

Diseño conceptual de una planta de aire propanado como combustible de respaldo para un campo productor de crudo y gas. Modalidad caso de estudio.

Jorge Alfredo Quesada Tovar y Cristian Giovanni Valencia Grimaldos

Trabajo de grado para optar al título de Ingenieros Químicos

Director

Carlos Augusto Godoy Ruiz

Especialista en Ingeniería del Gas

Codirector

Hernando Guerrero Amaya

PhD. Electroquímica, Ciencia y Tecnología

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2021

Contenido

1. Generalidades de los combustibles	9
1.1 Intercambiabilidad de combustibles gaseosos	10
1.1.1 Índice de Wobbe.....	12
1.2 Intercambiabilidad de gas natural por aire propanado (GNS)	14
2. Estado del arte.....	16
3. Objetivos.....	18
3.1 Objetivo general.....	18
3.2 Objetivos específicos.....	18
4. Descripción metodológica	18
4.1 Diagrama de flujo metodología.....	20
5. Resultados.....	21
5.1 Parámetros de diseño	21
5.1.1 Potencia requerida.	21
5.1.2 Disponibilidad de materias primas	21
5.1.3 Ubicación dentro de la planta.....	22
5.2 Matrices de decisión para elección de equipos de un sistema de aire propanado.....	22
5.2.1 Matriz de decisión para bombas de GLP	23
5.2.2 Matriz de decisión para vaporizador de GLP.....	23
5.2.3 Matriz de decisión para mezclador de GLP	24
5.2.4 Matriz de decisión para compresor.....	25
5.3 Dimensionamiento de equipos seleccionados; Modelamiento y simulación	26
5.3.1 Dimensiones de los equipos.....	29
5.4 Análisis	29
5.5 Diagramas del proceso.....	31
6. Conclusiones	32
Recomendaciones	33
Bibliografía	34

Lista de Figuras

Figura 1 Diagrama de bloques global de producción de aire propanado	10
Figura 2 Rango de inflamabilidad de combustibles comunes	15
Figura 3 Diagrama de flujo principales actividades realizadas.....	20
Figura 4 Esquemmatización de la información de entrada de la simulación GNS	27
Figura 5 Diagrama de flujo utilizado para el cálculo de las corrientes de materia y energía. Caso de estudio.....	2828
Figura 6 Diagrama de bloques sistema Aire Propanado.....	31
Figura 7 Diagrama de flujo de proceso simplificado- sistema de aire propanado	31

Lista de Tablas

Tabla 1 Especificaciones de calidad del gas natural en Colombia	13
Tabla 2 Rango óptimo de relación volumétrica aire/propano definido según el índice de Wobbe	14
Tabla 3 Límites de inflamabilidad de algunos combustibles gaseosos	15
Tabla 4 Consideraciones para el dimensionamiento de los equipos.	29

Lista de anexos

Anexo A. Caracterización de combustibles gaseosos	36
Anexo B. Cromatografía del Gas Natural-Caso de estudio.....	46
Anexo C. Ubicación propuesta dentro de la planta.....	47
Anexo D. Equipos para una planta de GNS (Aire Propanado).....	48
Anexo E. Diagrama de flujo de proceso (PFD) Sistema de aire propanado	65
Anexo F. Simulación proceso Aire Propanado-Caso de estudio	66
Anexo G. Proyección de precios del Diésel en Colombia.....	70
Anexo H. <i>Costos de equipos</i> principales para sistema de aire propanado- <i>caso de estudio</i>	72

Resumen

Título: Diseño conceptual de una planta de aire propanado como combustible de respaldo para un campo productor de crudo y gas. Modalidad caso de estudio *

Autores: Jorge Alfredo Quesada Tovar, Cristian Giovanni Valencia Grimaldos **

Palabras Clave: Aire propanado, Intercambiabilidad, índice de Wobbe, gas natural.

Descripción:

El aire propanado es un tipo de gas natural sintético (GNS), producto de una mezcla de gas licuado de petróleo (GLP) con aire. Esta mezcla se usa como combustible sustituto al gas natural (GN) en procesos de combustión que operan de manera continua y en zonas a las cuales es complicado el transporte del gas natural.

Es posible determinar si dos combustibles pueden sustituirse entre sí evaluando su intercambiabilidad, la cual es un parámetro fijado en normativas nacionales e internacionales y existen diferentes parámetros medibles para su determinación. Uno de estos es el Índice de Wobbe, parámetro tenido en cuenta para el presente caso de estudio.

Para el caso de estudio, un campo productor de crudo y gas ubicado en Sabana de Torres, Santander, los sistemas de generación de energía eléctrica y bombas de transferencia usan como combustible principal el gas natural y como combustible de respaldo diésel. Tomando en cuenta que el campo tiene una planta de gas la cual produce propano licuado, se plantea una propuesta de realizar un diseño conceptual de un sistema de suministro de aire propanado, que reemplace al diésel, buscando una disminución a los costos de combustible.

Para esto, se compiló y depuró información entregada por la operación y luego se cruzó con información obtenida de una revisión bibliográfica con relación a características técnicas y aplicaciones a nivel nacional e internacional, lo que permitió establecer el diseño conceptual de este sistema.

Los principales equipos considerados en este diseño conceptual fueron seleccionados a través de matrices de decisión tomando en cuenta aspectos mencionados en la literatura y sus principales características de proceso fueron estimadas mediante cálculos de ingeniería apoyados por la herramienta de simulación Aspen HYSYS®.

Finalmente, el sistema de suministro de aire propanado proporcionaría hasta 68 MMBtu/h, el cual consta de una bomba de paletas con un requerimiento de potencia de 2,238 kW, un vaporizador de baño de agua de $7,01e^5$ KJ/h, un mezclador de GLP/aire de válvula proporcional y un compresor de 152,4 kW.

*Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Carlos Augusto Godoy Ruiz. Especialista en Ingeniería del Gas. Codirector: Hernando Guerrero Amaya. PhD. Electroquímica, Ciencia y Tecnología.

Abstract

Title: Conceptual design of a propane-air plant as a substitute fuel for a crude and gas producing field: Case study modality*

Authors: Jorge Alfredo Quesada Tovar, Cristian Giovanni Valencia Grimaldos**

Key Words: Propane-air, interchangeability, Wobbe Index, natural gas.

Description:

Propane-air is a type of Synthetic Natural Gas (SNG), product of a mixture of Liquefied Petroleum Gas (LPG) with Air. This mixture is used as a substitute fuel for Natural Gas (NG), in combustion processes that operate continuously and in areas where the transport of NG is complicated.

It is possible to determine if two fuels can be substituted for each other by evaluating their interchangeability, which is a parameter set in national and international regulations and there are different models for its determination. One of these is the Wobbe Index, a parameter taken into account for this work.

For the case, a crude and gas producing field located in Sabana de Torres, Santander, was studied, the electric power generation systems and transfer pumps use natural gas as the main fuel and Diesel as the backup fuel. Taking into account that the field has a gas plant which produces liquefied propane, a proposal is made to carry out a conceptual design of a propane air supply system, to replace Diesel, seeking a reduction in fuel costs.

For this, information provided by the operation was compiled and refined and then it was crossed with information obtained from a bibliographic review in relation to technical characteristics and applications at the national and international level, which allowed to establish the conceptual design of this system.

The main equipment considered in this conceptual design were selected through decision matrices taking into account aspects mentioned in the literature and their main process characteristics were estimated through engineering calculations supported by the Aspen HYSYS® simulation tool.

Finally, the propane-air supply system would provide up to 68 MMBtu/h, which consists of a vane pump with a power requirement of 2,238 kW, a $7,01e^5$ KJ/h water bath vaporizer, a valve LPG/air mixer proportional and a compressor of 152,4 kW.

*Degree Work

** Faculty of Physicochemical Engineering. School of Chemical Engineering. Director: Carlos Augusto Godoy Ruiz. Gas Engineering Specialist. Co-director: Hernando Guerrero Amaya. PhD. Electrochemistry, Science and Technology.

Introducción

Es indiscutible que en la actualidad los recursos energéticos son fundamentales para el desarrollo industrial de cada nación. Colombia no es una excepción a ello. Por lo que en el país se ha hecho necesario la construcción de nuevas tecnologías que, a través de la generación, el ahorro y un adecuado aprovechamiento, minimicen la pérdida de dichos recursos. Hoy en día existe una variedad de fuentes energéticas utilizadas en procesos industriales, sin embargo, en nuestro país la más comercializada es la industria de hidrocarburos, entre ellos el gas natural. Este es obtenido en pozos y es procesado en plantas de gas para convertirse y comercializarse principalmente como combustible.

Una de las empresas comercializadoras de gas natural tratado es PSC, ubicada en Santander en el municipio de Sabana de Torres, la cual produce crudo y gas natural a la vez que usa dicho recurso como combustible en diferentes procesos tales como sistemas de compresión, hornos, sistemas de calentamiento y motogeneradores de energía eléctrica. No obstante, en reiteradas ocasiones se presentan novedades operacionales en la planta de procesamiento de gas, lo que genera una carencia de gas tratado, por lo que la empresa se ve obligada a usar diésel como combustible de respaldo para los motogeneradores (sistemas de combustión dual). Sin embargo, este combustible fósil tiene un costo significativamente más elevado al del gas natural, lo que provoca un mayor aumento en los costos de generación de energía eléctrica e impacta así mismo los costos de operación.

Por lo anterior, y tomando en cuenta la existencia de diferentes fuentes energéticas disponibles en este campo, nace la necesidad de identificar y aplicar tecnologías que permitan reemplazar el diésel por un combustible de respaldo alternativo. El cual debe ser compatible con el gas natural y los equipos utilizados en la planta, de manera que sea más efectivo y económico, disminuyendo así los costos relacionados al combustible de respaldo para la generación eléctrica. Con todo, surge la siguiente pregunta investigativa que pretende responder al problema: ¿Cómo sería el diseño conceptual de un sistema de aire propanado capaz de reemplazar al diésel como combustible de respaldo para los sistemas de generación de energía eléctrica?

1. Generalidades de los combustibles

Se puede definir como combustible a toda materia que pueda arder, es decir, aquella sustancia que sea oxidada para producir energía calorífica ya sea de forma lenta, rápida o instantánea. El gas natural como materia potencialmente inflamable se puede designar, como combustible. Los gases combustibles se caracterizan por la predominancia de las fuerzas de repulsión entre sus moléculas y el gran espaciamiento que entre ellas se genera. Lo que se refleja, por un lado, en su expansibilidad, tendencia a ocupar el mayor espacio posible; y por el otro, en su compresibilidad, la capacidad de reducir su volumen. Según la (Comisión de Regulación de Energía y Gas - CREG, 2003), un gas combustible se define como:

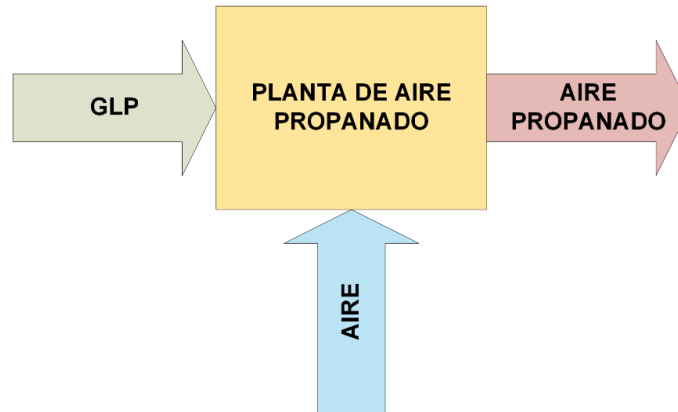
Cualquier gas que pertenezca a una de las tres familias de gases combustibles (gases manufacturados, gas natural y gas licuado de petróleo) y cuyas características permiten su empleo en artefactos a gas según lo establecido en la Norma Técnica Colombiana NTC-3527.

Así pues, para clasificar los gases combustibles en alguna de las tres familias mencionadas se deben tomar en cuenta dos factores importantes: el rango de poder calorífico y el rango en el que se encuentran el índice de Wobbe. De esta manera se puede inferir que el gas natural se halla en la segunda familia de gases combustibles, ya que su poder calorífico está entre 8500 kcal/m^3 y 14500 kcal/m^3 (955 BTU/ft^3 y 1629 BTU/ft^3); y su índice de Wobbe entre 10795 kcal/m^3 y 12343 kcal/m^3 (1213.01 BTU/ft^3 y 1387 BTU/ft^3). En el **ANEXO A** se expone de manera más detallada la clasificación y caracterización de los diferentes combustibles gaseosos tratados en el presente caso de estudio.

Del mismo modo, dentro de la segunda familia de gases se encuentra el gas natural sintético (GNS). El aire propanado es un tipo particular de dicho gas, y se obtiene gracias a la mezcla de aire con propano, cosa que le permite adquirir características semejantes al gas natural. Lo cual hace compatibles a los dos gases (aire propanado y gas natural) respecto a procesos de combustión. La siguiente figura muestra un diagrama global del proceso de producción de aire propanado.

Figura 1

Diagrama de bloques global de producción de aire propanado



1.1 Intercambiabilidad de combustibles gaseosos

La posibilidad de que dos combustibles gaseosos puedan intercambiarse es altamente probable siempre y cuando haya la certeza de que, al cambiar un combustible por el otro, se obtendrá la misma capacidad energética, la cual define la importancia y el valor de un combustible. La probabilidad, y a la vez las limitaciones, de reemplazar un gas por otro dependen, por un lado, de las características fisicoquímicas que tienen los gases en cuestión. Tales propiedades como la gravedad específica, el poder calorífico, el límite de inflamabilidad, entre otras, determinan si dos gases se combustonan de forma similar y, por lo tanto, definen si los gases son compatibles de ser intercambiados.

Por otro lado, (Kuipers, *Interchangeability*, 2007, pág. 28) menciona que la intercambiabilidad de los gases se establece

En la medida del grado en que las características de combustión de un gas se parecen a las de otro gas. Se dice que dos gases son intercambiables cuando un gas puede sustituirse por el otro sin que afecten el funcionamiento de los aparatos de gas o del equipamiento.

Lo que lleva al principal problema de este intercambio de combustibles gaseosos: la disposición y calibración de los equipos utilizados para el proceso. Los cuales están diseñados para trabajar con un combustible específico, por lo que se debe encontrar un combustible de reemplazo que tenga las características apropiadas para ser utilizado sin la necesidad de calibraciones o cambios adicionales en el equipamiento y los accesorios que hacen parte del proceso, tales como cámaras de combustión, quemadores, tuberías, receptores o sistemas de control.

Así mismo, la resolución 084 del 2008 de la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) define la intercambiabilidad de gases como “la capacidad para sustituir un combustible gaseoso por otro, en una aplicación de combustión, sin cambiar la seguridad operativa, la eficiencia y el desempeño en términos del incremento de emisiones contaminantes”. Por lo que debe tomarse en cuenta el equipamiento de la infraestructura, la capacidad energética y la compatibilidad de las características de combustión de los gases.

Por lo anterior, la capacidad de intercambiabilidad debe ser determinada midiendo numéricamente a través de parámetros basados en la relación entre las características fisicoquímicas de los gases y las características propias del fenómeno de combustión, tales como la deflagración, las puntas amarillas o la combustión incompleta. Existen otros parámetros de intercambiabilidad simples que pueden emplearse como el índice de Wobbe, el índice de Knoy y el índice de Schuster, los cuales también usan las propiedades fisicoquímicas de los gases en sus cálculos. Así mismo, algunos parámetros más avanzados tienen en cuenta las propiedades de combustión, como los índices propuestos por la American Gas Association (A.G.A) o el índice de Weaver. Para el presente caso de estudio se tendrá en cuenta específicamente el índice de Wobbe, este por su asertividad y facilidad de empleo resulta válido para gases con poderes caloríficos bajos como lo son el gas natural, el propano, butano y el aire, elementos en los que nos concentramos en el presente estudio.

1.1.1 Índice de Wobbe

El índice de Wobbe (I.W) es un parámetro utilizado para determinar el grado de intercambiabilidad entre gases combustibles. Por un lado, cualitativamente permite clasificar gases y las mezclas entre dichos gases en rangos dentro de determinadas familias, y a su vez, en grupos dentro de estas familias. Al tener las familias y los grupos, compuestos con un cercano índice de Wobbe, y si dos sustancias se encuentran dentro de una misma familia, son intercambiables por principio general. Por otro lado, cuantitativamente el índice de Wobbe se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$I.W = \frac{\text{Poder Calorífico Superior}}{\sqrt{\text{Densidad relativa}}} \quad (1)$$

Como se observa, esta ecuación depende del poder calorífico superior y de la densidad relativa, características propias de los gases combustibles. Siendo así, si dos o más gases combustibles resultan teniendo un índice de Wobbe igual o cercano, esto indica que se pueden intercambiar entre ellos sin necesidad de alterar los sistemas de combustión.

