor determinante del comportamiento de las irreversibilidades. Esto se debe a que el motor al trabajar en función de la demanda de la población genera las mayores irreversibilidades del sistema como se comentó anteriormente. Para el caso de la segunda configuración, el motor trabaja a carga constante, por lo tanto sus irreversibilidades no varían significativamente. La variación está dada por las irreversibilidades en las baterías, que al ser un sistema de almacenamiento electroquímico no posee irreversibilidades considerables para el sistema.

**Grafica 7. Eficiencias Primera Configuración**



Fuente: Autores del Proyecto.

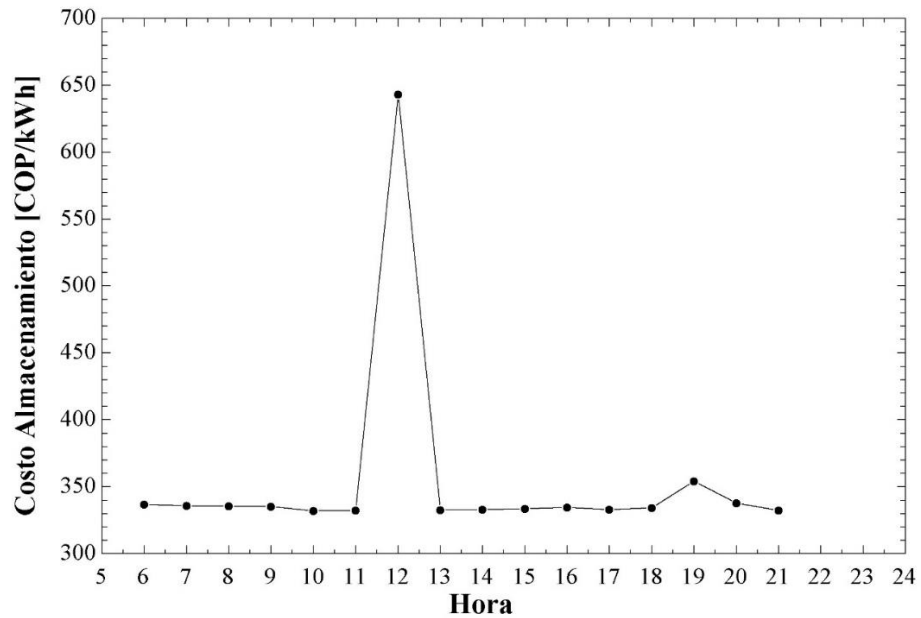
**Grafica 8. Eficiencias Segunda Configuración**



Fuente: Autores del Proyecto.

En las Gráficas 6 y 7 se evidencian las eficiencias eléctricas y exergéticas para la primera y segunda configuración respectivamente. La primera alcanza eficiencias cercanas al 28% pero su variación en la carga del motor implica variaciones considerables en la eficiencia eléctrica y exergética del sistema. Por otro lado en la segunda configuración, el motor trabaja a carga constante por lo cual su eficiencia se considera fija con respecto a la demanda de la población. Al igual el sistema electroquímico del banco de baterías posee eficiencias del 95-98% que no vuelven ineficiente al sistema.

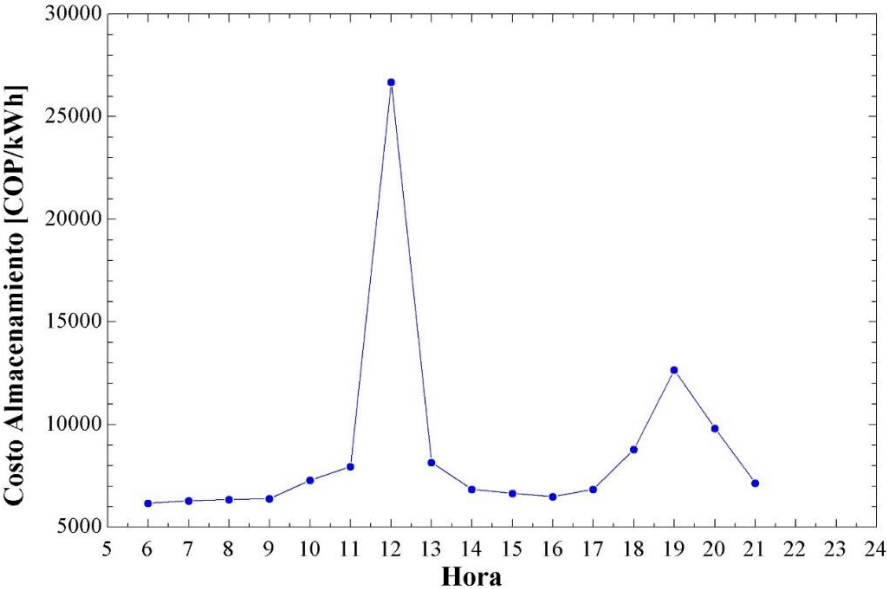
**Grafica 9. Costo de Almacenamiento Primera Configuración**



Fuente: Autores del Proyecto.

El valor de la energía almacenada es afectado directamente por el costo del equipo que realice el almacenamiento y el costo unitario del mismo. En la Grafica 8 se observa que en la hora en que la población consume la mayor cantidad de energía eléctrica el costo de almacenamiento es también el más alto. Esto se debido a que en dicha hora se almacena la menor cantidad de energía y la población tiene la mayor demanda eléctrica.

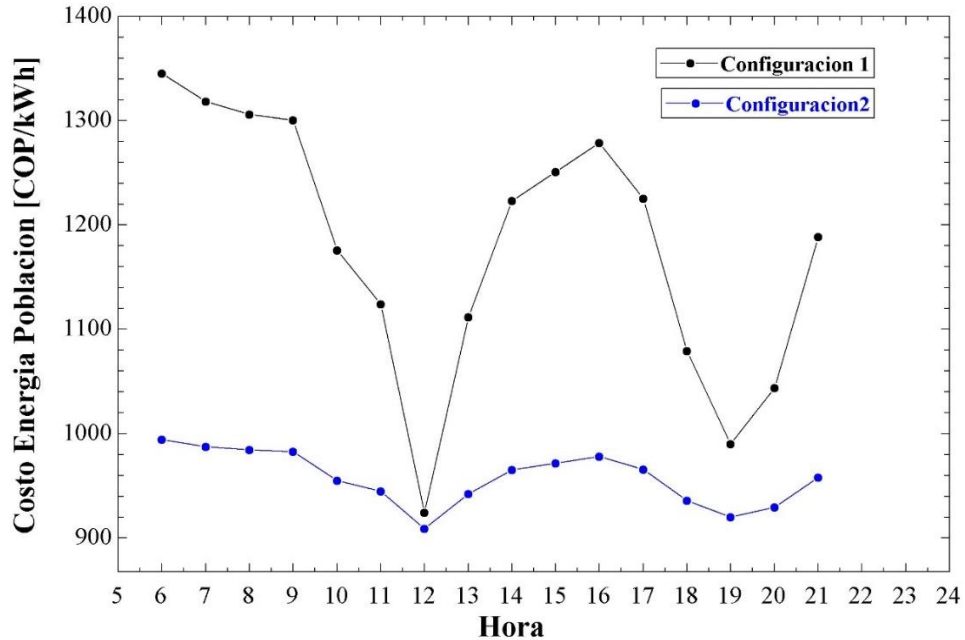
**Grafica 10.** Costo Almacenamiento Segunda Configuración



