



UNIVERSIDAD POPULAR AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE PUEBLA

UPAEP

OPTIMIZACIÓN A PARTIR DEL MÉTODO DE
EXERGÍA PARA EL AHORRO ENERGÉTICO
EN EL PROCESO DE REFORMACIÓN DE LA
PLANTA METANOL II DEL CPI.

Trabajo de Investigación que para obtener el Título

INGENIERO QUÍMICO INDUSTRIAL

Presenta:

ABIGAIL ZEPEDA OSORIO.



UPAEP – Secretaría General

Dirección General de Apoyos Académicos

Dirección del Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación.

Biblioteca Central - **Karol Wojtyła**

Tesis Digitales Restricciones de uso:

DERECHOS RESERVADOS ©

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de textos, imágenes, gráficas, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente de donde la obtuvo mencionando el autor o autores involucrados en el documento.

Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JUSTIFICACIÓN:

Se han encontrado métodos de optimización que cumplen con las necesidades requeridas para obtener una mayor eficiencia energética; dando como resultado que el método seleccionado para la viabilidad de las modificaciones en tecnologías existentes y/o de planteamiento de nuevos sistemas, desde el ámbito termodinámico es el método de exergía.

En el Centro Petroquímico Independencia se ha desarrollado este tipo de análisis en otras áreas, como lo es en la unidad de Servicios Auxiliares, obteniendo datos positivos gracias a este método de optimización, por lo cual ahora se pretende emplearlo en otra planta, la cual es considerada la más importante dentro del complejo que es la Planta de Metanol II.

De acuerdo al panorama que se tiene en el país respecto al ahorro energético, se ha determinado promover el ahorro de energía, así como la eficiencia en el proceso de reformación que se encuentra en la Planta Metanol II del CPI y con ello poder obtener una mayor producción de metanol reduciendo los costos energéticos involucrados en el proceso.

HIPÓTESIS

Es posible lograr la optimización en el área de reformación de la Planta Metanol II a partir de un análisis exergético, y así poder mejorar su eficiencia energética.

ANTECEDENTES DEL ÁREA DE ESTUDIO

El Centro Petroquímico Independencia se encuentra ubicado a la altura del kilómetro 76.5 de la Carretera Federal México - Puebla, en el poblado de Santa María Moyotzingo, perteneciente al municipio de San Martín Texmelucan, Estado de Puebla.

El Centro Petroquímico Independencia, de Pemex Petroquímica es un centro productor de petroquímicos no básicos principalmente Metanol, Especialidades Petroquímicas y Energía Eléctrica; así mismo se da servicio de Rehabilitación de Cambiadores de Calor, Guarda y manejo de Gasolina, diésel, diésel UBA y gas L.P.

Actualmente, el Centro Petroquímico Independencia cuenta con cinco plantas en operación, que es la Planta de Metanol II, Especialidades Petroquímicas, Planta de Generación de vapor y electricidad, Planta de Tratamiento de Agua y una Planta de Servicios Auxiliares.

El Centro Petroquímico Independencia inició su operación el 8 de julio de 1969, con la planta de Metanol I, la cual contaba con una capacidad de 65 Ton/día, seguido por la planta de Especialidades Petroquímicas que comenzó a operar en el año de 1972 empleando tecnología de IMP.

La planta de Metanol II inició su operación en el año de 1978, esta planta tiene una capacidad de producción de 500 Ton/día, el proceso tiene una patente de LURGI, de la cual emplea como materia prima gas natural. Se modernizaron las instalaciones con ingeniería y construcción propias. Esta planta tuvo record en ventas a pesar de que se presentaba la fuerte competencia con empresas internacionales.

La planta de Especialidades Petroquímicas comenzó a operar en el año de 1972 con una capacidad de 50 Ton/día, solo produciendo 5 productos con dos reactores, ahora se producen 134 productos, y se cuentan con 5 reactores, de los cuales 3 fueron diseñados y construidos en el CPI.