Cabe señalar que la normativa colombiana cuenta con unos parámetros de calidad que el gas natural del país debe cumplir, estas se exponen en la resolución 071 de 1999 de la CREG y fueron actualizadas por medio de la Resolución No. 127 DE 2017. En ellas se muestra un rango de tolerancia respecto al índice de Wobbe, el cual se toma como referencia al momento de evaluar la intercambiabilidad de gas natural por un combustible sintético. Por lo que el índice de Wobbe se tiene en cuenta como el principal parámetro para la intercambiabilidad. A continuación, se muestra en la **Tabla 1** los parámetros de calidad mencionados anteriormente.

Tabla 1*Especificaciones de calidad del gas natural en Colombia*

Especificaciones	Sistema Internacional	Sistema Inglés
Máximo poder calorífico bruto (GHV)	42.8 MJ/m ³	1.150 BTU/ft ³
Mínimo poder calorífico bruto (GHV)	35.4 MJ/m ³	950 BTU/ft ³
Contenido de Líquido	Libre de líquidos	Libre de líquidos
Contenido total de H₂S máximo	6 mg/m ³	0.25 grano/100PCS
Contenido total de azufre máximo	23 mg/m ³	1.0 grano/100PCS
Contenido CO₂, máximo en % volumen	2%	2%
Contenido de N₂, máximo en % volumen	5%	5%
Contenido de inertes máximo en % volumen	5%	5%
Contenido de oxígeno máximo en % volumen	0.1%	0.1%
Contenido máximo de vapor de agua	97 mg/m ³	6.0 Lb/MPCS
Temperatura de entrega máximo	49 °C	120°F
Temperatura de entrega mínimo	7.2 °C	45 °F
Contenido máximo de polvos y material en suspensión	1.6 mg/m ³	0.7 grano/1000 pc
Número de Wobbe *	Entre 46.6 MJ/m ³ y 52.7 MJ/m ³	Entre 1250.0 BTU/ft ³ y 1414.7 BTU/ft ³

Nota. * Calculado con el poder calorífico superior en base volumétrica a condiciones estándar y con la densidad relativa real en las mismas condiciones estándar.

Adaptado de: (COMISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA Y GAS-Ministerio de Minas y Energía, 2017)

De esta manera, para poder alcanzar las características adecuadas de gas natural sintético (GNS) se debe, por un lado, tener un índice de Wobbe dentro de los rangos permitidos cumpliendo con los requerimientos normativos del país; y por el otro, mezclar el gas licuado de petróleo (GLP) y el aire, con una proporción adecuada, de modo que se garanticen en todo momento los porcentajes establecidos. En este sentido, se presentan en la **Tabla 2** las relaciones de GLP/aire en porcentaje volumétrico que, de acuerdo con el índice de Wobbe expuesto en la **Tabla 1**, se garantiza la intercambiabilidad con el gas natural (GN).

Tabla 2

Rango óptimo de relación volumétrica aire/propano definido según el índice de Wobbe

% Vol. Propano comercial	% Vol. Aire	PC [Btu/ft ³]	IW [Btu/ft ³]
58.04	41.96	1,464.77	1,280.00
65.06	34.94	1,641.89	1,414.70

Nota. Información tomada de (Mendoza, 2017)

1.2 Intercambiabilidad de gas natural por aire propanado (GNS)

Como se pudo observar anteriormente, el intercambio de gas natural por una mezcla de gas licuado de petróleo con aire (gas natural sintético) es factible, ya que el propano, componente principal del GLP, presenta suficientes características semejantes al gas natural. Una de las características principales es el límite de inflamabilidad, (Coward & Jones, 1952, pág. 14) mencionan sobre esta que:

Hay claramente dos límites de inflamabilidad, el inferior y el superior, para cada par de los llamados gases combustibles y partidarios de la combustión. El límite inferior corresponde a la cantidad mínima de gas combustible y el límite superior a la cantidad máxima de gas combustible capaz de conferir inflamabilidad a la mezcla.

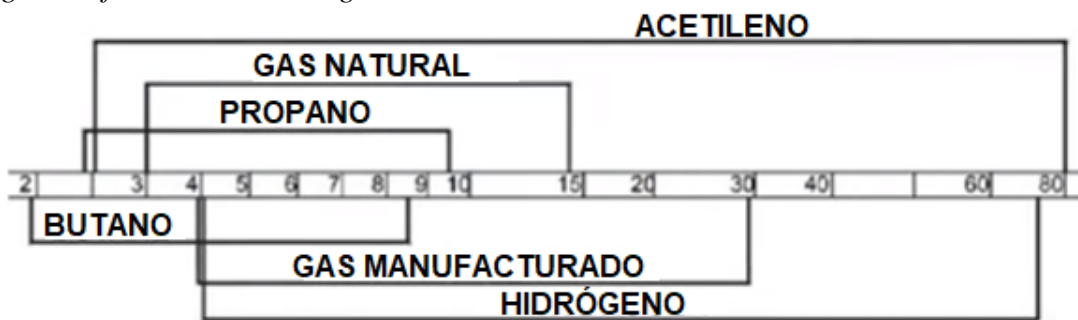
Por lo tanto, se puede advertir que el límite de inflamabilidad se da en un porcentaje del gas combustible mezclado con aire. A continuación, se muestran en la **Tabla 3** los límites de inflamabilidad de los gases involucrados en el proceso.

Tabla 3*Límites de inflamabilidad de algunos combustibles gaseosos*

Combustible	Límite inferior (%Vol)	Límite superior (%Vol)
Gas Natural (Metano)	5	15
Propano	2,2	9,5
Butano	1,4	9,5
GLP	1,8	9,3

Nota. La información contenida en la tabla fue recuperada de: Ingasoil, ficha técnica y hoja de seguridad de GLP; Gryogas, hoja de datos de seguridad de materiales, y Linde, ficha de datos de seguridad.

Con base en la tabla se puede notar que estos combustibles se mueven aproximadamente en el mismo rango de inflamabilidad, en comparación a otros posibles combustibles en el mercado que están fuera del rango. Así como se muestra en la siguiente figura:

Figura 2*Rango de inflamabilidad de algunos combustibles comunes*

Nota. Adaptado de canal Vidagas. (14 de agosto de 2020). Webinar-Sistemas de aire propanado [V]
 Youtube: <https://www.youtube.com/watch?v=gEnVuVxP5hc>

Esto evidencia que los combustibles como el hidrogeno, el acetileno o los gases manufacturados presentan límites de inflamabilidad inferior y superior más lejanos a los del gas natural, respecto a los límites del butano y el propano (ver **ANEXO A**). Lo que quiere decir que tienen propiedades de combustión diferentes.

No obstante, el gas natural y el GLP presentan un diferente poder calorífico, siendo esta una variable de gran importancia para los fines de combustión. El GLP tiene un poder calorífico superior (PCS) de 22244 kcal/m³ muy por encima al del gas natural, que tiene 9200 kcal/m³, por lo que se busca disminuir el PCS del GLP usando la corriente de aire, actuando esta como una especie de “agente disolvente” que permite equiparar esta característica.

2. Estado del arte

En la actualidad es indispensable que las plantas industriales cuenten, en el momento que se haga necesario, con un combustible de respaldo capaz de proporcionar la energía requerida para el funcionamiento normal de estas. En respuesta a esta necesidad existen varias alternativas de combustibles sintéticos, entre ellas el aire propanado, el cual se ha venido presentando según (Jurascik, Sues, & Ptasinski, 2010, pág. 19):

Como una opción ideal para este fin, además de este ser visto a futuro como una opción para resolver los problemas de agotamiento de los combustibles fósiles y su influencia destructiva sobre el medio ambiente, el gas natural sintético (GNS) se sugiere como el importante portador de energía del futuro.

Como lo mencionan los autores, el interés por estos combustibles es cada vez mayor, lo que ha permitido que se dé una mayor relevancia a su estudio y mejoramiento, y se refleja en los numerosos avances teórico/prácticos que se han realizado en las áreas que involucran su síntesis e implementación.

Así mismo, existen varias opciones para la obtención de combustibles sintéticos como la síntesis de GNS a partir del carbón. Una de ella es la obtención durante las diferentes etapas de gasificación, (Chandel & Williams, 2009, pág. 25) mencionan que “*el método de gasificación probado y comercializado para la transformación de carbón a GNS es el proceso de gasificación vapor-oxígeno*”, por lo que este es uno de los procedimientos requerido para la obtención.

Sin embargo, otro método que puede ser efectivo es el que mencionan (Jurascik, Sues, & Ptasinski, 2010), el cual se logra *“usando un proceso de gasificación y posterior metanación del gas obtenido, para después ser tratado y purificado para cumplir los requisitos del gas natural sintético.”* Es decir, que se logra gracias a la transformación de la biomasa. La selección del método de síntesis depende principalmente de la disponibilidad de materias primas en la zona, del requerimiento energético, el costo de su implementación y los beneficios ambientales que este aporte.

Algunas de las empresas internacionales que brindan servicios industriales enfocados en la utilización de plantas de gas sintético son: STANDBY SYSTEMS INC, ALGAS-SDI, Alternate Energy Systems, Inc. De igual manera en el ámbito nacional las empresas más reconocidas que brindan estos servicios son RAYOGAS, y PREMAC. Estas compañías ofrecen a sus clientes un determinado catálogo de sistemas diferenciados por capacidad, requerimientos de presión y/o accesorios.

Casos puntuales en nuestro país son la inclusión de este tipo de sistemas por parte de grandes compañías que buscan prevenir paradas en sus plantas como lo son O-I Peldar, importante empresa dedicada a la fabricación de envases de vidrio y cristalería, la cual implementó recientemente un sistema de 49MM Btu/h de capacidad en una de sus plantas ubicadas en Zipaquirá como respaldo a su combustible principal. De la misma manera la compañía Galletas Noel S.A, cuenta en su planta principal con un sistema de aire propanado equipado con un vaporizador de GLP con capacidad de 58,3MM Btu/h, entre otras. Esto es una muestra de que la utilización de este tipo de combustible como respaldo es una opción viable, contando con casos de éxito a nivel nacional, y que en el país ya se realiza con normalidad y con resultados satisfactorios.

Los avances tecnológicos en esta área están encaminados en la actualización de equipos y obtención del Biopropano a partir de desechos biodegradables, lo que ha permitido que este mecanismo sea visto dentro del conjunto de las energías renovables.

Al tratarse de un sistema de respaldo, con el pasar de los años los estudios y avances se han direccionado a encontrar las condiciones óptimas para poder lograr una intercambiabilidad adecuada entre los gases combustibles, específicamente entre gas natural y GLP.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Desarrollar un diseño conceptual de una planta de aire propanado como combustible de respaldo en un campo de producción de crudo y gas en modalidad caso de estudio.

3.2 Objetivos específicos

- Contextualizar la tecnología de aire propanado y sus aplicaciones en la industria, mediante revisión bibliográfica, para identificar casos de éxito a nivel regional.
- Establecer los aspectos técnicos requeridos basados en información de las aplicaciones preexistentes de esta tecnología, para el dimensionamiento de una unidad de aire propanado en el sector industrial.
- Realizar un estudio técnico conceptual de una unidad de aire propanado como combustible de respaldo, teniendo en cuenta las condiciones actuales de los sistemas de generación eléctrica presentes en el campo (caso de estudio), que servirá como propuesta para reemplazar el consumo de Diésel.

4. Descripción metodológica

Para dar cumplimiento a los objetivos específicos de este proyecto de investigación se establece un plan de trabajo, el cual se estructura mediante la siguiente hoja de ruta, la cual permite obtener resultados significativos para el proyecto. Las principales actividades desarrolladas en su orden fueron:

- Primera etapa: Revisión bibliográfica.

Durante esta etapa se realizó una búsqueda en las bases de datos nacionales e internacionales, que permitieron contextualizar el estado actual del gas natural y el GLP en Colombia y en el mundo, esto con el fin de conocer el comportamiento a la fecha de la oferta, demanda, producción y la proyección de la disponibilidad a futuro, ya que la tecnología abordada

en este libro, su futuro operacional, está directamente ligado a la disponibilidad de estos combustibles a mediano y largo plazo.

Por otra parte, esta etapa permitió identificar actores importantes que han implementado la tecnología de producción de aire propanado facilitando establecer las principales etapas del proceso y sus requerimientos técnicos, finalmente las bases de datos nacionales e internacionales brindaron información significativa en relación con la intercambiabilidad entre el gas natural y el aire propanado (Gas Natural Sintético).

- Segunda etapa: Lineamientos de diseño propuesta de planta.

Con el fin de lograr un correcto diseño del sistema de aire propanado de acuerdo con los requerimientos y especificaciones de la planta, en este apartado se recolectó información sobre los parámetros y variables involucradas en el proceso. Gran parte de esta etapa consistió en la identificación del equipamiento apropiado basado en las características operacionales de estos, para conseguir esto se diseñó una serie de matrices de decisión la cual permite comparar los diferentes equipos disponibles en el mercado con las características del proyecto que se desea estudiar y así escoger el ítem que cumpla con los requisitos. Las diferentes matrices se realizaron con indagaciones en el contexto colombiano actual, los equipos dispuestos en estas hacen parte del mercado colombiano en diferentes empresas.

- Tercera etapa: Síntesis y especificaciones del diseño final

Con los equipos seleccionados de acuerdo con las matrices de decisión, se procedió a hacer un dimensionamiento de estos, utilizando el software Aspen HYSYS[®] 8.8, en el cual se simuló el proceso en estudio, dando como resultado las variables de diseño de los equipos involucrados. El modelamiento se realizó teniendo en cuenta las siguientes consideraciones y especificaciones:

- Para modelar el comportamiento del vaporizador de baño de agua se optó por un intercambiador de calor de carcasa y tubo.
- Para dimensionar el mezclador se calculó el área óptima de vaporización de GLP, la cual se toma como un indicativo para tener un tiempo de mezclado o de residencia dentro del mismo y así calcular sus dimensiones.

- La corriente de aire presurizado se simuló asumiendo un flujo seco y libre de partículas, esto teniendo en cuenta que el sistema propuesto real presenta una serie de filtros de pretratamiento de este, los cuales no se incluyen dentro de la simulación.
- Los equipos de bombeo y compresión son simulados de manera estándar, con el fin de hallar únicamente el requerimiento energético demandado por estos.

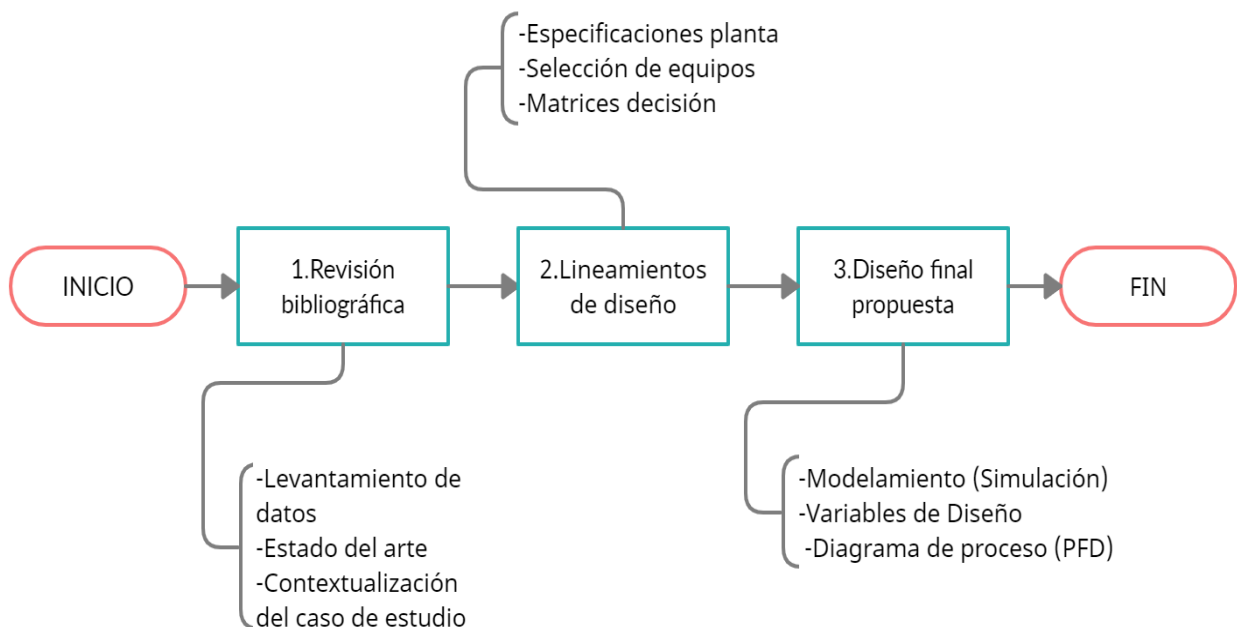
Las figuras y presentación detallada del modelamiento se presentan en el **ANEXO F**.