Fuente: Autores del Proyecto.

De igual manera sucede con el costo de almacenamiento de la segunda configuración que se observa en la Grafica 8 el cual es significativamente mayor al de la primera. El alto costo de las baterías influye drásticamente en el costo de almacenamiento.

**Grafica 11.** Costo Kilovatio-Hora para la Población en Primera y Segunda Configuración

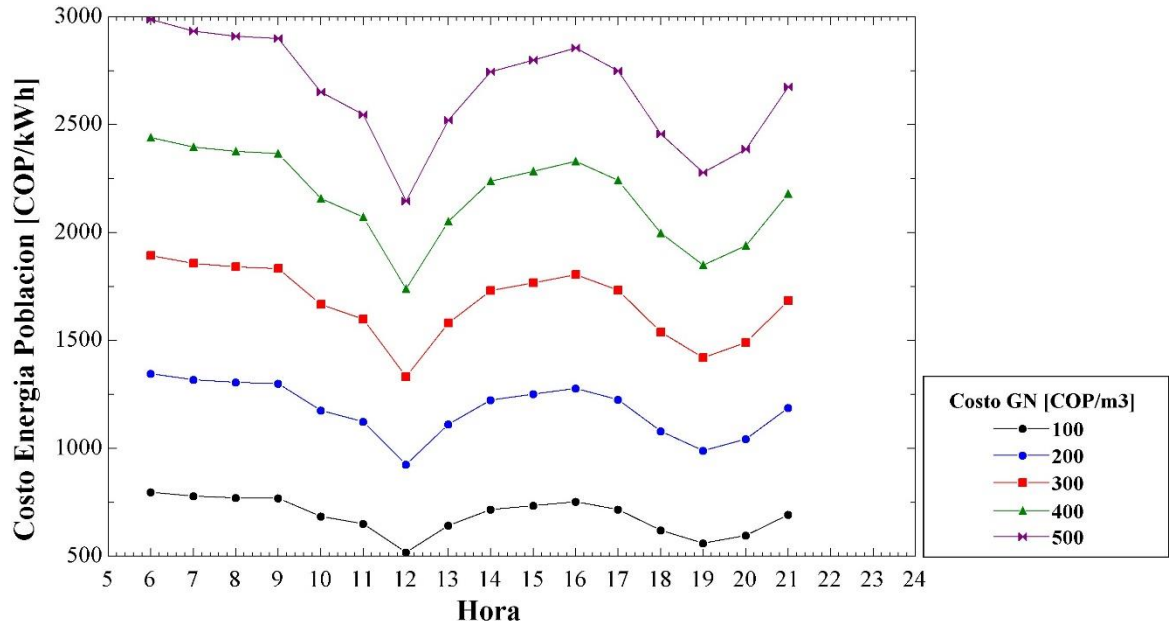


Fuente: Autores del Proyecto.

Finalmente, en la Grafica 9 se muestra el costo de la energía proporcionada a la población por cada hora de demanda para cada configuración estudiada. En la primera configuración con almacenamiento térmico el costo de energía para la población es más alto debido a las irreversibilidades generadas por el motor al trabajar a diferentes cargas horarias. En la segunda configuración el costo de la energía a la población es menor debido al trabajo a carga constante que realiza el motor manteniendo una eficiencia alta en el proceso de conversión, por lo tanto en esta configuración el valor del kilovatio hora para la población se ve afectado por el costo de las pequeñas pérdidas en el almacenamiento de energía en las baterías.

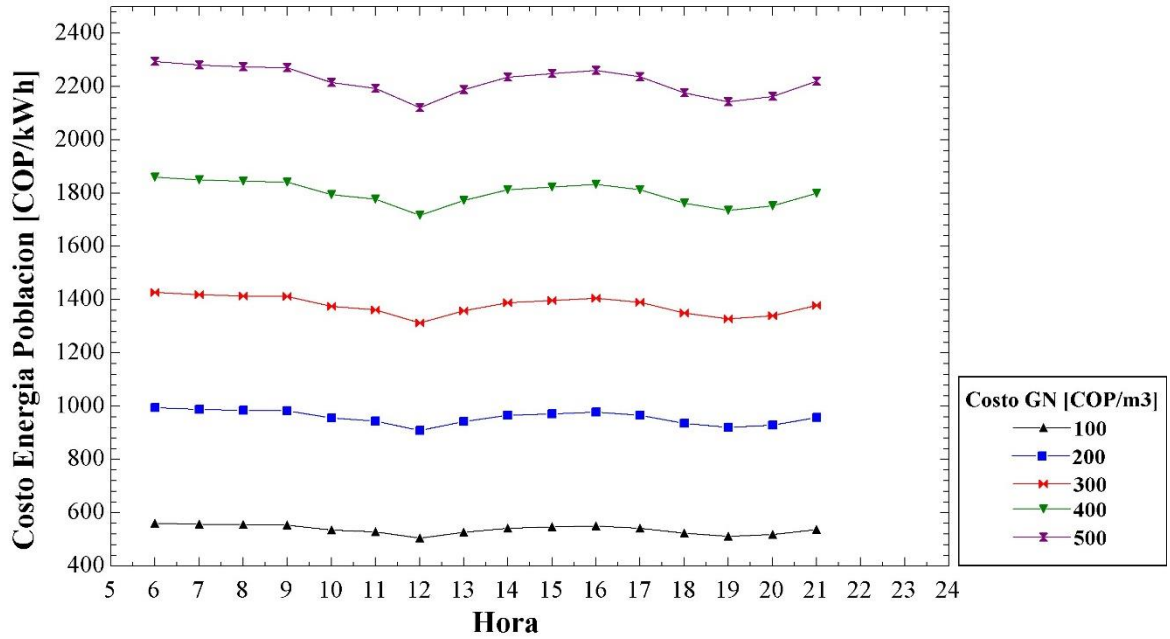
Como parte de la discusión en torno al costo de la energía a la localidad estudiada se hace una sensibilización del costo del gas de síntesis proveniente de la gasificación, al no tener un costo por energía exacto de este gas de síntesis, se estimó el valor del mismo asociándolo con el costo por metro cubico del gas natural. Esto se hizo para ambas configuraciones, los resultados se muestran en el apartado de Anexos, Tabla A 19 y A 20.