La planta de Generación de vapor y electricidad comenzó en el año de 1985, en el cual era pionero de todo el sistema petrolero en el porteo de energía, así mismo esta planta acumuló con un tratamiento de agua innovador, generando un ahorro de agua equivalente a lo que consumen 1000 familias en un año. En el año 2003 apoyaron a CFE cuando se les presentó una crisis energética nacional del Sector Eléctrico, actualmente opera a 44 MW.

ANTECEDENTES ENERGÉTICOS:

Es evidente que la industria petroquímica se encuentra en constante evolución tecnológica, por lo cual la lleva a buscar alternativas para mejorar sus procesos con el propósito de obtener una mayor producción reduciendo sus costos. Uno de los principales aspectos a buscar en esta evolución tecnológica es el ahorro de energéticos.

La demanda energética mundial ha tenido un crecimiento importante en estos últimos años, la cual está liderada por el gas natural y el petróleo, así como por las energías renovables, debido a su disponibilidad y simplicidad de uso. La creciente demanda energética y el deterioro ambiental son dos aspectos muy importantes a considerar en estos tiempos.

En el 2017, la demanda mundial energética creció un 2.2% por encima del promedio de los últimos 10 años que fue de 1.7%. Este crecimiento fue impulsado por un crecimiento económico más fuerte en los países desarrollados y por una leve desaceleración en el ritmo de mejoría en la intensidad energética. (British Petroleum México, 2018)

En México, la demanda energética de igual manera presentó un crecimiento notable en estos años, debido a que la población ha estado creciendo a un ritmo acelerado.

Durante el 2016, la producción de energía primaria se vio superada por el consumo de energía. La oferta interna bruta de energía aumentó 7.2. Para poder abastecer las necesidades energéticas internas, se tuvo que recurrir a las importaciones de insumos energéticos. En 2016 fue el segundo año consecutivo en el que México mostró dependencia de las importaciones de energía para poder satisfacer la demanda. (Rodríguez, y otros, 2017)

En la industria petroquímica el ahorro de energía es un punto de gran interés que se ha venido considerando en estos tiempos, porque está asociada a ahorros económicos; por lo cual se han tomado medidas para reducir su consumo, y éstas se basan principalmente en la optimización de los procesos. Las optimizaciones más utilizadas en la industria para la eficiencia energética son el método de exergía y el de punto de pliegue (análisis Pinch) (Ayotte-Sauvé & Sorin, 2010) ambos métodos son considerados una buena alternativa ya que se obtienen resultados significativos que ayudan de gran manera a tomar las mejores decisiones para el ahorro de energía en el proceso. Así mismo, se ha observado en los diferentes procesos que el método de exergía se ha empleado con más frecuencias en equipos grandes como columnas de destilación, reactores etc. (Mendoza & Riascos, 2015), mientras que el método de punto de pliegue se emplea más para redes de intercambiadores de calor. (Álvarez, Fortes, & Aguilar, 2007)

Como se ha mencionado anteriormente, el ahorro energético es un aspecto muy importante para nuestro país, por lo cual se han implementado diferentes análisis de optimización para lograr dicho ahorro en los procesos, estos análisis van desde columnas de destilación, generadores de vapor, sistemas de refrigeración, etc.

Estos procesos se han realizado bajo el método de exergía, el cual es un método que permite identificar, localizar y cuantificar las principales causas de irreversibilidades termodinámicas de un sistema o proceso, mediante el estudio de las pérdidas y eficiencias exergéticas. Este método tiene una gran ventaja porque es muy útil para mejorar la eficiencia de un sistema o proceso. En México, este tipo de análisis se desarrollan a partir de 1984 en varios institutos de investigación como la UNAM, el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP) y otros. Por ejemplo, en la Central Termoeléctrica de Ciudad Lerdo, se empleó el análisis de exergía para optimizar dicha central, bajo este método se obtuvo como resultado un aumento del 36.76% en la eficiencia exergética de la central. (Lugo, Salazar, Zamora, Torres, & Toledo, 2009).