Posterior a esto, con los datos anteriormente obtenidos se realizó un diagrama de flujo del proceso (PFD) expuesto en el **ANEXO E**, donde se sintetizan técnicamente los resultados hallados. Como resultado final, se realiza la propuesta del sistema para producción de aire propanado adecuado para la planta.

4.1 Diagrama de flujo metodología

Figura 3

Diagrama de flujo principales actividades realizadas



5. Resultados

5.1 Parámetros de diseño

En este tipo de operaciones se ven involucradas diferentes variables, unas asociadas al fenómeno propio de la operación y otras variables asociadas a la puesta real del proyecto, las evaluadas en la propuesta en estudio son:

5.1.1 *Potencia requerida.*

El flujo de gas natural demandado actualmente por la planta en su funcionamiento normal es de 1'400.000 ft³ al día, esta es la cantidad con la que debe diseñarse el sistema en estudio para poder suplir una ausencia de combustible, en términos de potencia este flujo representa 66'634.117 Btu/h. Esta potencia se halla usando la cromatografía del gas natural operado en la planta (ver **ANEXO B**).

5.1.2 *Disponibilidad de materias primas*

La disponibilidad de materias primas es uno de los parámetros más importantes en cualquier proyecto en la industria y representa un gran porcentaje del costo de este, en especial la formación de un combustible como el gas natural sintético, donde se busca aprovechar algún tipo de material disponible en el sitio, para ser utilizado como materia prima de la síntesis. Debido a esto en este proyecto se busca aprovechar el Gas licuado de Petróleo (GLP) producido en la planta para ser usado en el sistema de aire propanado para la obtención del combustible sintético, estando así garantizada la disponibilidad de materias primas en todo momento.

Este GLP, se encuentra almacenado en tanques horizontales, donde el combustible está en equilibrio en fase líquido-gas, el sistema de bombeo se debe conectar al tanque por el fondo de este para llevar el combustible líquido hacia el sistema de vaporización. El aire necesario para realizar la mezcla se propone ser captado del ambiente y llevado por un pretratamiento que debe constar de un sistema de filtrado para la remoción de partículas indeseadas.

5.1.3 Ubicación dentro de la planta.

La planta con ubicación en el municipio de Sabana de torres, Departamento de Santander, campo de producción de crudo y gas PSC, la cual se toma como base para el diseño y propuesta del sistema de Aire Propanado. Dentro del campo se propone ubicar el sistema de GNS en una zona estratégica en la cual hay disponibilidad de espacio, se procura cercanía a los tanques de almacenamiento de combustible o a una línea de estos y que sea dentro de una zona clasificada para tal uso.

De acuerdo con lo anterior y teniendo en cuenta el espacio físico posible ocupado por los equipos, se selecciona un terreno disponible de 100m², clasificado en Grupo 1 División 2, como se muestra en el plano e imagen superior, adjunto en el **ANEXO C**, el cual cumple con las especificaciones dichas.

5.2 Matrices de decisión para elección de equipos de un sistema de aire propanado

Estas matrices cuentan con el análisis de diferentes equipos para una planta de aire propanado. Los criterios de selección se tomaron de la literatura y los diferentes casos de implementación. En el **ANEXO D** se ahonda en la información técnica más relevante de las diferentes opciones para los equipos de proceso.

Las matrices están diseñadas de tal forma que los criterios de selección se despliegan de forma horizontal y los tipos de equipos que se utilizan en plantas de aire propanado de forma vertical. Los cuadros sombreados indican que el equipo **cumple** con el criterio seleccionado; y los cuadros sin sombrear indican que el equipo **no cumple** con criterio seleccionado.

5.2.1 Matriz de decisión para bombas de GLP

Los criterios de selección se basaron en: ausencia de contacto metal con metal, debido a que es importante evitar ignición dentro de la bomba. Se evaluó como segundo criterio el no requerimiento de válvulas adicionales de control de contrapresión, para mantener flujo constante y evitar paradas del sistema. El tercer parámetro es la capacidad de la bomba para operar con fluidos de densidades menores o iguales a 0.535 g/cm^3 con el fin de mantener la eficiencia de la bomba. Como cuarto criterio poseer un sistema para supresión de cavitación con revestimientos que evite problemas de pérdidas de flujo o daños en tuberías. Como último criterio, bajo tiempo de mantenimiento por tiempo de servicio.

SÍ CUMPLE CON EL CRITERIO	
NO CUMPLE CON EL CRITERIO	

		Criterios de Selección				
		Ausencia de contacto metal con metal	No requiere Válvula de control de contrapresión	Operación con fluidos de densidad aprox $0,535 \text{ g / cm}^3$	Posee sistema para supresión de cavitación	Bajo tiempo de mantenimiento por tiempo de servicio.
Bomba	Centrifuga					
	Engranajes					
	Turbina Regenerativa					
	Paletas					

La bomba de paletas cumple con los criterios de selección para el funcionamiento en el caso de estudio, esto sustentado en que el diseño de una bomba de paletas deslizante es propicio para gases licuados ya que brinda una alta eficiencia energética, operación sin problemas y bajo costo de mantenimiento (Blackmer- PSG , 2020).

5.2.2 Matriz de decisión para vaporizador de GLP.

Los criterios de selección para vaporizadores de GLP en sistemas de aire propanado que se tuvieron en cuenta son: la disponibilidad de una fuente de energía que provea al equipo la potencia que este requiera para su funcionamiento, se tiene en cuenta que el caso de estudio, el campo cuenta con diversas fuentes de energía excepto vapor de agua. El segundo criterio es el análisis del factor de riesgo que posee el equipo al trabajar con GLP, esto es primordial para mantener la seguridad operativa en la planta. Como tercer criterio, se evalúa la implementación del equipo en sistemas de GNS, es importante contar con equipos que actualmente se utilicen con este fin en sectores industriales. El cuarto criterio hace referencia a la posibilidad de transportar o trasladar el equipo de un lugar a otro. Como quinto criterio de selección, se tomó el punto presión máxima de descarga a 250 PSIG el cual garantiza una seguridad al momento de presentarse sobrepresiones.

SÍ CUMPLE CON EL CRITERIO	
NO CUMPLE CON EL CRITERIO	

		Criterios de Selección				
		Disponibilidad fuente de energía	Bajo factor de riesgo con GLP	Frecuentemente implementado en sistemas GNS en sector industrial	Equipo portable	Presión máxima de operación 250 PSIG
Vaporizador	Eléctricos					
	Vapor de agua					
	Fuego directo					
	Baño de agua					

Se seleccionó el vaporizador de baño de agua ya que cumple la mayoría de los criterios excepto el cuarto referido a la portabilidad del equipo, sin embargo, para este caso de estudio la operación se realiza en el mismo lugar a largo plazo y por esto no es indispensable el traslado del equipo.

5.2.3 Matriz de decisión para mezclador de GLP

El primer criterio es el mecanismo de mezclado automatizado que permite un desempeño óptimo para servicios de larga duración, como segundo criterio se evaluó la capacidad del

mezclador para operar con presiones hasta de 125 psig, en el mismo sentido el tercer criterio evalúa la necesidad contar o no con suministro de energía eléctrica, como último criterio, se requiere que el mezclador garantiza un mezclado con precisión +/- 1%.

SÍ CUMPLE CON EL CRITERIO	
NO CUMPLE CON EL CRITERIO	

		Criterios de Selección			
		Mecanismo de mezcla automatizado	Presión de operación de 125psig	No requiere energía eléctrica	Precisión de Mezcla +/- 1%
Mezclador	Tipo Venturi				
	Válvula Proporcional				

El mezclador que se ajusta de mejor manera a los criterios de selección es el de válvula proporcional, el cual cuenta con altas capacidades de mezclado, presiones de operación requeridas, sistema de control para el monitoreo de la mezcla y con una precisión confiable. No obstante, este equipo requiere un suministro de energía eléctrica, lo cual para el presente caso de estudio no es un parámetro que presente inconvenientes.

5.2.4 Matriz de decisión para compresor

Los criterios de selección para un compresor que se ajuste a los requerimientos de la planta de aire propanado caso de estudio son: la implementación de estos en suministros de aire para sistemas de GNS, la capacidad de entrega de aire totalmente seco y limpio, para evitar cambios en el índice de Wobbe, además se evalúo como tercer criterio el requerimiento de una fuente eléctrica como energía motriz, como siguiente criterio la capacidad de succión desde el ambiente y para finalizar se tuvo en cuenta la presión de descarga, la cual debe ser 150 psig para la implementación en sistemas de altas presiones.

SÍ CUMPLE CON EL CRITERIO	
NO CUMPLE CON EL CRITERIO	

		Criterios de selección				
		Implementados en suministro de aire para GNS	Suministro de aire totalmente seco	Requiere energía eléctrica como energía motriz	Succión desde el ambiente	Presión de descarga de 150 Psig
Compresores	Centrifugo					
	Tornillo					

El compresor que mejor se ajusta a los criterios de selección es el de tornillo ya que trabaja con caudales altos y además a este se le conectan equipos auxiliares como filtros de aceite y secadores refrigerativos con el fin de cumplir con los requerimientos de calidad del aire y así mantener la mezcla aire/GLP en las condiciones deseadas.

5.3 Dimensionamiento de equipos seleccionados; Modelamiento y simulación

Las variables de diseño de los equipos seleccionados fueron calculadas por medio de un modelamiento del sistema de aire propanado, complementando los resultados obtenidos en las matrices de decisión para los equipos. Esta simulación permitió evaluar el cumplimiento de los requerimientos energéticos del campo en estudio, garantizar la composición de la mezcla deseada y dimensionar dichos equipos.

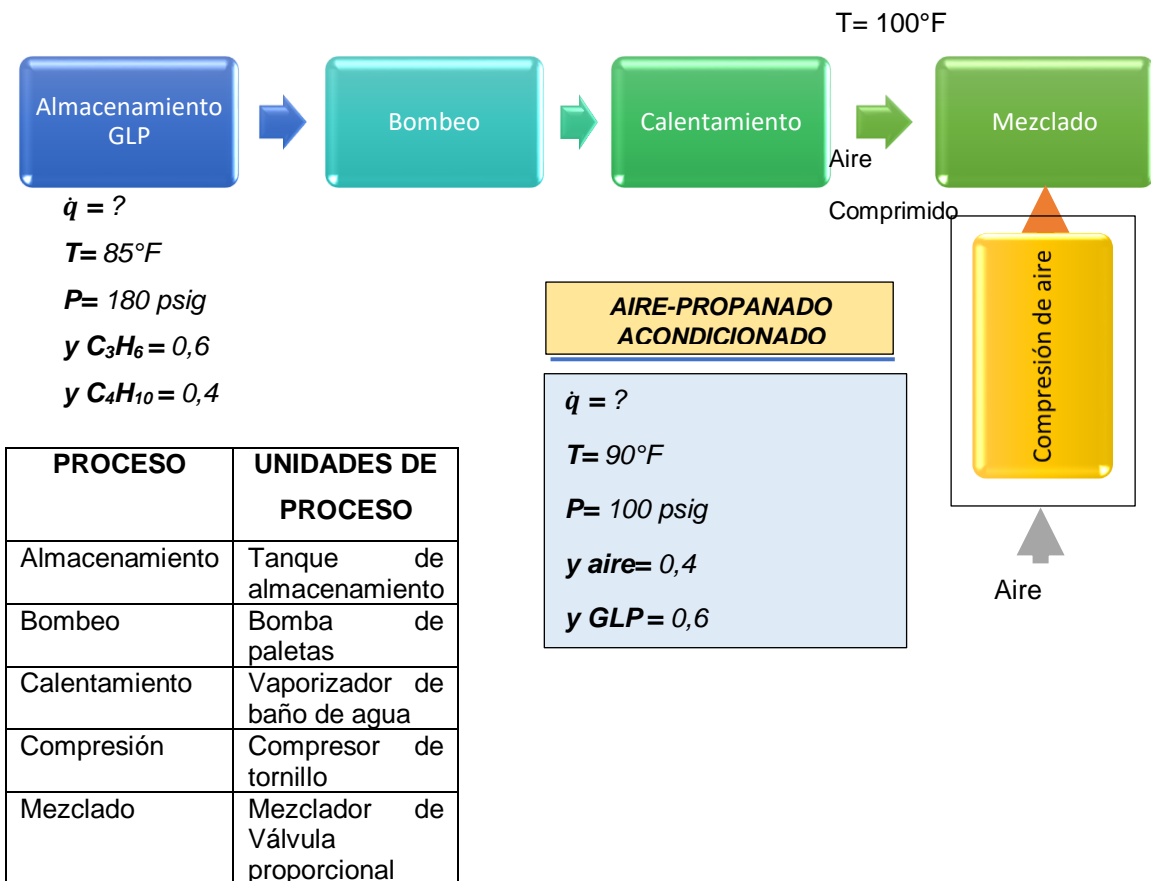
- **Simulación del proceso de producción de gas natural sintético mediante una mezcla de GLP y aire.**

La información compilada en campo y los aspectos técnicos más relevantes encontrados en la literatura para un sistema de gas natural sintético permitieron plantear la ruta de obtención y

establecer las unidades de proceso con sus correspondientes condiciones de operación y se presentan en la Figura 4.

Figura 4

Esquematación de la información de entrada de la simulación GNS



- **Estrategia de simulación**

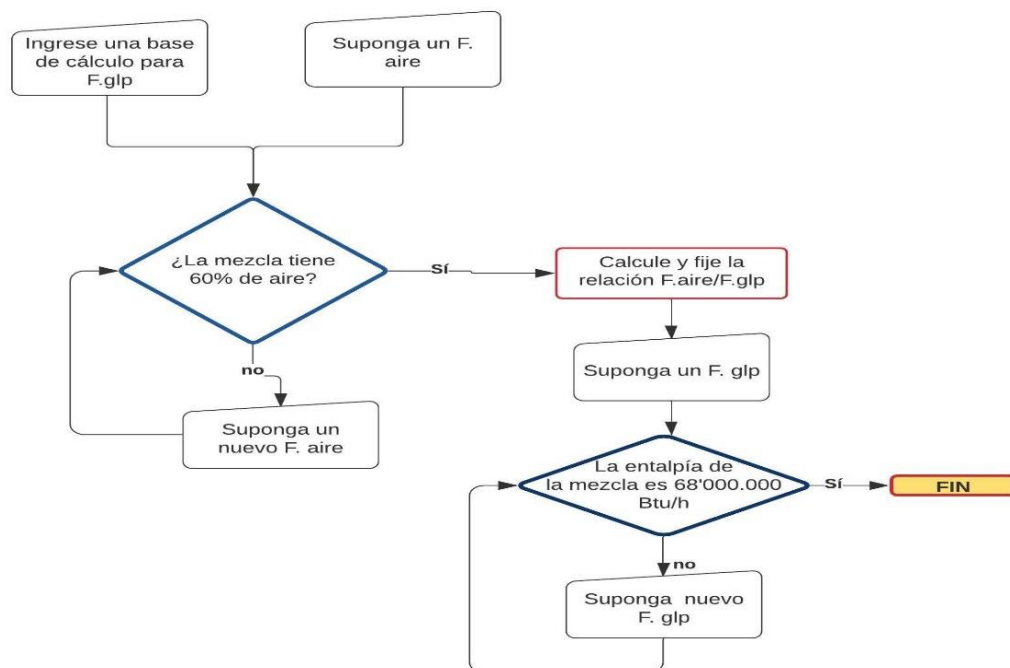
Luego de haber ingresado la información de entrada en el software (definición de corrientes y equipos), es necesario seguir una estrategia de cálculo para poder alcanzar los objetivos de la simulación relacionados con las características fisicoquímicas de la mezcla gaseosa luego del proceso de acondicionamiento. En dicha estrategia se necesita de cálculos iterativos, que permitan encontrar la relación de flujos adecuada para garantizar la composición final, y el flujo adecuado

de GLP que permita obtener la potencia requerida (68'000.000 Btu/h). En la **Figura 5** se resume la estrategia aplicada en la simulación para el cálculo de las corrientes de materia y energía.

Los parámetros cinéticos necesarios para simular la combustión del GLP, fueron consultados en (JACHIMOWSKI, 1984) para el propano y (PITZ & WESTBROOK, 1984) para el butano.