**Grafica 12. Variación Costo Energía Población por Variación del Costo del Gas de Síntesis Primera Configuración**



Fuente: Autores del Proyecto.

**Grafica 13.** Variación Costo Energía Población por Variación del Costo del Gas de Síntesis Segunda Configuración



Fuente: Autores del Proyecto.

La variación del costo de energía entregado a la población se observa más estable en la segunda configuración. Es importante resaltar que en ambas configuraciones, el costo del gas de síntesis es el factor más influyente para el análisis exergoeconómico y por ende el costo se repercute directamente en el costo de energía para el caso de estudio.



## CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES

- Se ha logrado modelar el comportamiento de un sistema de generación de potencia basado en motor de combustión interna alimentado con gas de síntesis bajo diferentes configuraciones de almacenamiento de energía para una carga de consumo energético determinada. Las condiciones de este modelado han sido el análisis y evaluación de un día de funcionamiento del sistema donde se supe la demanda de la zona del caso de estudio, se han obtenido resultados que permiten establecer parámetros de comparación entre las configuraciones modeladas como son los indicadores de desempeño (costo de kilovatio hora y costo de almacenamiento).
- Considerando los indicadores de desempeño de los sistemas modelados como (costo de kilovatio hora [COP/kWh], costo de almacenamiento, costo de las Irreversibilidades y costo anual) Se concluye que la mejor alternativa de implementación para la suplir la demanda de la población mediante el motor es la configuración con almacenamiento en baterías al tener un costo máximo de 1,000 [COP/kWh] en las horas con menor consumo, y un costo de 900 [COP/kWh] en el pico de consumo más alto a las 12:00 m. Sin embargo, esta alternativa conlleva altos costos de implementación, reflejados en el precio del banco de baterías de aproximadamente 1'000,000,000 de pesos como se muestra en la Tabla A 16 en la sección de Anexos. Además de ser un sistema con una vida útil menor a la del tanque de almacenamiento.
- Se han determinado parámetros de desempeño de los sistemas modelados como eficiencia, eficiencia exergética, energía almacenada, perdidas exergeticas, además de parámetros de los equipos como son los costos de equipos, costo de operación y costos unitarios en el caso del análisis exergoeconomico. La eficiencia exergética obtenida en cada configuración demuestra que las irreversibilidades de los sistemas son altas principalmente en el motor, por ende se debe reducir las irreversibilidades para obtener mayor eficiencia.
- De acuerdo a los resultados obtenidos en base al análisis del motor, en la segunda configuración el motor trabaja de manera constante al 98% de la carga, favoreciendo su eficiencia. Esto conlleva a obtener un costo de energía entregada a la población más estable y económico, diferente a si trabajara a cargas parciales como es el caso de la primera configuración.

- El costo del gas de síntesis es el parámetro más influyente al momento de determinar el indicador de costo final de energía para consumo. La sensibilización realizada demuestra que el costo de energía es sensible a las variaciones del precio del gas. Esto se evidencia en la variación del costo de la energía a la población debido a la variación del costo del gas de síntesis que para la primera configuración es de aproximadamente 500 [COP/kWh] y para la segunda configuración es de 400 [COP/kWh]. Estos valores son tomados de las Gráficas 11 y 12 respectivamente. Esto implica tener un sistema de gasificación y de plantación energética de caña brava confiable y estable para no obtener variaciones en este aspecto.
- En los resultados del proyecto se determina el costo de almacenamiento de energía en la segunda configuración, obteniendo un valor promedio de 8,800 [COP/kWh] (Ver Gráfico 8), para la configuración uno se tiene un precio promedio de 355 [COP/kWh] (Ver Gráfico 9) de Syngas almacenado. Es importante tener en cuenta que el alcance del proyecto abarca solo las etapas de generación de energía y su almacenamiento, sin considerar el posterior uso de esta energía almacenada para cualquiera de las dos configuraciones. Teniendo en cuenta dicho alcance y analizando estos resultados se concluye que la configuración dos al momento de utilizar la energía almacenada en las baterías hace inviable económicamente dicha configuración debido al alto costo de la energía dispuesta para cubrir la demanda eléctrica mediante la descarga del banco de baterías.

## BIBLIOGRAFIA.

- Al-Sulaiman FA, Dincer I, Hamdullahpur F. Energy and exergy analyses of a biomass trigeneration system using an organic Rankine cycle. Energy [Internet]. 2012; 45(1):975–85. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2012.06.060>
- Balli O, Aras H, Hepbasli A. Thermodynamic and thermoeconomic analyses of a trigeneration (TRIGEN) system with a gas-diesel engine: Part I - Methodology. Energy Conversion and Management. 2010; 51(11):2252–9.
- Baratieri M, Baggio P, Bosio B, Grigiante M, Longo GA. The use of biomass syngas in IC engines and CCGT plants: A comparative analysis. Applied Thermal Engineering [Internet]. 2009; 29(16):3309–18. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2009.05.003>
- Bhaduri, S. (2016). HCCI engine operated with unscrubbed biomass syngas. ELSEVIER.
- Cengel, Y. (2011). Termodinamica. Mc GrawHill.
- Couper, J. R. (1988). Costs of Individual Equipment. En J. R. Couper, Chemical Process Equipment (págs. 663-669).
- Durango Padilla, J. L. (2015). Análisis termoeconómico de gasificación integrada a motores de combustión interna, empleando cascarilla de arroz en el departamento de Córdoba.
- Engineering C, Cost P, Cepci I. Economic Indicators. 2015;(January). estado
- Environmental AN, Analysis I. IMECE2008-67219. 2008;
- Etiqueta EDELA. Mezcla de Gases Mezcla de Gases. 2011; 3–5.
- Fuente JRV. Chemical Process Design [Internet]. Chemical Engineering and Inorganic Chemistry Department. 2015. p. 30. Available from: <http://ocw.unican.es/enseñanzas-tecnicas/procesos-quimicos-de-fabricacion/materiales/Subject 7. Equipment Sizing and Costing OCW.pdf>
- Filippos K. Zisopoulos Msc, F. J.-M. (2015). The Use of Exergetic Indicators in the Food Industry - A Review. Food Science and Nutrition, 55-79.
- Gupta, H. (2006). Fundamentals of Internal Combustion Engines.
- Gurrea, J. (2014). Obtenido de <http://tecnologia-compresores.blogspot.com.co/2010/04/compresor-alternativo-continuacion.html>