❖ **CONCEPTOS BÁSICOS TERMODINÁMICOS**

La termodinámica se define como la ciencia de la energía, su estudio formal comienza a principios del siglo XIX en consideración al concepto de energía del calor: la capacidad de los cuerpos calientes para producir trabajo.

Las leyes de la termodinámica tratan con interacciones entre sistemas. Para una masa de control, estas interacciones pueden ser divididas en dos clases: interacciones de trabajo e interacciones de calor.

El estudio de la termodinámica se enfoca de manera macroscópica a sistemas, los cuales se encuentran definidos como la cantidad de materia que puede estar formada por una o varias sustancias, limitada por fronteras fijas o móviles; este puede ser un equipo, una planta, un complejo industrial, etc.

Los sistemas se pueden considerar cerrados o abiertos. Un sistema cerrado (conocido también como una masa de control) consta de una cantidad fija de masa y ninguna otra puede cruzar su frontera. Pero la energía, en forma de calor o trabajo puede cruzar la frontera. Es decir no existe un intercambio de materia, más sin embargo si hay intercambio de energía. Un sistema abierto (considerado como volumen de control) presenta un intercambio tanto de masa como de energía.

Cualquier característica de un sistema se llama propiedad. Algunas propiedades más comunes son presión, temperatura, volumen y masa. Se considera que las propiedades

son intensivas (aquellas independientes de la masa de un sistema, como temperatura, presión y densidad) o extensivas (aquellas cuyos valores dependen de la cantidad de masa, por ejemplo la energía interna, energía potencial, cinética, entropía, entalpía etc.).

En un estado específico, todas las propiedades de un sistema tienen valores fijos, y si se cambia el valor de una propiedad, el estado cambia a otro diferente.

En un estado de equilibrio no hay potenciales desbalanceados (o fuerzas impulsoras) dentro del sistema, y éste no experimenta cambios cuando es aislado de sus alrededores. Existen tres tipos de equilibrio:

- Equilibrio térmico: cuando no hay variación con respecto a la temperatura.
- Equilibrio mecánico: no hay cambio de presión en alguno de sus puntos.
- Equilibrio químico: si su composición química no cambia con el tiempo.

Como se mencionó anteriormente, la termodinámica es el estudio de la energía, y esta energía puede existir de diferentes formas: térmica, mecánica, cinética, potencial, interna, eléctrica, magnética, química y nuclear.

Calor y trabajo son dos tipos de energía en tránsito, es decir, energía que pasa de un cuerpo a otro. El calor es la forma de energía que se transfiere entre dos sistemas debido a una diferencia de temperatura y se reconoce sólo cuando cruza la frontera de un sistema. Existen varios tipos de calor, los más conocidos son el calor latente (energía que se transfiere para cambiar de fase a temperatura constante), calor sensible (cuando la temperatura incrementa sin cambiar el estado del cuerpo) y calor específico (calor necesario para incrementar una unidad de masa un grado de temperatura).

El trabajo es la transferencia de energía relacionada con una fuerza que actúa a lo largo de una distancia. Por lo tanto, estas formas de energía no se almacenan y nunca están contenidas en el cuerpo o sistema. La energía se guarda en forma de energía cinética, potencial e interna. La principal diferencia entre ambas es la forma en la que se transfieren. El calor se transfiere a través de un vínculo térmico (diferencia de temperatura) y el trabajo se transfiere a través de un vínculo mecánico (fuerzas y desplazamientos).

❖ PRIMERA LEY DE LA TERMODINÁMICA

La primera ley de la termodinámica, es también conocida como el principio de conservación de la energía, la cual establece que la energía no se puede crear ni destruir durante un proceso; sólo puede cambiar de forma.