Figura 5

Diagrama de flujo utilizado para el cálculo de las corrientes de materia y energía. Caso de estudio



Para realizar los pasos iterativos mencionados anteriormente, se utilizaron tres herramientas lógicas disponibles en el programa; el flujo de aire necesario para lograr una fracción de 0,4 en el aire acondicionado se ajustó con la herramienta *Adjust*. La relación de flujos entre aire y GLP se calculó con la herramienta *spreadsheet*. La relación de flujos se fijó utilizando la herramienta *SET*, y finalmente el ajuste del flujo de GLP necesario para tener una potencia de 68'000.000 Btu/h se hizo nuevamente con la herramienta *Adjust*. En cuanto al dimensionamiento de los equipos, se emplearon los resultados obtenidos en el programa para ciertas unidades, mientras que para las demás se utilizaron las consideraciones mencionadas en la **Tabla 4**.

Tabla 4*Consideraciones para el dimensionamiento de los equipos.*

Equipo	Consideración
Tanque de almacenamiento	Sobredimensionamiento del 20%
Bomba	Cálculo de la potencia requerida.
Intercambiador de Tubos y carcaza	Calentamiento con agua saturada.
Compresor	Cálculo de la potencia requerida.
Mezclador De válvula proporcional	Mezclador con mecanismo tubular sin consideración de volumen (no presenta tanque)

El ANEXO F recopila información más detallada sobre los resultados obtenidos directamente dentro de la simulación.

5.3.1 Dimensiones de los equipos

Teniendo en cuenta la evaluación de los equipos por medio de las matrices de decisión y la simulación realizada, se obtiene que el sistema de aire propanado debe constar de una bomba de paletas con un requerimiento de potencia de 2,238 kW, un vaporizador de baño de agua de $7,01e^5$ KJ/h, un mezclador de GLP/aire de válvula proporcional y un compresor de 152,4 kW.

5.4 Análisis

En un análisis integral es necesario evaluar la factibilidad de la implementación de este sistema de respaldo, pasando por el aspecto económico, pero dándole un gran peso de importancia a los beneficios operacionales que este trae consigo, tales como garantizar la continuidad de actividades, la optimización de recursos disponibles, además de ir a la vanguardia en el uso de GNS, así mismo de contar con una tecnología considerada ambientalmente amigable, encaminada a los objetivos energético ambientales del país y el mundo.

Respecto al ámbito económico, el gasto de Diésel actual en el campo para suplir al Gas Natural es de 1350 galones al mes (dato suministrado por la operadora), tomando como referencia el precio

actual de este combustible en el mercado nacional para la zona de Bucaramanga, Santander, a fecha de diciembre del 2020, que es de 8023 COP por galón (Ministerio de Minas y Energía, 2020)

El costo mensual por su uso es: $1350 \frac{\text{Gal}}{\text{mes}} * 8023 \frac{\text{COP}}{\text{Gal}} = 10'831.050 \frac{\text{COP}}{\text{mes}}$

Lo que se traduce en $130'000.000 \frac{\text{COP}}{\text{año}}$

Este gasto es permanente y se espera su incremento de acuerdo con las alzas del valor de este combustible en el mercado nacional, según las proyecciones de la UPME 2015-2035 (**ANEXO G**), el Diésel tendrá un aumento casi constante en su precio a mediano y largo plazo. Se busca que este gasto sea suprimido en su totalidad con la implementación del sistema de aire propanado, además de esto, el Diésel reemplazado puede entrar a ser parte del combustible empleado en la flota de vehículos de la planta, lo que representaría un ahorro en la adquisición del combustible para estos, o en otra actividad que se requiera.

Con el fin de tener una referencia en términos económicos de la inversión inicial en este tipo de proyectos, en el **ANEXO H** se encuentran los precios estimados de cada uno de los equipos que se ajustan a las necesidades del caso de estudio.

Es necesario además realizar el cálculo del costo por millón de Btu de los dos combustibles en cuestión.

- Precio GNS MMBtu/h = **13071,71 COP**
- Precio Diésel MMBtu/h= **60220 COP**

El costo del uso de Diésel es notablemente superior al costo que sería trabajar con aire propanado en la planta en estudio.

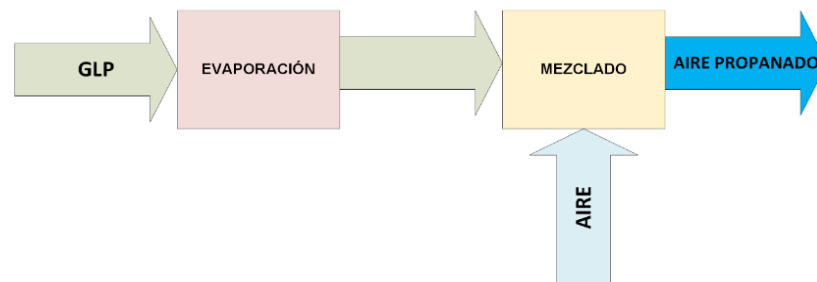
5.5 Diagramas del proceso

Esta propuesta y diseño conceptual incluyen diagramas de bloque y de flujo que muestran el recorrido inicial de las materias primas hasta su transformación en gas natural sintético, así mismo un diagrama PFD especificando los equipos involucrados en el proceso, su capacidad, flujo y tamaño.

Como se vio en la **Figura 1**, el proceso global consta de dos entradas y una salida, en la **Figura 6** se muestran las operaciones principales que ocurren dentro, una de ellas es la evaporación, la cual consiste en un cambio de estado del GLP líquido a gas, posterior a esto hay un mezclado de las dos corrientes, la corriente producto de este mezclado debe cumplir la composición expuesta en la **Tabla 2**, la cual se debe garantizar en todo momento.

Figura 6

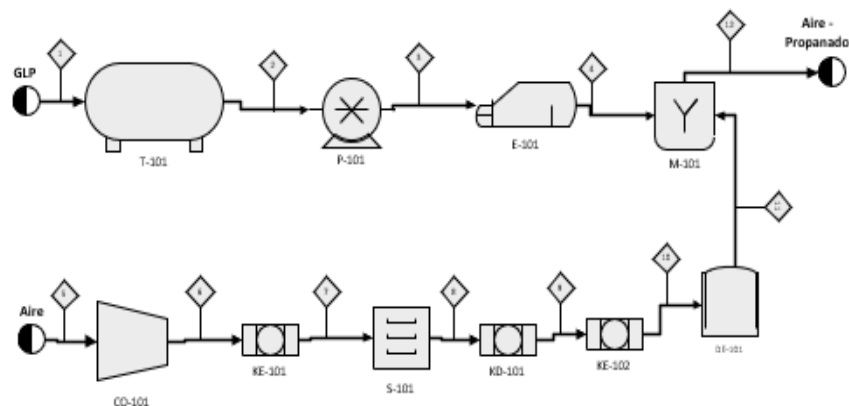
Diagrama de bloques sistema Aire Propanado



El diagrama de flujo de proceso (PFD) simplificado se presenta en la **Figura 7**, el cual se presenta completo en el ANEXO E.

Figura 7

Diagrama de flujo de proceso simplificado- sistema de aire propanado



6. Conclusiones

- Un sistema de producción de aire propanado (GNS) representa una alternativa factible debido al bajo número de equipos que componen el sistema y su disponibilidad en el mercado nacional.
- En Colombia se cuenta con una legislación en torno a este tipo de combustible (GNS), la cual permite fijar los parámetros de calidad que debe tener el producto de este sistema.
- La implementación de este sistema en el caso de estudio que refiere este trabajo representa un aprovechamiento de GLP disponible en la planta, lo que permite prescindir del Diésel, como combustible de respaldo, disminuyendo impactos ambientales y costos asociados a este combustible.
- La implementación del sistema de aire propanado referido en este trabajo, representaría una disminución de 4,6 veces en el costo del combustible de respaldo, en relación con el Diésel.
- Las matrices de decisión diseñadas en este trabajo fueron una guía para la selección de equipos en el caso de estudio, las cuales podrán ser implementadas en proyectos similares de la industria, facilitando la identificación de los principales aspectos de diseño.
- Se logra establecer el diseño del sistema para el caso de estudio siguiendo los criterios de selección expuestos en las matrices de decisión y realizando la simulación teniendo en cuenta los requerimientos energéticos de la planta, conformado por una bomba de paletas de potencia 2,238 kW, un vaporizador de baño de agua $7,01e^5$ KJ/h, un mezclador de GLP/aire de válvula proporcional y un compresor de 152,4 kW.

Recomendaciones

- Realizar un diseño de tuberías y/o sistema de transporte adecuado para hacer llegar el GNS hacia lugar de destino que sea requerido.
- Realizar un estudio técnico – económico que permita evaluar diferentes aspectos o índices ligados a la rentabilidad del proyecto.
- Evaluar la intercambiabilidad del presente caso de estudio mediante los criterios múltiples propuestos por AGA y métodos gráficos, para corroborar los resultados obtenidos en el presente libro.
- Evaluar las matrices de decisión para ampliar el espectro de toma de decisiones para implementar sistemas de aire propanado en diferentes sectores industriales.

Bibliografía

- Algas - SDI. (2020). *Mezcladores de aire / glp blendaire ii*. Obtenido de <https://algas-sdi.com/natural-gas-sng/blendaire-ii-lpg-air-mixers/>
- Algas SDI. (2020). *GA500 Process Gass Calorimeter*. Seattle, Washington: Algas - SDI.
- Alternate Energy Systems, Inc. (s.f.). *Mezcladores de aire / LP tipo Venturi HVS*. Obtenido de <https://alternate8596.com/products/mixersblenders/hvs-venturi-type-lpair-mixers/>
- Ampegas, Blackmer. (07 de 06 de 2015). *Eficiencia En El Bombeo De Gas Licuado De Petroleo*.
- Atlas Copco. (2019). *Filtros de aire comprimido*. VN , Belgica.
- Blackmer- PSG . (2020). *Bombas de desplazamiento positivo y compresores libre de aceite para aplicaciones de gas licuado*. Grand Rapids.
- Chandel, M., & Williams, E. (2009). *Synthetic Natural Gas (SNG): Technology, Environmental Implications, And Economics*. Duke University.
- Comisión de Regulación de Energía y Gas - CREG. (2003). *Resolución 011. Art.2*.
- Comisión de Regulación de Energía y Gas. (2008). *Especificaciones de calidad del gas natural en el punto de entrada del sistema nacional de transporte de gas*. CREG.
- Comisión de Regulación de Energía Y Gas-Ministerio de Minas y Energía . (2017). *RESOLUCIÓN No. 127*.
- Compresores de Aire . (2020). *Compresores centrífugos para que se utilizan funcionamiento, componentes y ventajas*. Obtenido de <https://compresoresdeaire.xyz/centrifugos/>
- Compresores de Aire. (2020). *Compresores de Tornillo para que se Utilizan Funcionamiento, Componentes y Ventajas*. Obtenido de <https://compresoresdeaire.xyz/tornillo/>
- Coward, H. F., & Jones, G. W. (1952). *Limits of Flammability of Gases and Vapors*. Los Angeles.
- Jachimowski, C. J. (1984). *Chemical Kinetic Reaction Mechanism for the Combustion of Propane*. NASA Langley Research Center, Hampton, Virginia 23665 .
- Jurascik, M., Sues, A., & Ptasinski, K. (2010). *Exergy analysis of synthetic natural gas production method from biomass*. Eindhoven University of Technology, Department of Chemical Engineering.
- Kaesar Compresores. (s.f.). *Depósitos de aire comprimido*. Buenos Aires, República Argentina.
- Kaesar Compresores. (s.f.). *Secadores refrigerativos de bajo consumo*. Garín, Buenos Aires - República Argentina.
- Kuipers, E. (2007). *Interchangeability*. Shell Na Lng.

- Laindustriasite. (10 de Enero de 2017). *La industria del lugar*. Obtenido de <https://laindustriasite.wordpress.com/2017/01/10/conoce-los-4-tipos-de-tanques-de-almacenamiento-de-hidrocarburos-que-existe-en-la-industria/>
- Mendoza, M. d. (2017). *Estudio de factibilidad tecnico-económica para la complementación de un sistema de mezcla de aire propano en un gasoducto*.
- Ministerio de Minas y Energía. (2020). *Precios de Combustibles Año 2020*. Recuperado el 5 de Enero de 2021, de <https://www.minenergia.gov.co/precios-ano-2020>
- Nelson Fabian Lizcano Meneses, Carlos Rodrigo Calixto Rodrigez. (2007). *Estudio Tecnico - Economico del Uso de Sistemas De Aire Propanado En Proyectos De Gas Domiciliario*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- Pitz, W., & Westbrook, C. (1984). A Comprehensive Chemical Kinetic Reaction Mechanism For The Oxidation Of N-Butane. *Lawrence Livermore National Laboratory*, 831-843.
- Premac Energy. (s.f.). *vaporizador baño de agua vertical aquavaire*. Obtenido de https://www.premac.co/producto/vaporizador-bano-de-agua-vertical-aquavaire/?utm_source=rss&utm_medium=rss&utm_campaign=vaporizador-bano-de-agua-vertical-aquavaire
- Premac Energy. (s.f.). *vaporizador de fuego directo df series*. Obtenido de https://www.premac.co/producto/vaporizador-de-fuego-directo-df-series/?utm_source=rss&utm_medium=rss&utm_campaign=vaporizador-de-fuego-directo-df-series
- Premac Energy. (s.f.). *vaporizador eléctrico vertical power xp*. Obtenido de <https://www.premac.co/producto/vaporizador-electrico-vertical-power-xp/>
- Premac Energy. (s.f.). *vaporizadores calentados con vapor azeovaire*. Obtenido de <https://www.premac.co/producto/vaporizadores-calentados-con-vapor-azeovaire/>
- Unidad Planeación Minero Energética. (2016). *Proyección De Precios De Los Energéticos Para Generación Eléctrica Enero 2016-Diciembre 2035*. Subdirección De Hidrocarburos.
- UPME . (2017). *Cadena del gas licuado de petroleo (GLP)*. Bogota D.C. Colombia.

Anexos

Índice de tablas

Tabla 1. Intervalos de Composición del gas natural (GN)	38
Tabla 2. Especificaciones de calidad del gas natural	39
Tabla 3. Requisitos para el GLP.....	40
Tabla 4. Densidades de Gases Combustibles.....	45

Índice de figuras

Figura 1 Composición del GLP por fuentes de producción 2015	42
--	----

Anexo A. Caracterización de combustibles gaseosos

Las características de un gas combustibles que se debe conocer para cualquier trabajo suministrado son:

- Familia del gas.
- Naturaleza del gas.
- Poder calorífico superior (P.C.S.)
- Densidad respecto al aire.
- Grado de Humedad
- Presencia eventual de condensados.
- Índice de Wobbe.

-Familia del gas combustible

Según la norma internacional UNE 600002, que clasifica los gases combustibles según un parámetro llamado índice de Wobbe, (cociente entre el Poder Calorífico Superior y la raíz cuadrada de la densidad relativa del gas) en:

Primera familia Gas Manufacturado (Bajo P.C.S)

- Pertenecen a esta familia: Gas de Hulla, Gas de agua, Aire Butanado
- Poder Calorífico Superior (P.C.S):

$$\text{P.C.S} = 4200 - 5600 \text{ kcal/m}^3 \text{ ó } 472 - 629.3 \text{ BTU/ft}^3$$

- Densidad relativa = 0.6 – 0.4
- Índice de Wobbe = 5422 – 8854 Kcal/m³ ó 609.27 – 994.4.93 BTU/ft³

Segunda familia: Gas Natural (Intermedio P.C.S)

- Pertenecen a esta familia: Gas Natural y gas natural sintético (p.ej Aire propanado)
- P.C.S = 8500 – 14500 kcal/m³ ó 955 – 1629 BTU/ft³
- Densidad Relativa = 0.62-1.38
- Índice de Wobbe = 10795 – 12343 kcal/m³ ó 1213.01 – 1387 BTU/ft³

Tercera familia: Gases Licuados del Petróleo (Alto P.C.S)

- Pertenecen a esta familia: Butano Comercial y Propano Comercial
- P.C.S = 31138 – 25189 kcal/m³ ó 1498.46 – 1387 BTU/ft³
- Densidad relativa = 2.03 – 1.562
- Índice de Wobbe = 13335 – 12343 kcal/m³

Gas Natural (GN)

La definición expuesta en la Resolución de la CREG 011 del 2003, El gas natural es una mezcla de hidrocarburos livianos, principalmente constituidas por metano, que se encuentra en los yacimientos en forma libre o en forma asociada al petróleo. El GN, debe ser acondicionado o tratado para que satisfaga las condiciones de calidad de gas establecida por la legislación vigente o requerimiento contractual.

De acuerdo con lo mencionado por Ecopetrol la composición del gas puede oscilar de acuerdo con los componentes, dentro de los intervalos presentados en la **Tabla 1**.