Gonzalez NF. Estado del Arte del Uso del Gas de Gasificación Termoquímica de Biomasa (GG), en Motores de Combustión Interna Alternativos. 2003; 128. Available from: <http://oa.upm.es/10905/>

Gupta HN. Fundamentals of Internal Combustion Engines [Internet]. 2006. p. 616. Available from: [http://books.google.co.in/books/about/Fundamentals\\_of\\_Internal\\_Combustion\\_Engi.html?id=MFx4VRErHNoC&pgis=1](http://books.google.co.in/books/about/Fundamentals_of_Internal_Combustion_Engi.html?id=MFx4VRErHNoC&pgis=1)

Huang Y, Wang YD, Rezvani S, McIlveen-Wright DR, Anderson M, Mondol J, et al. A techno-economic assessment of biomass fuelled trigeneration system integrated with organic Rankine cycle. Applied Thermal Engineering [Internet]. 2013; 53(2):325–31. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.03.041>

Inguez-Fernández RND, Andez IA-V, Azquez JJC-P, Erez JSW-C, J. S. Alvarado-González GC, On-Domínguez, et al. Revista Mexicana de Ingeniería Química. Revista Mexicana de Ingeniería Química. 2011; 10(1):17–28.

Instituto de planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas. Soluciones energéticas para las zonas no interconectadas de Colombia IPSE. Ministerio de Minas y Energía [Internet]. 2014; 1–57. Available from: <https://www.minminas.gov.co/documents/10180/742159/09C-SolucionesEnergeticasZNI-IPSE.pdf/2871b35d-eaf7-4787-b778-ee73b18dbc0e>

IEA. (7 de 11 de 2017). International Energy Agency. Obtenido de <https://www.iea.org/>

IPSE. (2016). Memoria de Calculos del Diseño Técnico de Soluciones de Energía Sostenibles.

Khan SM, Aslam A, Iqbal A, Dar AJ. Cost Effectiveness of Waste Heat Recovery and Utilization of a 450 MW Combined Cycle Power Plant. Jordan Engineers Association [Internet]. 2(V). Available from: <http://www.jeaconf.org/uploadedfiles/document/07bc6699-67e3-4e24-bca1-0851d63928e4.pdf>

Kowsary F, Jafari PH. Thermoeconomic comparison between the performance of small-scale internal combustion engines and gas turbines integrated with a biomass gasifier. Energy Equipment and Systems. 2014; 2:57–82.

Kumar R. A critical review on energy, exergy, exergoeconomic and economic (4-E) analysis of thermal power plants. Engineering Science and Technology, an International Journal [Internet]. 2017; 20(1):283–92. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2215098616305821>

Kwon Y-H, Kwak H-Y, Oh S-D. Exergoeconomic analysis of gas turbine cogeneration systems. *Exergy, An International Journal* [Internet]. 2001; 1(1):31–40. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1164023501000073>

Lemmens S. A perspective on costs and cost estimation techniques for organic Rankine cycle systems. *Proceedings of the 3rd International Seminar on ORC Power Systems*. 2015;(2010):1–10.

Moharamian A, Soltani S, Rosen MA, Mahmoudi SMS, Morosuk T. A comparative thermoeconomic evaluation of three biomass and biomass-natural gas fired combined cycles using organic Rankine cycles. *Journal of Cleaner Production* [Internet]. 2017; 161(May):524–44. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.174>

Mondal P, Ghosh S. Exergo-economic analysis of a 1-MW biomass-based combined cycle plant with externally fired gas turbine cycle and supercritical organic Rankine cycle. *Clean Technologies and Environmental Policy*. 2017; 19(5):1475–86.

Monteiro E, Bellenoue M, Sottton J, Rouboa A. Syngas Application to Spark Ignition Engine Working Simulations by Use of Rapid Compression Machine. *Internal Combustion Engines*. 2012;(x):51–74.

Olson A, Nick S, Kush P, Gabe K. Capital Cost Review of Power Generation Technologies. *Western Electric Coordinating Council*. 2014;(March):105.

Pellegrini LF. Luiz Felipe Pellegrini Análise E Otimização Termo-Econômica-Ambiental Aplicada À Produção Combinada De Açúcar, Álcool E Eletricidade Análise E Otimização Termo-Econômica-Ambiental Aplicada À Produção Combinada De Açúcar, Álcool E. 2009; 349.

Proenza Pérez, Néstor. (2011). “Gas pobre: factibilidad de su uso en los motores ZIL-130”, en: *Ingeniería Energética*. Vol. XXXII, 3/2011 Agosto-Noviembre p 1-8

Petrakopoulou F, Tsatsaronis G, Boyano A, Morosuk T. Exergoeconomic and exergoenvironmental evaluation of power plants including CO2 capture. *Chemical Engineering Research and Design* [Internet]. 2011; 89(9):1461–9. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cherd.2010.08.001>

Petrakopoulou F, Tsatsaronis G, Morosuk T, Carassai A. Advanced Exergoeconomic Analysis Applied to a Complex Energy Conversion System. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* [Internet]. 2012; 134(3):31801. Available from: <http://gasturbinespower.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1421314>

Ramos Da Costa YJ, Barbosa De Lima AG, Becerra Filo CR, De Araujo Lima L. Energética and exergética analyses of a dual-fuel diesel engine. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012; 16(7):4651–60.

Lenticelas A, Parellas S, Calaras E, Tatsiopoulos I. Biomass combustion with ORC for decentralized bioenergy applications: A techno-economic approach. 4th European Conference on Economics and Management of Energy in Industry (ECEMEI). 2007.