Al aplicar la primera ley a un proceso dado, la influencia del proceso se divide en dos partes, el sistema y sus alrededores. Se define como sistema la parte donde se lleva a cabo el proceso; todo aquello con lo que el sistema interactúa se considera como los alrededores. Por lo tanto, la primera ley se aplica al sistema y sus alrededores, y no únicamente al sistema. Se puede escribir como:

$$\Delta(\text{Energía del sistema}) + \Delta(\text{Energía e alrededores}) = 0$$

Todo intercambio de energía entre el sistema y sus alrededores se hace por medio del calor y trabajo, y el cambio en la energía total de los alrededores es igual a la energía neta transferida hacia o desde él como calor y trabajo.

$$\Delta(\text{Energía de los alrededores}) = \pm Q \pm W$$

La energía del sistema se puede desarrollar de diferentes maneras. Por lo cual, si la masa del sistema es constante, las energías que participan son la interna, cinética y potencial.

$$\Delta(\text{Energía del sistema}) = \Delta E = \Delta U + \Delta E_K + E_P$$

Dónde:

- ΔE : Energía total (interna, cinética y potencial)
- ΔU : Energía interna (energía que se relaciona con la estructura molecular y configuración de las partículas internas de la masa).
- ΔE_K : Energía cinética (Energía que posee un sistema como resultado de un movimiento).
- ΔE_P : Energía potencial (La energía que posee un sistema como resultado de su incremento de altura en un campo gravitacional)

Sabemos que la formula general de balance se expresa de la siguiente manera:

$$ENTRADAS - SALIDAS = ACUMULACIÓN - GENERACIÓN$$

A partir de este balance es como se considerará para determinar los balances de energía para los sistemas.

El principio de conservación de la energía se expresa como: el cambio neto (aumento o disminución) de la energía total del sistema durante un proceso es igual a la diferencia entre la energía total que entra y la energía total que sale del sistema durante el proceso. Esto es básicamente el balance de energía que se aplica a un sistema en un proceso.

$$E_{Entrada} - E_{Salida} = \Delta E_{Sistema}$$

Donde:

$$\Delta E_{Sistema} = E_{final} - E_{inicial} = E_2 - E_1$$

Las energías de entrada y salida, son las formas en las que se puede transferir la energía que intervienen en un sistema, que es en calor (Q) y trabajo (W).

$$\left(\begin{array}{c} \text{Transferencia de energía} \\ \text{mediante calor y trabajo} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Cambio de energía} \\ \text{interna, cinética y potencial} \end{array} \right)$$

Reescribiendo la ecuación:

$$\pm Q \pm W = E_2 - E_1$$

También se puede considerar que existe un intervalo de tiempo, por lo cual la ecuación se establecería como:

$$\left(\begin{array}{c} \text{Tasa neta de transferencia de} \\ \text{energía mediante calor y trabajo} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Tasa de cambio de energía} \\ \text{interna, cinética y potencial} \end{array} \right)$$

$$\dot{E}_{Entrada} - \dot{E}_{Salida} = \frac{dE_{Sistema}}{dt}$$

En los **sistemas cerrados** a menudo no experimentan cambios en su energía tanto potencial como cinéticas, sino solamente en su energía interna, por lo tanto su balance de energía se expresa:

$$\pm Q \pm W = \Delta U$$

Si se considera un intervalo de tiempo se determina como:

$$\pm Q \pm W = \frac{dU}{dt}$$

El balance de energía para sistemas abiertos se representa como:

$$\pm Q \pm W + E_{Entrada} - E_{Salida} = \Delta E_{Sistema}$$

$$\pm Q \pm W + \sum m(U + 1/2 V^2 + gz + PV)_{ent} - \sum m(U + 1/2 V^2 + gz + PV)_{sal} = \Delta(U + 1/2 V^2 + gz + PV)_{sist} m_{sist}$$

Existen varias propiedades termodinámicas relacionadas con la energía interna que se definen debido a la utilidad que tienen con la aplicación de la termodinámica a los procesos prácticos. Una propiedad que relaciona la energía interna, la presión y el volumen específico es la entalpía.

$$H = U + PV$$

Para sistemas abiertos, el término de entalpía es muy importante ya que como se mencionó anteriormente en los sistemas abiertos existe un intercambio de masa y energía, por lo tanto, la variación de dicha propiedad expresa una medida de la cantidad de energía absorbida o cedida por un sistema termodinámico, es decir, la cantidad de energía que un sistema puede intercambiar con su entorno.