Tabla 1

Intervalos de Composición del gas natural (GN)

Componente	Mínimo	Máximo
Metano (CH ₄)	77,72%	96,94%
Etano (C ₂ H ₆)	0,38%	14,06%
Hidrocarburos Superiores (Propano, Butano, Pentano y Hexano.)	0,12%	5,00%
Nitrógeno (N ₂)	0,50%	6,50%
Dióxido de Carbono (CO ₂)	0,00%	1,50%

Nota. Intervalos de Composición del gas natural según la Empresa Colombiana de Petróleos.

Tomado de Empresa Colombiana de Petróleos- ECOPETROL.

De la misma manera en la Tabla 2. Se muestran las condiciones de calidad que establece la CREG (Comisión Reguladora de Energía y Gas).

Tabla 2*Especificaciones de calidad del gas natural*

Especificaciones	Sistema	
	Internacional	Sistema Inglés
Máximo poder calorífico bruto (GHV)	42.8 MJ / m ³	1,150 BTU/ft ³
Mínimo poder calorífico bruto (GHV)	35.4 MJ / m ³	950 BTU/ ft ³
Contenido de líquido	Libre de Líquidos	Libre de Líquidos
Contenido total de H ₂ S máximo	6 mg / m ³	0.25 grano / 100PCS
Contenido total de azufre máximo	23 mg / m ³	
Contenido CO ₂ , máximo en % Volumen	2%	2%
Contenido de N ₂ , máximo en % Volumen	3%	3%
Contenido de inertes máximo en % Volumen	5%	5%
Contenido de oxígeno máximo en % Volumen	0.1%	0.1%
Contenido máximo de vapor de agua	97 mg / m ³	6.0 LB / MPCCS
Temperatura de entrega máximo	49°C	120°F
Temperatura de entrega mínimo	7.2°C	45°F

Contenido máximo de polvos y material en suspensión	1.6 mg / m ³	0.7 grano / 1000 pc
--	-------------------------	---------------------

Nota. tomado de la Resolución 071 de 1999 CREG

- Gas Licuado de Petróleo (GLP)

Es una mezcla de hidrocarburos extraídos del procesamiento del gas natural o del petróleo, en condiciones atmosféricas, que se licuan fácilmente por enfriamiento o compresión. El GLP está constituido principalmente por propano y butano. (Resolución de la CREG 011 del 2003). En la **Tabla 3** se exponen los requisitos de calidad y características de composición de los componentes principales de la mezcla de GLP y de este mismo en Colombia.

Tabla 3.

Requisitos para el GLP

Descripción	Propano comercial	Butano comercial	Mezclas comerciales P-B	Propano para aplicaciones especiales
Presión de vapor máxima a 100°F [psig]	208	70	208	208
Butano y más pesados máximo [% Vol.]	2,5	-	-	2,5
Pentano y más pesados máximo [% Vol.]	-	2	2	-
Contenido de propileno máximo [% Vol.]	-	-	-	5

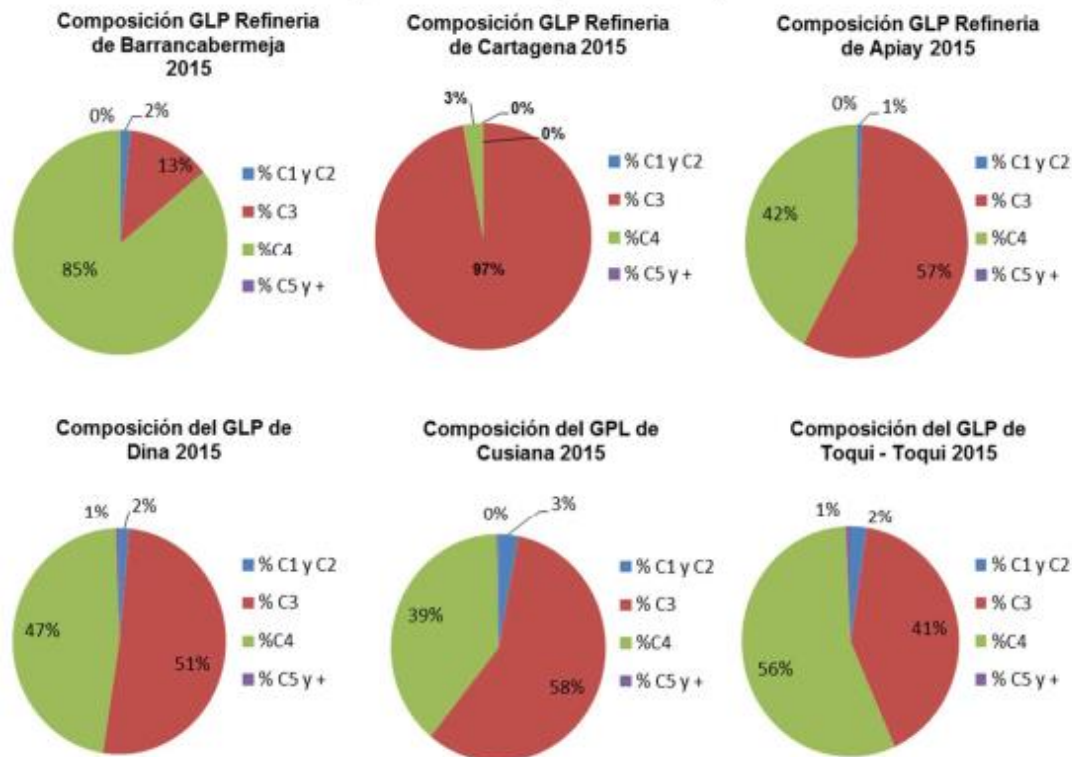
Azufre máximo [ppm en masa]	185	140	140	123
--------------------------------	-----	-----	-----	-----

Nota. Adaptado de Norma Técnica Colombiana (NTC) 2303 - Gases licuados del petróleo. Segunda Actualización. Bogotá, diciembre 12 de 2007. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN (ICONTEC).

-Calidad del GLP en Colombia

Es importante conocer la calidad del GLP para así garantizar proporciones adecuadas al momento de mezclar con aire y poder entregar la energía adecuada. La calidad del GLP producido en el país cambia según la fuente de suministro, es decir la Refinería de Barrancabermeja, la Refinería de Cartagena y la Refinería de Apiay, entregan al mercado producto contenidos de propano y butano particularmente diferentes.

De acuerdo con la **Figura 1**, Cartagena, Apiay y Cusiana, producen el GLP con mayores contenidos de propano, por encima del 50%, destacando el producido en la refinería de Cartagena con un 97% de propano durante el año 2015. El GLP producido en Barrancabermeja presenta un alto contenido de en butanos de 85% mientras que la refinería de Cartagena con un 3.38%. (UPME , 2017, pág. 30)

Figura 1*Composición del GLP por fuentes de producción 2015*

Nota. Adaptado de SUI (Sistema Único de Información de servicios públicos domiciliarios)

- **Naturaleza de combustibles gaseosos**

Los combustibles gaseosos pueden ser analizados dependiendo de los compuestos químicos que contiene, es decir su naturaleza (composición). Los parámetros que definen la calidad de un combustible son:

- Composición
- Entalpía estándar de reacción (poder calorífico)
- Gravedad específica (Densidad relativa)

-Composición de un combustible gaseoso

La composición de un combustible gaseoso es fundamental para determinar los parámetros de reacción de combustión y la norma transporte que exige el Rut (Regulación única de transporte) esto con el fin de legalizar el tránsito del combustible gaseoso sea mediante pipetas o tuberías. Además, establece si este mismo, es apto para el uso al que se requiere, en función de la presencia de componentes que puedan ser nocivos o contaminantes. La forma habitual de indicar la composición de un gas es como porcentaje en volumen de cada uno de sus componentes, en condiciones normales de temperatura y presión. Si se expresa en porcentaje relativo al 100% total, se obtiene la fracción molar, x_i . Por lo tanto, si el combustible gaseoso tiene n componentes deberá cumplirse que:

$$\sum_{i=1}^n x_i = 1$$

Donde:

$$x_i = \frac{\text{mol componente } i}{\text{mol combustible}}$$

Los componentes más habituales en un combustible gaseoso son:

- Hidrocarburos, de la fórmula genérica C_nH_m
- Dióxido de carbono: CO_2
- Monóxido de carbono: CO
- Hidrógeno: H_2
- Oxígeno: O_2
- Nitrógeno: N_2
- Dióxido de azufre: SO_2
- Sulfuro de hidrogeno: SH_2

-Poder calorífico

Es la cantidad de energía desprendida en la reacción de combustión, referida a la unidad de volumen de combustibles.

Poder calorífico superior (**P.C.S**): es el calor liberado por unidad de volumen del combustible cuando en los productos, el vapor de agua se condensa totalmente.

Poder calorífico inferior (**P.C.I**): Es el calor liberado por unidad de volumen de combustible cuando en los productos, el agua no se condensa totalmente.

$$P.C.I = P.C.S - 83.68 V_{H_2O} \quad \text{En BTU/ft}^3$$

$$83.68 \text{ BTU/ft}^3 = \text{aprox. El calor latente de cambio de fase del agua a } 0^\circ\text{C}$$

$$V_{H_2O} = \frac{ft^3 \text{ de vapor}}{1 ft^3 \text{ de combustible}}$$

El poder calorífico puede ser calculado mediante un análisis del gas, pero frecuentemente es medido por medio de un calorímetro de flujo estable y presión constante, en el cual el gas es quemado en una cámara de combustión empacada en agua.

-Gravedad específica para los combustibles gaseosos

La gravedad específica para los combustibles gaseosos está definida como $\rho_i \frac{\rho}{\rho_a}$ el cociente de la densidad absoluta del gas combustible ρ sobre la densidad absoluta del aire ρ_a , ambas medidas en las mismas condiciones de temperatura y presión. La densidad absoluta del aire, en condiciones normales (0°C y 1 atm), es de 1.287 kg/m^3

En la Tabla 4 se muestra los valores medidos de la densidad absoluta y relativa de los principales combustibles gaseosos utilizados en Colombia.

Tabla 4.

Densidades de Gases Combustibles.

Gases	Densidad	Densidad
Combustibles	Absoluta (Kg/m³)	relativa
Gas Natural	0,802	0,62
Butano Comercial	2,625	2,03
Propano Comercial	2,095	1,62

Nota. tomada de Empresa Colombiana de Petróleos – ECOPETROL

Anexo B. Cromatografía del Gas Natural-Caso de estudio.

REPORTE FINAL
RFLA 1903283

Compositional Analysis of Gas Salinas - Manifold to C12+

Sampling Date	02 - Diciembre - 2019
Sampling Location	Gas Salinas
Cylinder Number	-
Sample Description	Manifold
Sampling Conditions	671.0 psig @ 118.0°F

Component	Mole %	Weight %
CO ₂ Carbon Dioxide	15.12	25.78
N ₂ Nitrogen	0.79	0.86
C ₁ Methane	64.39	40.00
C ₂ Ethane	8.54	9.95
C ₃ Propane	5.98	10.22
iC ₄ i-Butane	1.16	2.62
nC ₄ n-Butane	2.22	5.00
C ₅ Neo-Pentane	0.02	0.06
iC ₅ i-Pentane	0.61	1.70
nC ₅ n-Pentane	0.56	1.56
C ₆ Hexanes	0.35	1.18
M-C-Pentane	0.06	0.18
Benzene	0.02	0.05
Cyclohexane	0.04	0.14
C ₇ Heptanes	0.08	0.33
M-C-Hexane	0.02	0.09
Toluene	0.01	0.04
C ₈ Octanes	0.02	0.14
E-Benzene	0.00	0.01
M/P-Xylene	0.00	0.01
O-Xylene	0.00	0.00
C ₉ Nonanes	0.01	0.07
C ₁₀ Decanes	0.00	0.01
C ₁₁ Undecanes	0.00	0.00
C ₁₂ + Dodecanes Plus	0.00	0.00
Totals :	100.00	100.00
Note: 0.00 means less than 0.005.		

Calculated Residue Property:	Mole Weight (g mol⁻¹)	Density (g cm⁻³ at 60°F)
C ₇ + Heptanes plus	95.9	0.7503
C ₁₀ + Decanes plus	134.0	0.7780
C ₁₂ + Dodecanes plus	-	-

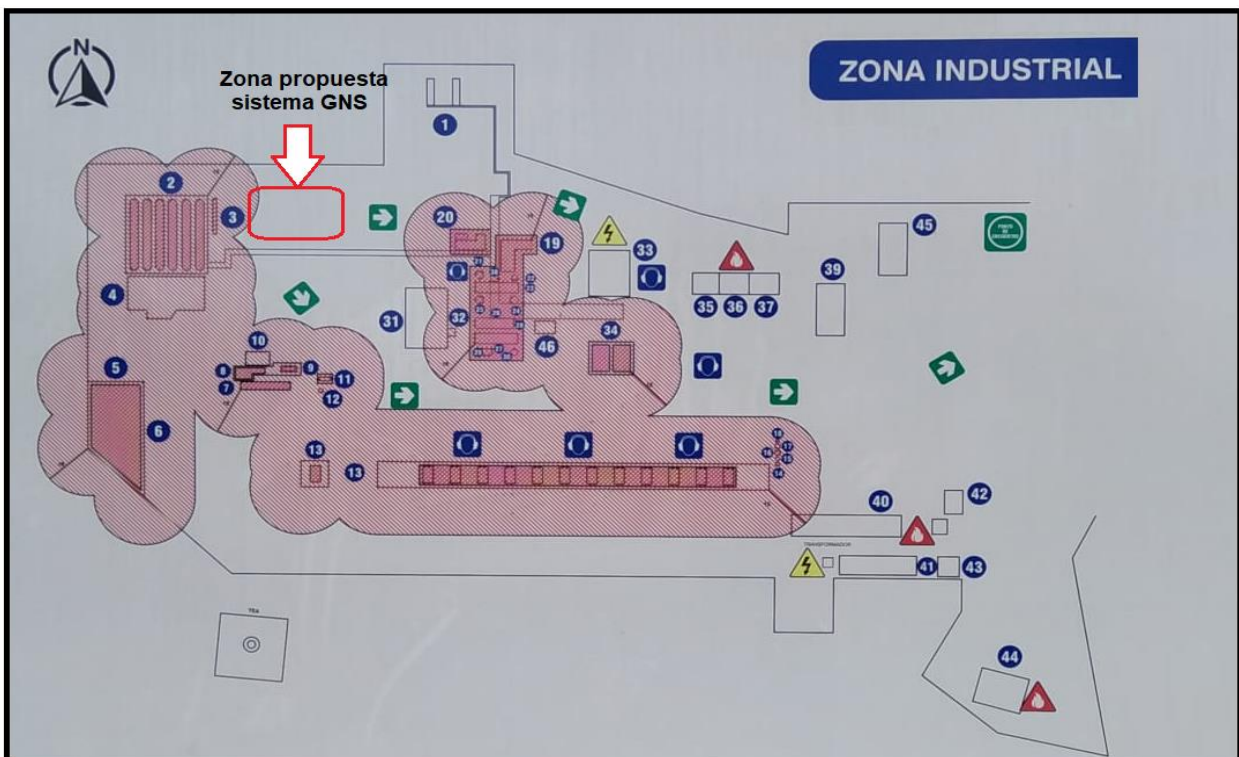
Calculated Whole Gas Properties		
Gas Gravity	0.8909	(Air=1 @ 14.73 psia & 60°F)
Whole Sample Mole Weight	25.810	g mol ⁻¹
Ideal Gas Density	1.0858	kg m ⁻³ @ 14.65psia, 60°F
Ideal Gross Calorific Value	1137.5	BTU.ft-3 @ 14.65psia, 60°F
Ideal Net Calorific Value	1033.5	BTU.ft-3 @ 14.65psia, 60°F
Pseudo Critical Press.	718.90	psia
Pseudo Critical Temp.	433.50	Rankine
Gas Compressibility Factor, Z	0.995813	@ 14.65 psia & 60°F
GPM (80% Propane)	3.0794	Gal/1000 PC
GPM (100% Propane)	3.4069	Gal/1000 PC
Additional Information		
Real Gross Calorific Value	1142.3	BTU.ft-3 @ 14.65psia, 60°F
Real Net Calorific Value	1037.8	BTU.ft-3 @ 14.65psia, 60°F

Anexo C. Ubicación propuesta dentro de la planta

- Vista espacial de la zona elegida.