Rocco M, Toro C. Exergy Based Methods For Economic And Environmental Analysis Applied To A 320 Mw Combined Cycle Power Plant. *Proceedings of the 12th Joint European Thermodynamics Conference, JETC 2013*, Eds M Pilotelli and GP Beretta. 2013; 464–9.

Sarkar J, Bhattacharyya S. Operating characteristics of transcritical CO<sub>2</sub> heat pump for simultaneous water cooling and heating. *Archives of Thermodynamics*. 2012; 33(4):23–40.

Shelar MN, Bagade SD, Kulkarni GN. Energy and Exergy Analysis of Diesel Engine Powered Trigeneration Systems. *Energy Procedia* [Internet]. 2016; 90(December 2015):27–Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1876610216313777>

Soltani S, Mahmoudi SMS, Yari M, Morosuk T, Rosen MA, Zare V. A comparative exergoeconomic analysis of two biomass and co-firing combined power plants. *Energy Conversion and Management* [Internet]. 2013; 76:83–91. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2013.07.030>

Symister OJ. *An Analysis of Capital Cost Estimation Techniques for Chemical Processing*. 2016;

T. J. Kotas. *The exergy method of thermal plant analysis*. Vol. 20, *International Journal of Refrigeration*. 1985. p. 311.

Tobergte DR, Curtis S. Análisis termoeconómico de gasificación integrada a motores de combustión interna, empleando cascarilla de arroz en el departamento de Córdoba. *Journal of Chemical Information and Modeling*. 2013; 53(9):1689–99.

Tsatsaronis G. A General Exergy-Based Method for Combining a Cost Analysis With an Environmental Impact Analysis: Part I --- Theoretical Development. *ASME Conference Proceedings* [Internet]. 2008;(May):453–62. Available from: <http://link.aip.org/link/abstract/ASMECP/v2008/i48692/p453/s1>

V.4 Generacion. Elec. En las ZNI. Tec. Diesel.PDF.

Valero A, Lozano MA, Serra L, Tsatsaronis G, Pisa J, Frangopoulos C, et al. CGAM problem: Definition and conventional solution. Energy. 1994; 19(3):279-86.

Wang JJ, Yang K, Xu ZL, Fu C. Energy and exergy analyses of an integrated CCHP system with biomass air gasification. Applied Energy. 2015; 142:317-27.

Zainal, Z.; S. Bari and Abdullah, M. (2001). Experimental characterization of a batch feed biomass gasifier system for internal combustion engines, 4th International Conference on Mechanical Engineering, December 26-28, Dhaka, Bangladesh/ p. III 93-96.

2013 Hagos Study of syngas combustion parameters effect on internal combustion engine.pdf.

### ANEXOS

**Tabla A 1.** Consumo Volumétrico para el MCI a Cargas Parciales y Gas Natural

Consumos Volumétricos para el MCI trabajando a Cargas Parciales y Gas Natural				
Hora	Carga [%]	Consumo Combustible [m3/hr]	Consumo Aire [m3/hr]	Consumo Mezcla [m3/hr]
0	0	0	0	0
1	0	0	0	0
2	0	0	0	0
3	0	0	0	0
4	0	0	0	0
5	0	0	0	0
6	42.2	62,37	5,307	67,68
7	43.51	63,55	5,407	68,95
8	44.13	64,1	5,454	69,56
9	44.43	64,36	5,476	69,84
10	52.53	71,6	6,092	77,69
11	56.99	75,59	6,431	82,02
12	87.21	102,6	8,728	111,3
13	58.22	76,68	6,525	83,21
14	49.08	68,51	5,83	74,34
15	47.28	66,91	5,693	72,61
16	45.64	65,44	5,568	71,01
17	48.93	68,38	5,819	74,2
18	61.65	79,74	6,785	86,53
19	73.95	90,73	7,72	98,45
20	65.95	83,59	7,112	90,7
21	51.56	70,73	6,018	76,75
22	0	0	0	0
23	0	0	0	0

Fuente: Autores del Proyecto.

**Tabla A 2.** Consumo Volumétrico para el MCI a Cargas Parciales y Gas de Síntesis

<b>Consumos Volumétricos para el MCI trabajando a Cargas Parciales y Gas de Síntesis</b>				
<b>Hora</b>	<b>Carga [%]</b>	<b>Consumo Combustible [m3/hr]</b>	<b>Consumo Aire [m3/hr]</b>	<b>Consumo Mezcla [m3/hr]</b>
6	42.2	27,78	39,89	67,68
7	43.51	28,31	40,65	68,95
8	44.13	28,55	41	69,56
9	44.43	28,67	41,17	69,84
10	52.53	31,89	45,8	77,69
11	56.99	33,67	48,35	82,02
12	87.21	45,69	65,61	111,3
13	58.22	34,16	49,05	83,21
14	49.08	30,52	43,82	74,34
15	47.28	29,81	42,8	72,61
16	45.64	29,15	41,86	71,01
17	48.93	30,46	43,74	74,2
18	61.65	35,52	51,01	86,53
19	73.95	40,42	58,03	98,45
20	65.95	37,23	53,46	90,7
21	51.56	31,51	45,24	76,75

Fuente: Autores del Proyecto

**Tabla A 3.** Consumo Volumétrico para el MCI a Carga Constante y Gas de Síntesis

<b>Consumos Volumétricos para el MCI trabajando a Carga Constante y Gas de Síntesis</b>				
<b>Hora</b>	<b>Carga [%]</b>	<b>Consumo Combustible [m3/hr]</b>	<b>Consumo Aire [m3/hr]</b>	<b>Consumo Mezcla [m3/hr]</b>
-	98.01	49.99	71.78	121.8

Fuente: Autores del Proyecto.

**Tabla A 4.** Estados de Entrada y Compresión para Primera Configuración

<b>Estados Constantes invariables a la Carga del Motor para la Primera Configuración</b>	
<b>Presión</b>	<b>Temperatura</b>
$P_1 = 101.4 [kPa]$	$T_1 = 300[K]$
$P_2 = 2342 [kPa]$	$T_2 = 729.5[K]$

Fuente: Autores del Proyecto.