Así mismo el balance de energía para **sistemas abiertos** en términos de entalpías:

$$\pm Q \pm W + \sum m(H + 1/2 V^2 + gz)_{ent} - \sum m(H + 1/2 V^2 + gz)_{sal} = \Delta(H + 1/2 V^2 + gz)_{sist} m_{sist}$$

O también se puede colocar como:

$$\pm Q \pm W + \sum m(H + 1/2 V^2 + gz)_{ent} - \sum m(H + 1/2 V^2 + gz)_{sal} = \frac{dE}{dt}$$

Por lo general los términos de energía cinética y potencial son casi despreciables en comparación con las otras formas de energía, por lo tanto se anulan dichos términos, quedando el balance de energía de la siguiente manera:

$$\pm Q \pm W + \sum mH_{ent} - \sum mH_{sal} = \frac{dE}{dt}$$

Si se trabaja en régimen permanente el término de acumulación desaparece, quedando el balance como:

$$\pm Q \pm W + \sum m(H + 1/2 V^2 + gz)_{ent} - \sum m(H + 1/2 V^2 + gz)_{sal} = 0$$

Despreciando los términos de energía potencial y cinética:

$$\pm Q \pm W + mH_{ent} - mH_{sal} = 0$$

Que también se representa como:

$$\pm Q \pm W = \Delta H$$

La primera ley trata con las cantidades de energía de varias formas transferida entre el sistema y los alrededores, y con los cambios en la energía almacenada en el sistema.

Resulta claro que los procesos van en cierta dirección y no en la dirección contraria. La primera ley de la termodinámica no restringe la dirección de un proceso, pero satisfacerla no asegura que en realidad ocurra el proceso. Por consiguiente, la segunda ley es necesaria para establecer la diferencia entre la energía mecánica y la energía interna, así como indicar la dirección de los procesos espontáneos.

❖ SEGUNDA LEY DE LA TERMODINÁMICA

La termodinámica trata las transformaciones de la energía y sus leyes describen los límites dentro de los cuales se observa que ocurren dichas transformaciones. Recapitulando, la primera ley establece que la energía se conserva en cualquier proceso y no impone ninguna restricción con respecto a la dirección en la que ocurre éste. Sin embargo, la experiencia indica la existencia de esta restricción, cuya formulación completa los fundamentos de la termodinámica y cuya expresión constituye la segunda ley.

Un proceso no puede ocurrir a menos que satisfaga tanto la primera como la segunda ley de la termodinámica. El uso de la segunda ley no solo se limita a identificar la dirección de la transferencia de calor de los procesos, sino que también afirma que la energía tiene calidad así como cantidad, de igual manera impone restricciones a las eficiencias posibles en los motores térmicos.

Así mismo, la segunda ley define la perfección para los procesos termodinámicos. Se puede usar para cuantificar el nivel de perfección de un proceso y señalar la dirección para eliminar eficazmente las imperfecciones.

Se tienen varios postulados con respecto a la segunda ley de la termodinámica, uno de ellos es que se sabe que el flujo de calor entre dos cuerpos siempre se da del cuerpo más caliente al más frío y nunca en la dirección opuesta. Otro importante son los términos de reversibilidad e irreversibilidades de un proceso.

El enunciado de Clausius explica es imposible operar un dispositivo cíclico de tal manera que el único efecto sea la transferencia de calor desde un depósito de calor hacia otro depósito de mayor temperatura.

La limitación de la eficiencia térmica de las máquinas térmicas forma la base para el enunciado de Kelvin-Planck de la segunda ley de la termodinámica, que expresa que *ninguna máquina térmica puede tener una eficiencia térmica de 100 por ciento.*

Es imposible que un proceso cíclico convierta completamente el calor absorbido por un sistema en trabajo hecho por el sistema. La palabra cíclico requiere que el sistema recupere periódicamente su estado original. La segunda ley no prohíbe la producción de trabajo a partir del calor, pero coloca un límite sobre la fracción de calor que en cualquier proceso cíclico puede convertirse en trabajo.