- Plano de la planta



Anexo D. Equipos para una planta de GNS (Aire Propanado)**Lista de Figuras Anexo D**

Figura 1. <i>Equipos de planta de aire propanado.</i>	49
Figura 2. <i>Tipos de tanques de almacenamiento.</i>	50
Figura 3. <i>Difusor de bomba centrífuga y modelamiento de una bomba centrífuga.</i>	52
Figura 4. <i>Funcionamiento de una bomba de engranajes y su modelamiento.</i>	52
Figura 5. <i>Funcionamiento de la bomba de turbina regenerativa y su modelamiento.</i>	53
Figura 6. <i>Funcionamiento de bomba de paletas y su modelamiento</i>	54
Figura 7. <i>Vaporizador de GLP eléctrico y su funcionamiento</i>	55
Figura 8. <i>Vaporizador de GLP tipo vapor</i>	56
Figura 9. <i>Vaporizador de GLP tipo fuego directo.</i>	57
Figura 10. <i>Funcionamiento de vaporizador de GLP tipo baño de agua.</i>	58
Figura 11. <i>Mezclador de válvula proporcional.</i>	59
Figura 12. <i>Compresor de tornillo.</i>	61
Figura 13 <i>Funcionamiento de un Secador Refrigerativo de aire comprimido y su prototipo.</i>	64

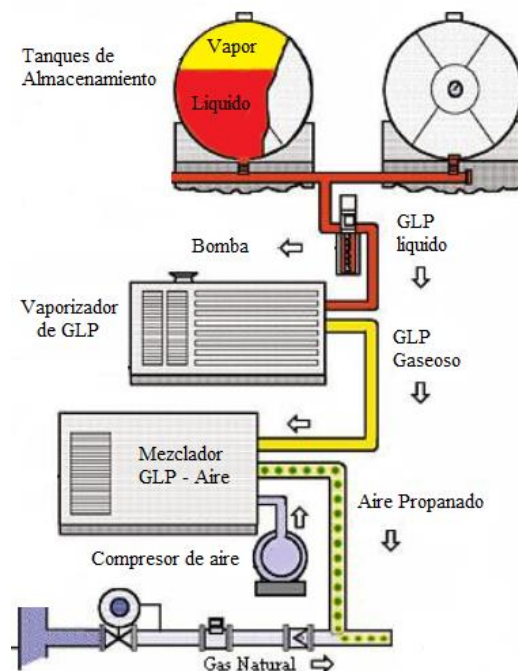
Para el funcionamiento de una planta de Aire Propanado es necesario contar con equipos que se ajusten a los requerimientos establecidos de potencia, presión de descarga y porcentaje de propano y butano, tales como:

- Tanques de almacenamiento de GLP.
- Bombas para transferir GLP al Vaporizador.
- Vaporizador para obtener el GLP de líquido a gas.
- Mezclador para la intercambiabilidad necesaria de aire y GLP.
- Compresor de aire
- Accesorios adicionales como: válvulas de control de flujo o presión, calorímetros.

En la Figura 1 se muestra la distribución de equipos y las direcciones de flujo de cada una de las corrientes.

Figura 1

Equipos de planta de aire propanado.



Nota. Adaptado de (Nelson Fabian Lizcano Meneses, Carlos Rodrigo Calixto Rodriguez, 2007)

5.1 Tanques de almacenamiento.

Los tanques de almacenamiento en la industria de los hidrocarburos constituyen un elemento importante para la explotación de sus servicios ya que actúa como receptor o contenedor de diferentes gases derivados del petróleo (Metano, Propano, Butano, Pentano etc.) y transportador de los mismos. Permite la sedimentación de agua y barros del crudo antes de despacharlo por oleoducto o a destilación. Brindan flexibilidad operativa a las refinerías. Actúan como punto de referencia en la medición de despachos de producto.

Se clasifican según construcción, uso o producto.

Construcción

- Vertical: Techo fijo, techo flotante interior o exterior.
- Horizontal: A presiones atmosféricas o mayores.
- Esferas.

Figura 2

Tipos de tanques de almacenamiento.



A) Tanque de almacenamiento vertical.



B) Tanque de almacenamiento esférico.



C) Tanque de almacenamiento horizontal.

Nota: adaptado de (laindustriasite, 2017)

Los accesorios de los tanques de almacenamiento que se destacan son: válvulas de alivio de seguridad, válvulas de salida de líquido, medidores de presión y termómetros. Estos accesorios son requisitos para contar con una certificación de NFPA (National Fire Protección Association).

En la línea de salida es común la utilización de coladeras o filtros, las cuales se instalan para la remoción de contaminantes como la arena, óxidos y humedad existente.

En la operadora PSC cuenta con 6 tanques de almacenamiento horizontales con uso de terminal de despacho con productos como Butano, Propano, Pentanos y Naftas. Cada uno tienen una capacidad de 30.000 galones, cuenta con: válvulas de alivio de seguridad, medidores de presión, termómetro, filtros de remoción de contaminantes de igual forma cuenta con descargadero para la entrega de producto a los carrotanques.

5.2 Bombas para el GLP.

Las bombas son equipos utilizados para el transporte de fluidos incompresibles. En términos generales, las principales propiedades físicas de los fluidos para calcular las capacidades requeridas por una bomba son la viscosidad y densidad. En la industria del petróleo y gas las bombas más comúnmente utilizadas son de tipo: centrífugas de desplazamiento positivo, ya sean reciprocantes como las bombas de diafragma o émbolo, o rotatorias como las bombas de paletas, engranajes, canal lateral, turbina regenerativa. Estas últimas son las más utilizadas para el transporte de GLP.

→ **Bomba centrífuga** de tipo cinética, maneja líquidos de baja viscosidad y poca lubricación como el GLP, generan mayores presiones cuando son de una sola etapa o de etapa simple, es decir con un solo impulsor o disco giratorio, de lo contrario el fluido se verá afectado por la presencia de vapor disuelto ya que el GLP al entrar en contacto con varios discos giratorios aumentara su energía la cual se verá reflejada en cavitación o pequeñas implosiones de cavidades o burbujas, es por esto que se recomienda de una sola etapa. Su funcionamiento se basa en la succión del líquido en la parte central de un difusor en el cual tiene alabes los cuales impulsan el líquido gracias la fuerza centrífuga, se expulsa el líquido hacia el exterior. En la Figura 3 se muestra un ejemplo de este tipo de bombas.

Figura 3

Difusor de bomba centrifuga y modelamiento de una bomba centrifuga

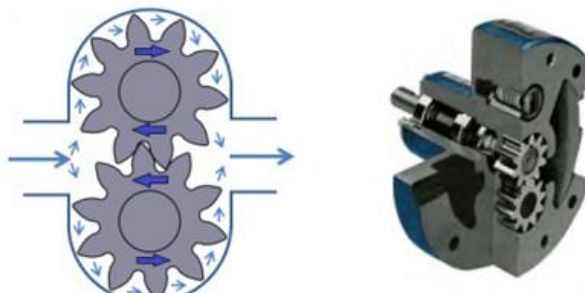


Nota: adaptado de (AMPEGAS, Blackmer, 2015)

→ **Bomba de engranaje** de tipo rotativas con desplazamiento constante, son ideales para fluidos altamente viscosos, existe contacto metal con metal lo cual no se recomienda para fluidos combustibles y su desempeño es limitado cuando existe vapor disuelto en la entrada de la bomba. Su funcionamiento se basa en la creación de una fuerza de succión en la entrada de la bomba la cual es producto del movimiento de los engranajes y la carcasa de la bomba, lo cual hace que el fluido sea aspirado y dirigidas en desplazamiento positivo, como se ve en la Figura 4.

Figura 4

Funcionamiento de una bomba de engranajes y su modelamiento.



Nota: adaptado de (AMPEGAS, Blackmer, 2015)

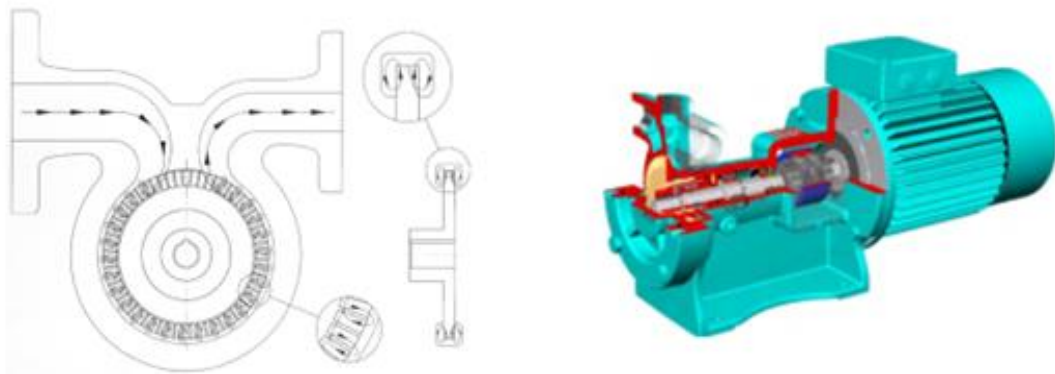
→ **Bomba de Turbina** regenerativa es de tipo cinética, no existe contacto metal con metal, manejan líquidos de baja viscosidad y poca lubricación como el GLP, tienen buen desempeño con vapor disuelto, tiene limitaciones de caudales debido al aumento de etapas,

lo cual es aconsejable tener una sola etapa para mayores presiones. Su funcionamiento es muy parecido a una bomba centrífuga ya que cuenta con un propulsor y una carcasa que dirige el líquido en desplazamiento positivo, pero su principal diferencia se basa en que el fluido solamente viaja a través del propulsor centrífugo una vez, mientras que en una de turbina, viaja varias veces a través de los álabes, un ejemplo se evidencia en la Figura 5.

→

Figura 5

Funcionamiento de la bomba de turbina regenerativa y su modelamiento



Nota: adaptado de (AMPEGAS, Blackmer, 2015)

→ **Bombas de paletas** rotativas manejan líquidos de baja viscosidad y poca lubricación como el GLP, son utilizadas en procesos de transporte de gases en estado líquido, la presión de entrega no influye substancialmente en la entrega de flujo manteniendo así un flujo constante, ya que cuenta con sello mecánico de acople magnético para evitar la cavitación que con llevan daños en la bomba y reducciones del caudal, pueden manejar vapor disuelto, son de flujo constante y están elaboradas de hierro dúctil fundido y acero inoxidable lo que garantizan un funcionamiento óptimo con periodos largos de manteamiento ideal para procesos industriales.

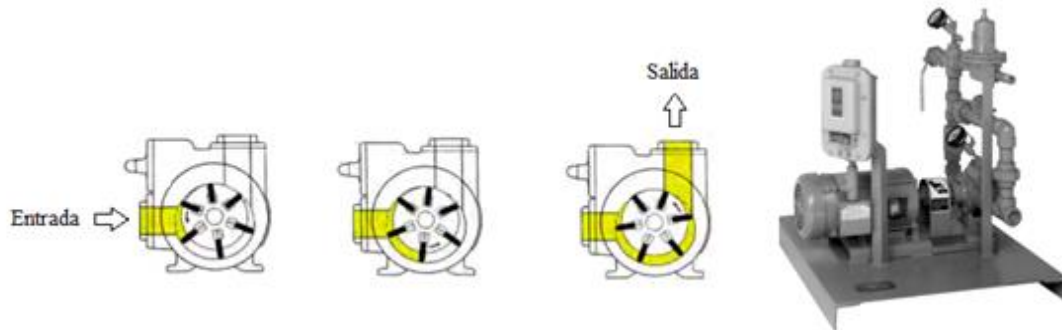
Su funcionamiento se basa en el giro del rotor que contiene paletas deslizantes que se mueven hacia la periferia a la altura del puerto de succión, expandiendo la cámara de bombeo y creando espacio para arrastrar el fluido hacia la bomba. El fluido es transferido entre las paletas desde el puerto de succión al puerto de descarga. A la salida, el fluido es

descargado conforme la cámara de bombeo es reducida y las paletas son forzadas a retraerse en sus alojamientos, la forma de actuar se evidencia en la **Figura 6**.

→

Figura 6

Funcionamiento de bomba de paletas y su modelamiento.



Nota. Tomado de (AMPEGAS, Blackmer, 2015)

5.3 Vaporizadores de GLP.

Los vaporizadores son equipos cuya función es vaporizar gases en fase líquida como el GLP, este proceso se logra mediante un intercambio de calor ya sea por llama directa, resistencia eléctrica o usando un fluido caliente como el agua. Sus aplicaciones industriales y comerciales se basan en la demanda de GLP que excede la capacidad de vaporización de los tanques de almacenamiento o en procesos donde se requiera grandes flujos gas propano.

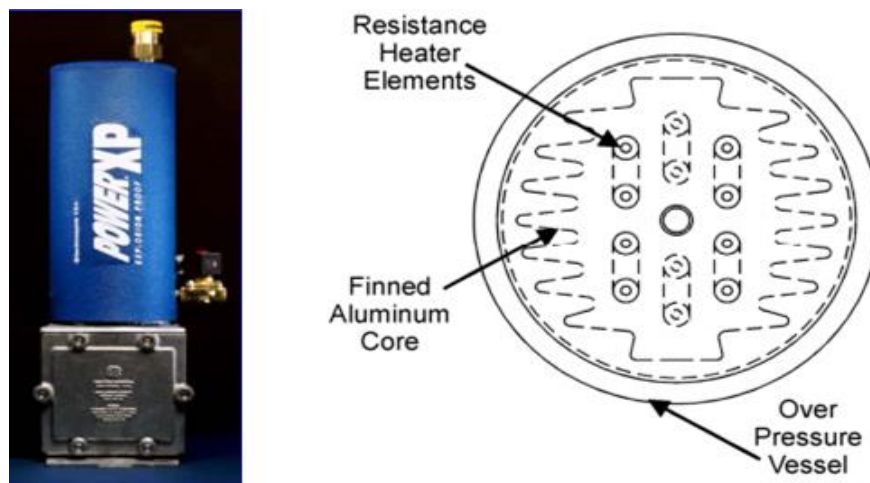
Actualmente se encuentran 4 tipos de vaporizadores que cumplen con estos requerimientos.

→ **Eléctricos:** Estos vaporizadores tratan el vapor instantáneamente son simples ya que cuentan con una resistencia eléctrica y se dividen en secos o baño de agua, este último se diferencia en que la resistencia primero calienta agua y después se llega al intercambio

calórico con el GLP. Son a prueba de explosiones es decir que se pueden instalar en áreas de División 1 (áreas con concentraciones inflamables de gases, vapores o líquidos). Cuentan con arranque instantáneo lo cual no requiere instalación “Standby” y con válvulas de seguridad, una imagen superior y un equipo común son los mostrados en la Figura 7.

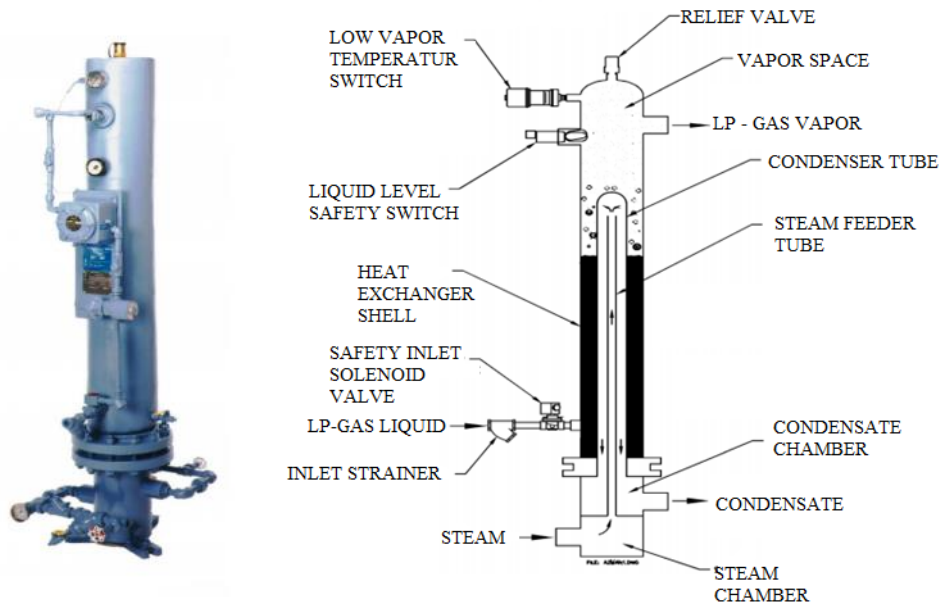
Figura 7

Vaporizador de GLP eléctrico y su funcionamiento.



Nota. Tomado de (PREMAC ENERGY, s.f.)

→ **Vapor o Agua Caliente:** Este tipo de vaporizadores son básicamente intercambiadores de calor que aprovechan corrientes de vapor de agua o corrientes procedentes de unas operaciones anteriores y constan de tubos concéntricos o en forma de espiral para mayor transferencia energética. Sus partes son mostradas en la Figura 8.