**Tabla A 5.** Estados de Combustión y Expansión para Primera Configuración

<b>Resultados Etapas de Combustión y Expansión para la Primera Configuración</b>			
<b>Hora</b>	<b>Carga del MCI [%]</b>	<b>Presiones</b>	<b>Temperatura</b>



		$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$T_3$ [K]	$T_4$ [K]
6	42.2	3776	163,5	1176	483,8
7	43.51	3826	165,6	1192	490,2
8	44.13	3849	166,6	1199	493,2
9	44.43	3860	167,1	1203	494,6
10	52.53	4165	180,3	1298	533,6
11	56.99	4333	187,6	1350	555,1
12	87.21	5469	236,8	1704	700,7
13	58.22	4379	189,6	1364	561
14	49.08	4035	174,7	1257	517
15	47.28	3968	171,8	1236	508,3
16	45.64	3906	169,1	1217	500,4
17	48.93	4030	174,4	1255	516,3
18	61.65	4508	195,1	1404	577,6
19	73.95	4970	215,2	1548	636,8
20	65.95	4670	202,1	1455	598,3
21	51.56	4129	178,7	1286	528,9

Fuente: Autores del Proyecto.

**Tabla A 6.** Estados de Combustión y Expansión para Segunda Configuración

Resultados Etapas de Combustión y Expansión para la Segunda Configuración								
Carga [%]	Presiones				Temperatura			
	$P_1$ [kPa]	$P_2$ [kPa]	$P_3$ [kPa]	$P_4$ [kPa]	$T_1$ [K]	$T_2$ [K]	$T_3$ [K]	$T_4$ [K]
98.0	101.4	2342	5875	254.3	300	729.5	1830	752.7

Fuente: Autores del Proyecto.

**Tabla A 7.** Balance de Potencias Primera Configuración

Balance de Potencias Primera Configuración					
Hora	Carga [%]	$\dot{W}_{motor}$ [kW]	$\dot{W}_{pob}$ [kW]	$\dot{W}_{comp}$ [kW]	$\eta_{elec}$ [%]
6	42.2	8.791	6.75	2.041	16.36
7	43.51	9.095	7.11	1.985	16.91
8	44.13	9.238	7.28	1.958	17.17
9	44.43	9.306	7.36	1.946	17.29
10	52.53	11.17	9.573	1.599	20.21
11	56.99	12.2	10.79	1.408	21.59
12	87.21	19.16	19.05	0.1138	28.07
13	58.22	12.48	11.13	1.355	21.94
14	49.08	10.38	8.63	1.746	19.04
15	47.28	9.963	8.14	1.823	18.39
16	45.64	9.584	7.69	1.894	17.76
17	48.93	10.34	8.59	1.753	18.99

18	61.65	13.27	12.07	1.208	22.87
19	73.95	16.11	15.43	0.6816	25.7
20	65.95	14.26	13.24	1.024	23.95
21	51.56	10.95	9.308	1.64	19.89

Fuente: Autores del Proyecto.

**Tabla A 8.** Resultados Análisis Exergético MCI y Generador Primera Configuración

Resultados Análisis Exergético Motor de Combustión Interna y Generador Primera Configuración							
Hor a	Carg a	$\dot{X}_{comb}[kW]$	$\dot{X}_{aire}[kW]$	$\dot{X}_{Q2-3}[kW]$	$\dot{X}_{Q4-1}[kW]$	$\dot{I}_{motor}[kW]$	$\dot{I}_{gen}[kW]$
6	42.2	40.56	0.6984	28.27	1.757	29.55	0.4627
7	43.5	41.33	0.7116	28.91	1.901	29.86	0.4787
8	44.1	41.69	0.7178	29.21	1.971	30	0.4862
9	44.4	41.86	0.7208	29.35	2.004	30.06	0.4898
10	52.5	46.57	0.8018	33.34	3.063	31.74	0.588
11	56.9	49.16	0.8465	35.57	3.76	32.56	0.6421
12	87.2	66.71	1.149	51.12	10.76	35.79	1.009
13	58.2	49.87	0.8587	36.19	3.966	32.77	0.657
14	49.0	44.56	0.7673	31.63	2.58	31.06	0.5461
15	47.2	43.52	0.7493	30.75	2.348	30.68	0.5244
16	45.6	42.56	0.7329	29.94	2.146	30.33	0.5044
17	48.9	44.48	0.7658	31.56	2.561	31.03	0.5444
18	61.6	51.87	0.893	37.92	4.575	33.32	0.6986
19	73.9	59.01	1.016	44.21	7.18	34.88	0.8477
20	65.9	54.36	0.936	40.1	5.41	33.94	0.7507
21	51.5	46	0.7921	32.86	2.923	31.56	0.5762

Fuente: Autores del Proyecto.

**Tabla A 9.** Resultados Análisis Exergético MCI y Generador Segunda Configuración

Análisis Exergético Motor de Combustión Interna y Generador Segunda Configuración						
Carga	$\dot{X}_{comb}[kW]$	$\dot{X}_{aire}[kW]$	$\dot{X}_{Q2-3}[kW]$	$\dot{X}_{Q4-1}[kW]$	$\dot{I}_{motor}[kW]$	$\dot{I}_{gen}[kW]$
98.1	72.99	1.257	56.83	14.28	35.92	1.14

Fuente: Autores del Proyecto.

**Tabla A 10.** Resultados Análisis Exergético Compresor

Resultados Análisis Exergético Compresor					
Hora	Carga [%]	$\dot{X}_{en\ comp} [kW]$	$\dot{X}_{sal\ comp} [kW]$	$\dot{W}_{comp} [kW]$	$\dot{I}_{comp} [kW]$
6	42.2	27.69	28.31	2.041	1.42
7	43.51	26.93	27.53	1.985	1.381
8	44.13	26.57	27.16	1.958	1.363
9	44.43	26.4	26.99	1.946	1.354
10	52.53	21.69	22.18	1.599	1.113
11	56.99	19.1	19.52	1.408	0.9795
12	87.21	1.544	1.579	0.1138	0.0792
13	58.22	18.38	18.8	1.355	0.943
14	49.08	23.69	24.23	1.746	1.215

15	47.28	24.74	25.29	1.823	1.269
16	45.64	25.69	26.27	1.894	1.318
17	48.93	23.78	24.31	1.753	1.22
18	61.65	16.39	16.76	1.208	0.8408
19	73.95	9.247	9.455	0.6816	0.4743
20	65.95	13.89	14.2	1.024	0.7126
21	51.56	22.25	22.75	1.64	1.141

Fuente: Autores del Proyecto.