Figura 8*Vaporizador de GLP tipo vapor*

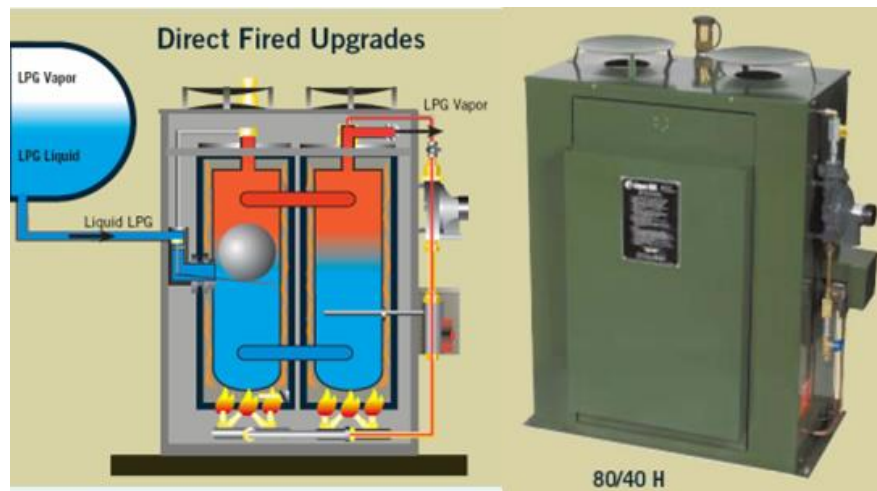
Nota. Adaptado de (PREMAC ENERGY, s.f.)

→ **Fuego Directo:** Estos vaporizadores utilizan vapor que se genera en la expansión del líquido en el tanque de almacenamiento el cual es utilizado para la producir llama la cual está en contacto directo con el cilindro de almacenamiento de GLP como se observa en la **Figura 9**. Sus características principales son: fácil de instalar, no requiere electricidad, opera en cualquier clima, son ajustables a cambios de demanda, portátiles, pequeños y livianos.

En la **Figura 9** se presenta una vista del sistema interno de este tipo de equipos.

Figura 9

Vaporizador de GLP tipo fuego directo.



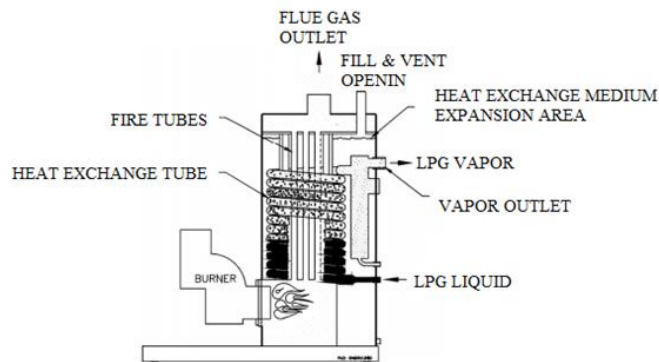
Nota. Tomado de (PREMAC ENERGY, s.f.)

→ **Baño de agua:** Su funcionamiento se basa en la circulación de agua caliente que es calentado por medio de un quemador que usa una porción de vapor de GLP que es alimentado, ya que de forma natural se alcanza a evaporar, también se puede añadir gas natural de forma externa al quemador y así vaporizar toda la corriente de GLP. Este tipo de equipos son muy utilizados en las industrias ya que son muy seguros porque cuentan con quemador de tiro forzado esto busca evitar el retroceso de gas dentro del equipo, cuentan con un presostato el cual dependiendo de la lectura de presión del fluido abre o cierra el circuito eléctrico manteniendo la seguridad del equipo. Son unidades grandes con capacidades de flujo hasta 15000 GPH (Galones por hora). (PREMAC ENERGY, s.f.)

En la **Figura 10** se muestra este equipo y sus partes principales.

Figura 10

Funcionamiento de vaporizador de GLP tipo baño de agua.



Nota. Adaptado de Algas SDI

5.4 Mezcladores de GLP – Aire.

Los mezcladores de GLP / Aire cumplen la función de mezclar flujos de gases en proporciones correctas, para que los índices de Wobbe nos permita realizar una efectiva intercambiabilidad de gas combustible. Existe dos tipos de mezcladores los de válvula proporcional y tipo Venturi.

→ Mezclador tipo Venturi

Cuenta con un diseño compacto, muy bajo mantenimiento, capacidad desde 188 m³/h a más de 5.300 m³/h, aplicabilidad de baja y media presión. Su funcionamiento se basa en pasar el vapor de GLP presurizado a través de una disposición Venturi para aspirar aire, el contenido de calor (Btu) de la mezcla se determina regulando adecuadamente la presión de vapor de GLP. La mezcla es recogida en un tanque de compensación, la cual es parte del sistema. La presión del tanque de compensación es monitoreada por transmisores de presión y se ajusta a la presión requerida del sistema. Cuando la presión del tanque cae debido a la salida de gas al proceso, las

válvulas solenoides en el lado de entrada de los sistemas Venturi se abren lo que permite que el vapor de GLP presurizado fluya a través de la combinación de boquilla/tubo Venturi, generando así la mezcla GLP/aire deseado. Estos mezcladores son de bajo flujo, requieren mantenimiento seguido, no tiene necesidad de compresor y cuentan con una precisión de +/- 5%. (Alternate Energy Systems, Inc., s.f.)

→ Mezclador válvula proporcional

Se caracteriza por su diseño compacto, con muy bajo mantenimiento, confiabilidad superior y capacidad de 530 m³/h a más de 10.700m³/h, aplicaciones de baja y alta presión, cuenta con conexiones bridadas de ingreso y salida, actuadores neumáticos de seguridad en válvulas. El funcionamiento de este tipo de mezcladores es sencillo y seguro, se basa en tuberías en paralelo que contienen reguladores reticulados que buscan determinar la igualdad de presión de entrada de cada una de las válvulas mezcladoras. Los indicadores de posición del puerto de la válvula y de la posición del caudal proporcionan una visual directa de la mezcla. El vapor de GLP a presión regulada se envía a través de un medidor de flujo y luego ingresa a la sección de mezcla o turbulador de flujo interno donde se mezcla completamente con el aire comprimido que se inyecta a una velocidad controlada por una válvula de flujo de aire. Un modelo de estos equipos se presenta en la Figura 11.

Figura 11

Mezclador de válvula proporcional



Nota. Tomado de Algas SDI.

Este tipo de mezclador ofrece sistema de control que emite comandos para ajustar las válvulas de control de flujo de aire a una posición que permita el caudal necesario el cual mantiene una precisión de mezcla de +/- 1%. Cuenta con controladores basados en PLC (Contador lógico programable) con transmisores de temperatura y presión. (Algas - SDI, 2020)

5.5 Compresores de aire

Los compresores de aire son equipos que transportan fluidos compresibles, tal como son los gases. Esto se realiza a través de un intercambio de energía entre la máquina y el fluido. La máquina transfiere trabajo a la sustancia que pasa por él convirtiéndose en energía de flujo, aumentando su presión y energía cinética impulsándola a fluir. El compresor en una planta de aire propanado nos ofrece el transporte de aire comprimido al mezclador listo para la mezclar con el GLP. Los compresores son de tipo dinámico o de desplazamiento positivo. Los dinámicos incluyen centrífugos radial y axial y los tipos de desplazamiento positivo son de dos categorías básicas: reciprocantes y rotativos.

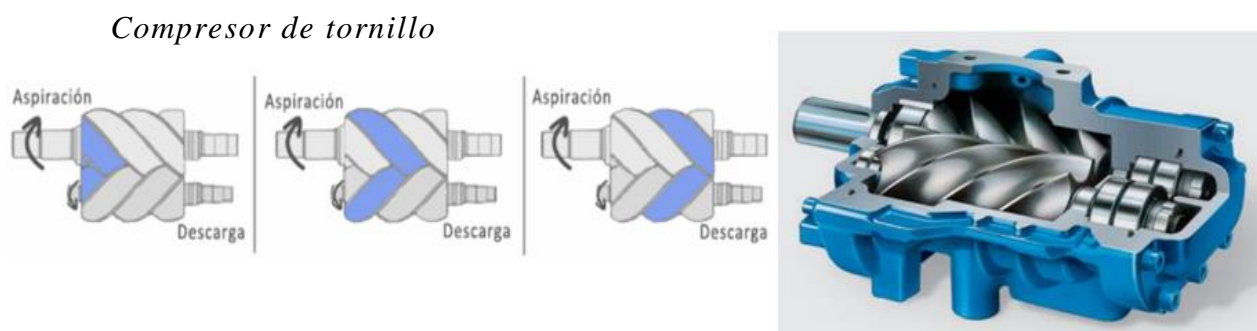
→ **Dinámicos o Centrífugos:** Su funcionamiento se basa en que el aire entra por el centro de un rodete con álabes y es impulsado hacia su perímetro por la fuerza centrífuga. Estos compresores cuentan con sistema eléctrico para poner en marcha el compresor el cual produce el impulso para hacer girar el rotor, cuenta con mecanismo de admisión que es el encargado de hacer que el aire ingrese a la máquina hacia el mecanismo de inducción, encargado de que el compresor pase aire de la admisión al sistema de compresión, el cual genera la potencia necesaria para comprimir el fluido y entregarlo al mecanismo de expulsión, el cual se encarga de hacer que el aire comprimido salga a presión especificada y por ultimo cuenta con un tablero de control que permite controlar, planificar y diseñar el funcionamiento del compresor. Estos compresores brindan caudales altos especiales para funciones donde se requieran grandes volúmenes de aire, proporciona un mantenimiento sencillo, pero presentan desventajas como no mantienen un caudal constante al requerir caudales de mediano o bajo proporciones, sus costos de operatividad son muy altos debido

a un alto consumo de energía y algunos modelos no alcanzan con los niveles esperados de compresión. (Compresores de Aire , 2020)

→ **Desplazamiento positivo:** El funcionamiento de estos compresores se basa en la disminución del volumen del aire en la cámara de compresión donde se encuentra confinado, produciéndose el incremento de la presión interna hasta llegar al valor de diseño previsto, momento en el cual el aire es liberado al sistema. Existen compresores de pistón, de paletas, scroll, de lóbulos y de tornillo. Este último, los **compresores de tornillo** es el más utilizado ya que proporciona un flujo de aire constante que permite que su rendimiento sea mayor, su sistema de compresión es mucho más avanzada que la compresión de aire producida por motores con pistones, ya que cuenta con una compresión continua y no en dos fases, cuenta con una mayor capacidad que los demás, ya que puede conectar variar herramientas y equipos a este tipo de compresor como por ejemplo filtros de aceite, secador de aire y tanques de almacenamiento. También puede contar con una regulación de la presión durante la operación y tiene bajos costos de operación ya que no consumen altas cantidades de energía eléctrica. Su desventaja se basa en que requiere de una exigencia de lubricación constante, lo que implica mayor mantenimiento y revisión. (Compresores de Aire, 2020)

En la **Figura 12** se evidencia el funcionamiento y un corte transversal de estos equipos.

Figura 12



Nota. Tomado de Revista (Compresores de Aire, 2020).

5.6 Equipo adicional.

Para mantener una relación óptima de intercambiabilidad y evitar fluctuaciones del índice de Wobbe, es necesario contar con un equipo adicional que suministre información del flujo de energía a la salida de la planta de aire propanado, para ello se recomienda un calorímetro y válvulas de control, los cuales nos permitirán saber en tiempo real si la mezcla aire – propano cuenta con las proporciones adecuadas para el intercambio con el gas natural.

- **Calorímetro**

Dispositivo analizador de poderes caloríficos y densidades relativas a gases combustibles para detectar cambios en los Índices de Wobbe. Comúnmente utilizado en las corrientes de salida de operaciones de mezclado, por ejemplo, en plantas de aire propanado.

Su funcionamiento se basa en recibir el gas combustible y aire comprimido el cual es mezclado, seguidamente en una cámara de medición se proporciona la ignición del gas, registrándose un cambio de temperatura con una termocupla externa conectada a la cámara de medición, después se calcula el calor liberado por la reacción de oxidación o combustión. Estos dispositivos contienen medidores de flujo de aire, medidores de presión, válvulas de filtro o trampas de líquido, válvulas solenoides, filtros de aire y dispositivos de control. (Algas SDI, 2020)

- **Filtros de aire Coalescentes**

En casi todos los procesos donde exista contaminación del suministro de aire, con llevan a problemas de rendimiento y aumento de costos de mantenimiento en términos de reparaciones y pérdidas de productividad. Estos filtros son usados comúnmente después de un compresor de aire

o después de un secador. Su función es reducir el contenido de partículas como polvo u oxido, aceite y agua, que posiblemente se encuentren en una corriente de aire. El principio de funcionamiento de los filtros coalescentes se basa en hacer pasar el flujo de aire a través de fibras finas las cuales depositan las partículas en este material con base a **3 mecanismos físicos**: **Primero**: Impacto inercial, debido a la gran inercia de las partículas estas se desplazan en línea recta y colisiona con la fibra. **Segundo**: La interceptación, ocurre cuando una partícula sigue la línea de flujo, pero el radio de la partícula es inferior a la distancia entre la línea de flujo y el perímetro de la fibra. **Tercero**: Deposito de partículas por difusión, ocurren cuando una partícula muy pequeña no sigue las líneas de flujo y se mueve de forma aleatoria. (Atlas Copco, 2019)

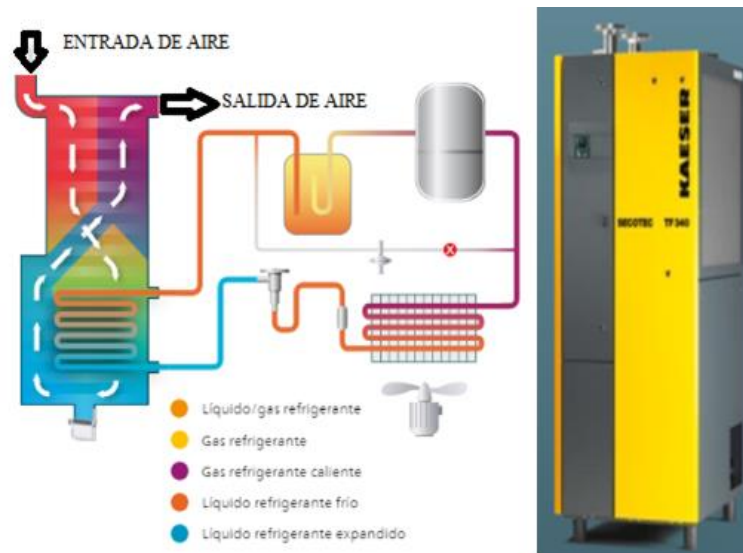
- **Secador refrigerativo de aire comprimido**

En el proceso de compresión del aire se cuenta con presencia de partículas como polvo u oxido, aceite y agua. Este aire sin tratar con llevan a daños en tuberías o averías prematuras en equipos y deterioro en productos. Por lo tanto, un secador refrigerativo de aire comprimido es fundamental para proteger los sistemas y procesos de compresión. Su funcionamiento se basa en pasar el aire por un intercambiador de calor para refrigerarlo y condensar el vapor de la humedad. (KAESER COMPRESORES)

En la Figura 13 es posible ver el recorrido del flujo de aire en este tipo de equipos.

Figura 13

Funcionamiento de un Secador Refrigerativo de aire comprimido y su prototipo.