**Tabla A 11.** Resultados Análisis Termodinámico Compresor

Resultados Análisis Termodinámico del Compresor				
$\eta_{comp}[\%]$	$T_{en}[K]$	$T_{sal}[K]$	$P_{en}[kPa]$	$P_{sal}[kPa]$
0.9	300	595.7	101	1013

Fuente: Autores del Proyecto.

**Tabla A 12.** Resultados Análisis Exergético Tanque de Almacenamiento

Resultados Análisis Exergético Tanque de Almacenamiento					
Hora	Carga [%]	$\dot{X}_{enTK} [kW]$	$\dot{X}_{QTK} [kW]$	$\dot{X}_{ALM} [kW]$	$\dot{I}_{TK} [kW]$
6	42.2	28.31	0.06253	28.25	0.1251
7	43.51	27.53	0.05981	27.47	0.1196
8	44.13	27.16	0.05858	27.1	0.1172
9	44.43	26.99	0.05802	26.93	0.116
10	52.53	22.18	0.04511	22.13	0.09023
11	56.99	19.52	0.03966	19.48	0.07932
12	87.21	1.579	0.01793	1.561	0.03586
13	58.22	18.8	0.03832	18.76	0.07664
14	49.08	24.23	0.05005	24.18	0.1001
15	47.28	25.29	0.05293	25.24	0.1059
16	45.64	26.27	0.05578	26.21	0.1116
17	48.93	24.31	0.05028	24.26	0.1006
18	61.65	16.76	0.03486	16.72	0.06973
19	73.95	9.455	0.02521	9.429	0.05042
20	65.95	14.2	0.03106	14.17	0.06212
21	51.56	22.75	0.04643	22.71	0.09286

Fuente: Autores del Proyecto.

**Tabla A 13.** Resultados Análisis Exergético Banco de Baterías

Resultados Análisis Exergético Banco de Baterías						
Hora	Carga [%]	$\dot{X}_{enBB} [kW]$	$\dot{X}_2 [kW]$	$\dot{X}_1 [kW]$	$\dot{X}_{ALM} [kW]$	$\dot{I}_{BB} [kW]$
6	98.1	15.25	14.95	4.484	10.46	0.305
7	98.1	14.89	14.59	4.378	10.21	0.2978

8	98.1	14.72	14.43	4.328	10.1	0.2944
9	98.1	14.61	14.32	4.295	10.02	0.2922
10	98.1	12.43	12.18	3.654	8.525	0.2485
11	98.1	11.21	10.98	3.295	7.688	0.2241
12	98.1	2.952	2.893	0.8679	2.025	0.05904
13	98.1	10.87	10.65	3.196	7.458	0.2174
14	98.1	13.37	13.1	3.931	9.172	0.2674
15	98.1	13.86	13.58	4.075	9.508	0.2772
16	98.1	14.31	14.02	4.207	9.817	0.2862
17	98.1	13.41	13.14	3.943	9.199	0.2682
18	98.1	9.935	9.736	2.921	6.815	0.1987
19	98.1	6.575	6.444	1.933	4.51	0.1315
20	98.1	8.76	8.585	2.575	6.009	0.1752
21	98.1	12.69	12.44	3.731	8.707	0.2538

Fuente: Autores del Proyecto.

**Tabla A 14.** Irreversibilidades Totales Primera Configuración

Irreversibilidades Totales Primera Configuración							
Hor a	Carg a	$\dot{i}_{motor}[kW]$	$\dot{i}_{gen}[kW]$	$\dot{i}_{comp}[kW]$	$\dot{i}_{TK}[kW]$	$\eta_{exer}[\%]$	$\dot{i}_{TOTALES}[kW]$
6	42.2	29.55	0.4627	1.42	0.1251	16.64	31.56
7	43.5	29.86	0.4787	1.381	0.1196	17.2	31.84
8	44.1	30	0.4862	1.363	0.1172	17.46	31.96
9	44.4	30.06	0.4898	1.354	0.116	17.58	32.02
10	52.5	31.74	0.588	1.113	0.0902	20.56	33.53
11	56.9	32.56	0.6421	0.9795	0.0793	21.95	34.26
12	87.2	35.79	1.009	0.0792	0.0358	28.55	36.91
13	58.2	32.77	0.657	0.943	0.0766	22.31	34.44
14	49.0	31.06	0.5461	1.215	0.1001	19.37	32.92
15	47.2	30.68	0.5244	1.269	0.1059	18.7	32.58
16	45.6	30.33	0.5044	1.318	0.1116	18.07	32.26
17	48.9	31.03	0.5444	1.22	0.1006	19.31	32.89
18	61.6	33.32	0.6986	0.8408	0.0697	23.26	34.93
19	73.9	34.88	0.8477	0.4743	0.0504	26.14	36.25
20	65.9	33.94	0.7507	0.7126	0.0621	24.35	35.46
21	51.5	31.56	0.5762	1.141	0.0928	20.23	33.37

Fuente: Autores del Proyecto.

**Tabla A 15.** Irreversibilidades Totales Segunda Configuración

Irreversibilidades Totales Segunda Configuración						
Hora	Carga	$\dot{i}_{motor}[kW]$	$\dot{i}_{gen}[kW]$	$\dot{i}_{BB}[kW]$	$\eta_{exer}[\%]$	$\dot{i}_{TOTALES}[kW]$

6	98.1	35.92	1.14	0.305	30.14	37.36
7	98.1	35.92	1.14	0.2978	30.14	37.36
8	98.1	35.92	1.14	0.2944	30.14	37.35
9	98.1	35.92	1.14	0.2922	30.14	37.35
10	98.1	35.92	1.14	0.2485	30.14	37.31
11	98.1	35.92	1.14	0.2241	30.14	37.28
12	98.1	35.92	1.14	0.05904	30.14	37.12
13	98.1	35.92	1.14	0.2174	30.14	37.28
14	98.1	35.92	1.14	0.2674	30.14	37.33
15	98.1	35.92	1.14	0.2772	30.14	37.33
16	98.1	35.92	1.14	0.2862	30.14	37.34
17	98.1	35.92	1.14	0.2682	30.14	37.33
18	98.1	35.92	1.14	0.1987	30.14	37.26
19	98.1	35.92	1.14	0.1315	30.14	37.19
20	98.1	35.92	1.14	0.1752	30.14	37.23
21	98.1	35.92	1.14	0.2538	30.14	37.31

Fuente: Autores del Proyecto.