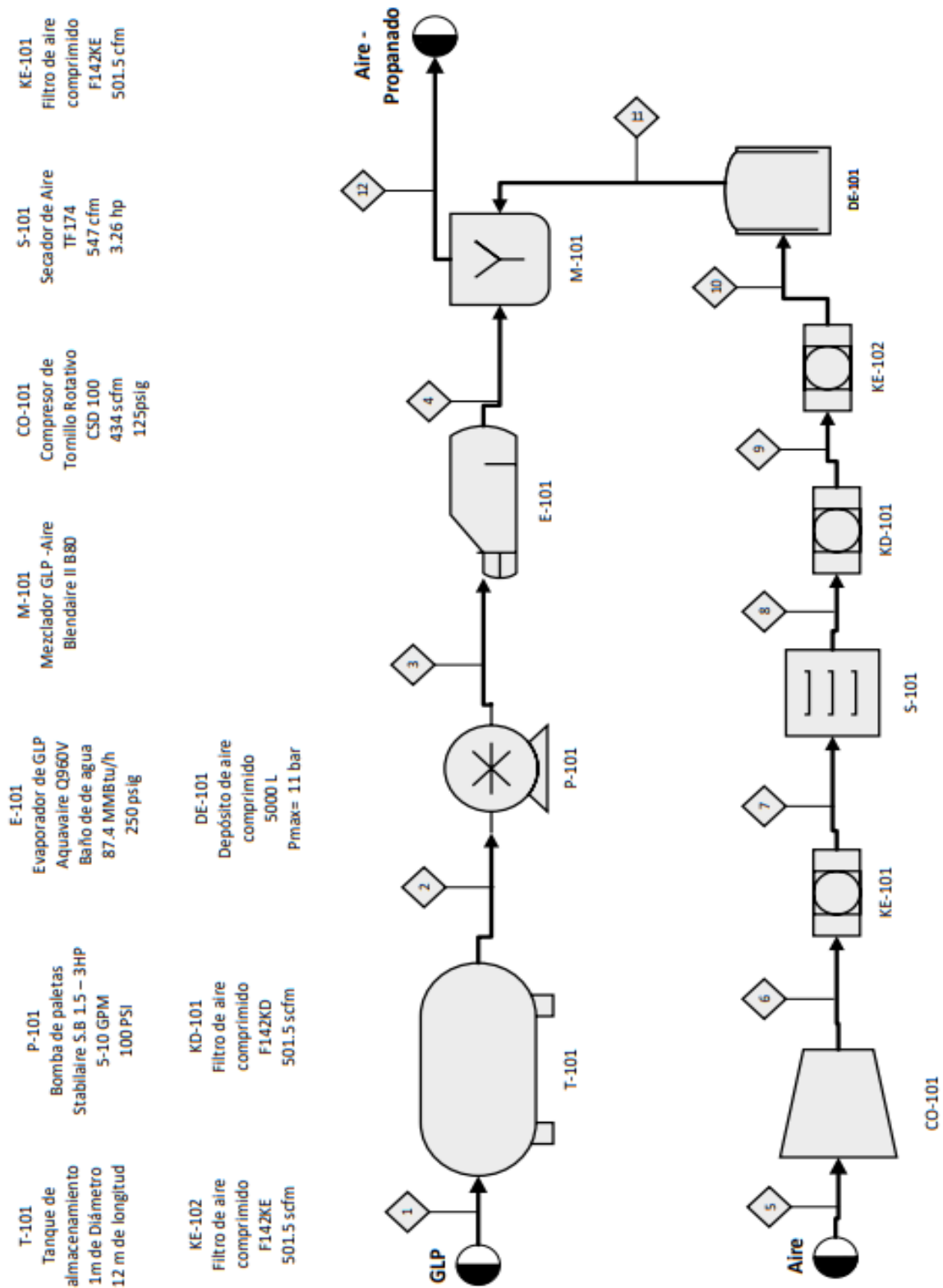


Nota. Tomado de Atlas Copco y Kaeser Compresores.

- **Depósito de aire comprimido**

Los depósitos de aire comprimido tienen por función recibir y almacenar aire procedente de equipos de compresión. Almacenar aire comprimido busca reducir los picos de presión inestables, ciclos de arranque y parada del compresor. Por otra parte, reduce el riesgo de formación de condensado manteniendo un flujo de aire seco. El depósito cuenta con: válvula de bola, válvula de seguridad, manómetro, y grifo de purga, estos accesorios con el fin de mantener la calidad del aire y la seguridad operativa. (KAESER COMPRESORES).

Anexo E. Diagrama de flujo de proceso (PFD) Sistema de aire propanado



- **Resumen reporte generado por Aspen HYSYS®- sistema aire propanado**
- **Corrientes del proceso**

Corriente	Alimentación
Fracción de Propano	0,6
Fracción de Butano	0,4
Fracción de Fase Vapor	0
Temperatura [C]	29,44
Presión [kPa]	1342
Flujo Molar [Kmol/h]	641,3
Flujo Másico [kg/h]	3,15E+04
Flujo Volumétrico[m ³ /h]	58,79
Entalpia [kJ/kmol]	-1,30E+07
Flujo de Energía [kJ/h]	-8,32E+07

Corriente	GLP a mezclador
Fracción de Propano	0,632
Fracción de Butano	0,368
Fracción de Fase Vapor	1
Temperatura [C]	37,78
Presión [kPa]	1442
Flujo Molar [Kmol/h]	641,3
Flujo Másico [kg/h]	3,16E+04
Flujo Volumétrico[m ³ /h]	58,79
Entalpia [kJ/kmol]	-1,29E+05
Flujo de Energía [kJ/h]	-8,25E+07

Corriente	GLP a bomba
Fracción de Propano	0,632
Fracción de Butano	0,364
Fracción de Fase Vapor	0
Temperatura [C]	29,44
Presión [kPa]	1342
Flujo Molar [Kmol/h]	641,3
Flujo Másico [kg/h]	3,16E+04
Flujo Volumétrico[m ³ /h]	58,79
Entalpia [kJ/kmol]	-1,30E+07
Flujo de Energía [kJ/h]	-8,32E+07

Corriente	Fluido int. 1
Fracción de agua	1
Fracción de Fase Vapor	0
Temperatura [C]	95
Presión [kPa]	100
Flujo Molar [Kmol/h]	198,9
Flujo Másico [kg/h]	3,58E+03
Flujo Volumétrico[m ³ /h]	3,59
Entalpia [kJ/kmol]	-2,81E+05
Flujo de Energía [kJ/h]	-5,58E+07

Corriente	GLP a interc
Fracción de Propano	0,632
Fracción de Butano	0,368
Fracción de Fase Vapor	0
Temperatura [C]	29,54
Presión [kPa]	1442
Flujo Molar [Kmol/h]	641,3
Flujo Másico [kg/h]	3,16E+04
Flujo Volumétrico[m ³ /h]	58,79
Entalpia [kJ/kmol]	-1,30E+05
Flujo de Energía [kJ/h]	-8,32E+07

Corriente	Fluido int. 2
Fracción de agua	1
Fracción de Fase Vapor	0
Temperatura [C]	50
Presión [kPa]	100
Flujo Molar [Kmol/h]	198,9
Flujo Másico [kg/h]	-2,84E+05
Flujo Volumétrico[m ³ /h]	3,59
Entalpia [kJ/kmol]	-2,84E+05
Flujo de Energía [kJ/h]	-5,65E+07

Corriente	Aire Fresco
Fracción de Aire	1
Fracción de Fase Vapor	1
Temperatura [C]	25
Presión [kPa]	689
Flujo Molar [Kmol/h]	1191
Flujo Másico [kg/h]	3,45E+04
Flujo Volumétrico[m ³ /h]	39,21
Entalpia [kJ/kmol]	-5,65E+01
Flujo de Energía [kJ/h]	-6,73E+04

Corriente	Aire comprimido
Fracción de Aire	1
Fracción de Fase Vapor	1
Temperatura [C]	41,1
Presión [kPa]	790,8
Flujo Molar [Kmol/h]	1191
Flujo Másico [kg/h]	3,45E+04
Flujo Volumétrico[m ³ /h]	39,21
Entalpia [kJ/kmol]	4,04E+02
Flujo de Energía [kJ/h]	4,81E+05

Corriente	Mezcla
Fracción de propano	0,2705
Fracción de butano	0,2076
Fracción de aire	0,522
Fracción de Fase Vapor	0,8302
Temperatura [C]	-15,424
Presión [kPa]	790,8
Flujo Molar [Kmol/h]	1832,7
Flujo Másico [kg/h]	6,61E+04
Flujo Volumétrico[m ³ /h]	98,004
Entalpia [kJ/kmol]	-4,48E+04
Flujo de Energía [kJ/h]	-8,20E+07

Corriente	GLP
Fracción de propano	0,2211
Fracción de butano	0,1287
Fracción de aire	0,6501
Fracción de Fase Vapor	1
Temperatura [C]	32,2
Presión [kPa]	790,8
Flujo Molar [Kmol/h]	1832,7022
Flujo Másico [kg/h]	6,61E+04
Flujo Volumétrico[m ³ /h]	98,004
Entalpia [kJ/kmol]	-4,48E+04
Flujo de Energía [kJ/h]	-8,20E+07

- **Equipos del proceso**

Nombre de la bomba	P-100
Delta P [kPa]	100
Eficiencia [%]	75
Potencia [hp]	3

Nombre del compresor	K-100
Delta P [kPa]	101,4
Eficiencia [%]	75
Potencia [hp]	204,4

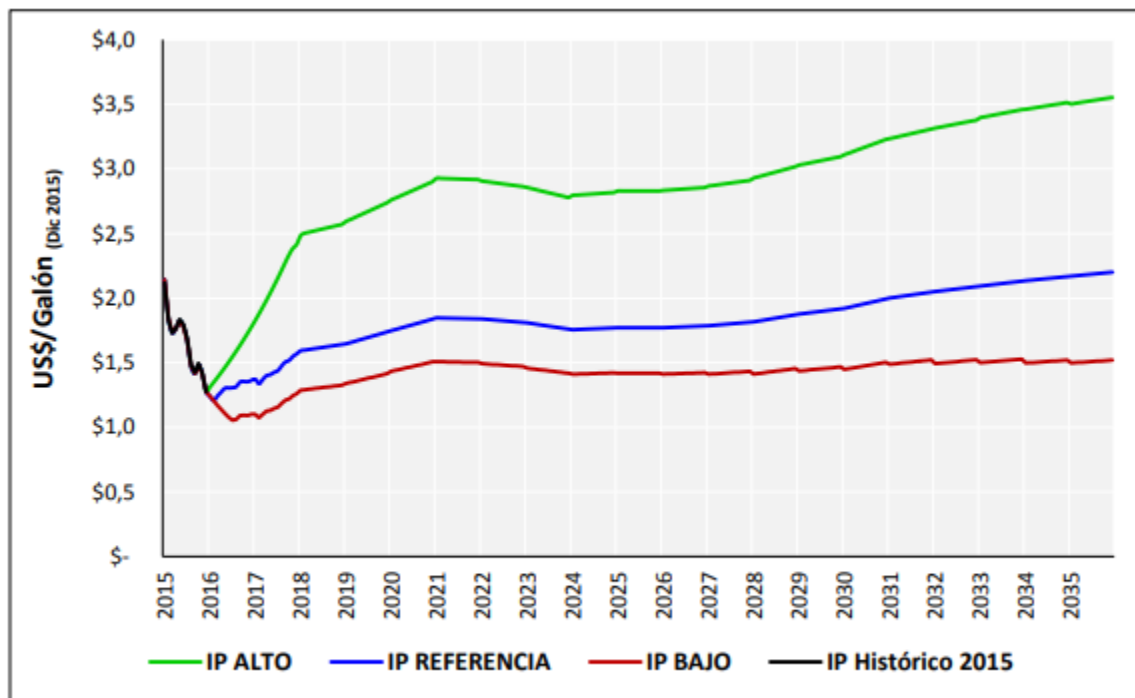
Intercambiador	
Tipo	Tubo y carcasa
Energía [kJ/h]	7,01E+05
Temperatura del tubo de entrada [C]	95
Temperatura del tubo de salida [C]	50
Temperatura de la carcasa de entrada [C]	29,54
Temperatura de la carcasa de salida [C]	37,78
Longitud del Tubo [m]	6
Numero de tubos	160
Diámetro de la carcasa [mm]	739
Área de transferencia de calor a la carcasa [m ²]	60,32

Anexo G. Proyección de precios del Diésel en Colombia.

La Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME), presenta las proyecciones de precios para los diferentes combustibles usados para producir energía eléctrica en Colombia, dentro de los cuales se incluye el Diésel.

En el documento; PROYECCIÓN DE PRECIOS DE LOS ENERGÉTICOS PARA GENERACIÓN ELÉCTRICA ENERO 2016 – DICIEMBRE 2035, se presenta en el capítulo 8, la *Gráfica 8-3. Proyección por escenarios del ingreso al productor colombiano del DIÉSEL*, donde se evidencia una subida gradual del precio del Diesel a largo plazo. Es posible ver un alza súbita hasta el 2021, una posterior estabilización con caídas leves hasta el año 2028, para una posterior alza por encima de los 3,5 dólares por galón para el año 2035 (IP ALTO, color verde)

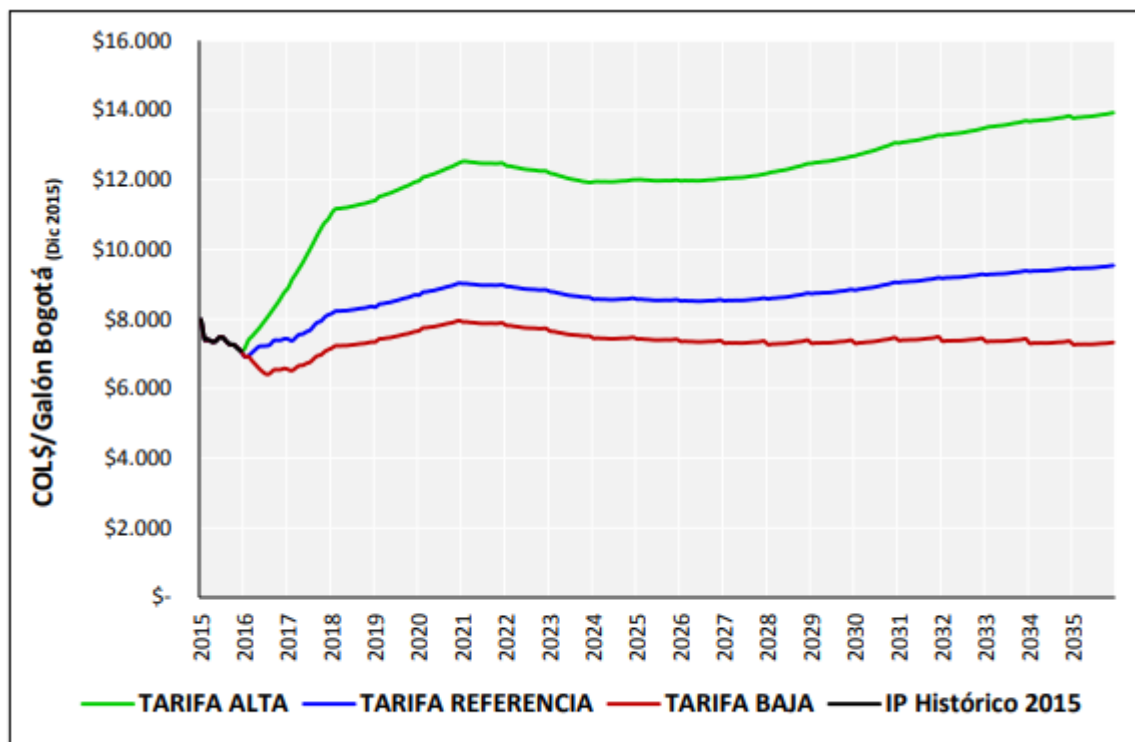
Respecto al IP REFERENCIA (azul), se presenta de la misma manera un alza y aumento gradual en el precio de este combustible, pero de una manera menos pronunciada llegando a los 2,25 dólares por galón para el 2035.



Fuente: EIA, ECOPETROL, WM y UPME.

Cabe resaltar que esta grafica presenta los precios de ingreso al productor, es decir no se han tenido en cuenta los gastos adicionales por transporte para su distribución normal.

Para tener una idea del precio de venta del Diesel al público, en el mismo documento y capitulo, se presenta la *Gráfica 8-5. Proyección por escenarios del DIÉSEL en Estación de Servicio (Bogotá D.C.)*, en la cual se muestra la proyección del precio final de venta del combustible.



Fuente: EIA, ECOPEPETROL, WM y UPME.

Nota. Figuras adaptadas de (Unidad Planeación Minero Energética, 2016)

De la cual se puede ver que se mantiene la misma tendencia que la Grafica 8-3, pero con un precio mayor, lo que hace que la compra externa de este combustible represente un gasto adicional y alto a futuro.

Anexo H. Costos de equipos principales para sistema de aire propanado-Caso de estudio.

	Cantidad	Precio Unitario USD	Total, USD
Evaporador de GLP Aquavaire Q960V	1	122.183,55	122.183,55
Bomba de paletasStabilaire S.B 1.5 – 3HP	1	67.879,75	67.879,75
Mezclador GLP - Aire Blendaire II B80	1	54.303,80	54.303,80
Compresor de Tornillo Rotativo CSD 100 434 scfm 125psig	1	45.198,00	45.198,00
Desiccant Dryer KAD-750	1	18.923,00	18.923,00
Depósito de aire comprimido 5000/11 ST C	1	10.453,00	10.453,00
Filtro de Aire Comprimido F142KE	2	680,00	1.360,00
Filtro de Aire Comprimido F142KD	1	680,00	680,00
Total, USD			\$ 320.981,10

Nota: Los precios presentados en este Anexo, son únicamente tomados como referencia conceptual y son resultado de una indagación de costos en el mercado colombiano actual.

No se tuvo en cuenta la inversión referida a los accesorios adicionales, costos de instalación y puesta en marcha.