**Tabla A 16.** Costo Equipos Sistema de Generación

Costos Equipos		
Equipo	Z [COP]	Ż [COP/s]
Motor de Combustión Interna	36'710,000	0.5259
Generador Eléctrico	4'078,000	0.05843
Compresor	10'770,000	0.1543
Tanque de Almacenamiento	23'190,000	0.3322
Banco de Baterías	1'000,000,000	14.33

Fuente: Autores del Proyecto.

**Tabla A 17.** Costo Exergoeconómico Unitario Primera Configuración

Costo Exergoeconómico Unitario Primera Configuración [COP/kW]										
Carga	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>3</sub>	c <sub>4</sub>	c <sub>5</sub>	c <sub>6</sub>	c <sub>7</sub>	c <sub>8</sub>	c <sub>9</sub>	c <sub>10</sub>
42.2	0,06496	0	0,3416	0,06496	0,3416	0,09361	0,09361	5,406	0	0,3737
43.5	0,06496	0	0,3354	0,06496	0,3354	0,09332	0,09332	5,647	0	0,3662
44.1	0,06496	0	0,3326	0,06496	0,3326	0,0932	0,0932	5,763	0	0,3628
44.4	0,06496	0	0,3313	0,06496	0,3313	0,09314	0,09314	5,818	0	0,3613
52.5	0,06496	0	0,302	0,06496	0,302	0,09226	0,09226	7,456	0	0,3266
56.9	0,06496	0	0,2896	0,06496	0,2896	0,09232	0,09232	8,468	0	0,3123
87.2	0,06496	0	0,2409	0,06496	0,2409	0,1786	0,1786	18,7	0	0,2568
58.2	0,06496	0	0,2866	0,06496	0,2866	0,09241	0,09241	8,761	0	0,3088
49.0	0,06496	0	0,3132	0,06496	0,3132	0,09248	0,09248	6,729	0	0,3398
47.2	0,06496	0	0,3197	0,06496	0,3197	0,09269	0,09269	6,369	0	0,3475
45.6	0,06496	0	0,3262	0,06496	0,3262	0,09293	0,09293	6,048	0	0,3552
48.9	0,06496	0	0,3137	0,06496	0,3137	0,0925	0,0925	6,699	0	0,3404
61.6	0,06496	0	0,2788	0,06496	0,2788	0,09284	0,09284	9,621	0	0,2998

73.9	0,06496	0	0,2571	0,06496	0,2571	0,09839	0,09839	13,28	0	0,275
65.9	0,06496	0	0,2702	0,06496	0,2702	0,09388	0,09388	10,79	0	0,29
51.5	0,06496	0	0,3049	0,06496	0,3049	0,0923	0,0923	7,247	0	0,3301

Fuente: Autores del Proyecto.

**Tabla A 18.** Costo Exergoeconómico Unitario Segunda Configuración

Costo Exergoeconómico Unitario Segunda Configuración [COP/kW]								
Carga	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>3</sub>	c <sub>4</sub>	c <sub>5</sub>	c <sub>6</sub>	c <sub>7</sub>	c <sub>8</sub>
98.1	0,06496	0	0,2394	0,2394	0,2761	0	1,71	0,2761
98.1	0,06496	0	0,2394	0,2394	0,2743	0	1,744	0,2743
98.1	0,06496	0	0,2394	0,2394	0,2735	0	1,76	0,2735
98.1	0,06496	0	0,2394	0,2394	0,273	0	1,771	0,273
98.1	0,06496	0	0,2394	0,2394	0,2653	0	2,022	0,2653
98.1	0,06496	0	0,2394	0,2394	0,2624	0	2,205	0,2624
98.1	0,06496	0	0,2394	0,2394	0,2524	0	7,416	0,2524
98.1	0,06496	0	0,2394	0,2394	0,2617	0	2,262	0,2617
98.1	0,06496	0	0,2394	0,2394	0,2681	0	1,903	0,2681
98.1	0,06496	0	0,2394	0,2394	0,2699	0	1,848	0,2699
98.1	0,06496	0	0,2394	0,2394	0,2716	0	1,801	0,2716
98.1	0,06496	0	0,2394	0,2394	0,2683	0	1,899	0,2683
98.1	0,06496	0	0,2394	0,2394	0,26	0	2,444	0,26
98.1	0,06496	0	0,2394	0,2394	0,2555	0	3,518	0,2555
98.1	0,06496	0	0,2394	0,2394	0,2581	0	2,726	0,2581
98.1	0,06496	0	0,2394	0,2394	0,266	0	1,987	0,266

Fuente: Autores del Proyecto.

**Tabla A 19.** Costo Energía Población ante Variación del Costo del Gas de Síntesis Primera Configuración

Hora	Costo Gas Natural [COP/m <sup>3</sup> ]				
	100	200	300	400	500
6	797,5	1345	1893	2441	2988
7	779,5	1318	1857	2396	2935
8	771,4	1306	1841	2376	2911
9	767,7	1301	1834	2367	2900
10	684,3	1176	1667	2159	2650
11	649,9	1124	1598	2073	2547
12	517,1	924,3	1332	1739	2146
13	641,5	1112	1582	2052	2522
14	715,9	1223	1730	2238	2745
15	734,5	1251	1767	2284	2800
16	753	1279	1804	2330	2856

17	717,4	1225	1733	2241	2749
18	620	1079	1538	1998	2457
19	560,8	990,1	1419	1849	2278
20	596,5	1044	1491	1939	2386
21	692,7	1188	1684	2180	2675

Fuente: Autores del Proyecto.

**Tabla A 20.** Costo Energía Población ante Variación del Costo del Gas de Síntesis Segunda Configuración

Hora	Costo Gas Natural [COP/m3]				
	100	200	300	400	500
6	560,7	994,1	1427	1861	2294
7	556,3	987,4	1418	1850	2281
8	554,4	984,5	1415	1845	2275
9	553,2	982,6	1412	1842	2271
10	535,1	955,1	1375	1795	2215
11	528,2	944,6	1361	1777	2194
12	504,7	908,8	1313	1717	2121
13	526,6	942,1	1358	1773	2189
14	541,8	965,3	1389	1812	2236
15	545,9	971,5	1397	1823	2248
16	550,1	977,9	1406	1834	2261
17	542,1	965,8	1389	1813	2237
18	522,5	935,9	1349	1763	2176
19	511,9	919,8	1328	1735	2143
20	518,2	929,3	1340	1752	2163
21	536,9	957,8	1379	1800	2220

Fuente: Autores del Proyecto.