La segunda ley establece que existe una propiedad termodinámica extensiva de un sistema llamada entropía (S). G. H. Hatsopoulos, en 1965, realizó una definición de dicha propiedad termodinámica, la cual es proporcional a la energía no disponible en un sistema.

Sí representamos con E_d al trabajo disponible de un sistema, cuyo contenido total de energía es E , se puede escribir lo siguiente:

$$E = E_d + E_{nd}$$

Donde E_{nd} es la "energía No disponible" del sistema.

Recordando que la Primera Ley para un sistema aislado (UNIVERSO):

$$dE = 0$$

Y que de acuerdo al principio de degradación de la energía, dE_d , debe ser negativo ($dE \leq 0$) para el mismo sistema.

En consecuencia, para un sistema aislado:

$$(dS_{ais}) \geq 0$$

La entropía para un sistema aislado nunca puede disminuir, y la calidad de la energía no se puede conservar. La energía del universo es constante puesto que no hay nada con que intercambiar, el universo puede intercambiar con el vacío pero es como no intercambiar con nada.

De acuerdo con la segunda ley: Como S crece y como es proporcional a la energía no disponible; entonces la **energía No disponible crece cuando S crece**.

La calidad de energía está en función de su potencialidad de hacer trabajo, por lo tanto, hay más calidad cuando puede hacer más trabajo. La calidad de energía se degrada o disminuye, ya que la energía no disponible aumenta y la energía disponible disminuye (La energía no es constante).

$$(dS)_{sist} + (dS)_{alrd} \geq 0$$

$$\text{Sistema} + \text{Alrededores} = \text{Universo}$$

Cuando existe un cambio de estado, cambia la calidad de la energía y por lo tanto crea o aumenta la entropía.

La entropía para sistemas reversibles se puede determinar como:

$$dS = \frac{dQ_{rev}}{T}$$

$$dS = 0$$

El signo de igualdad corresponde a un **proceso reversible**. Se define como un **proceso reversible** aquel que se puede invertir sin dejar ningún rastro en los alrededores. Es decir, tanto el sistema como los alrededores vuelven a sus estados iniciales una vez finalizado el proceso inverso. Esto es posible sólo si el intercambio de calor y trabajo netos entre el sistema y los alrededores es cero para el proceso combinado. El sistema se mantiene en

equilibrio. Este proceso siempre va a cumplir la igualdad porque no degrada la energía, no pierde energía, no crea entropía.

Cuando un proceso es reversible y adiabático, $dQ_{rev} = 0$ es decir, la entropía de un sistema es constante durante un proceso adiabático reversible, y se dice entonces que el proceso es isoentrópico.

Aunque sabemos que todos los procesos no son completamente reversibles y por lo cual siempre existe una generación de entropía.

El signo de la desigualdad constituye a un **proceso irreversible**. Un **proceso irreversible** se denomina como procesos que no son reversibles, es decir, no se pueden revertir por sí mismos de forma espontánea y restablecer el sistema a su estado inicial. Este proceso genera entropía y degrada la calidad de la energía del universo y expresa la energía que en un sistema se pierde y ya no produce trabajo; por lo tanto cumple con:

$$dS \geq 0$$

Para la generación, producción o creación de entropía:

$$(dS)_{ais} = (dS)_{sist} + (dS)_{irre} = \overline{dS}_{irre}$$

Donde \overline{dS}_{irre} es la generación de entropía debido a las irreversibilidades.

Los factores que causan que un proceso sea irreversible se llaman **irreversibilidades**, por ejemplo: el mezclado de dos fluidos, la transferencia de calor a través de una diferencia de temperatura finita, la resistencia eléctrica, las reacciones químicas, etc.

Los procesos que se tienen en la práctica son irreversibles y por ende producen deterioros en el rendimiento. Para hacer un uso más eficiente de la energía es necesario disminuir las irreversibilidades (o bien el trabajo perdido) y por lo tanto la generación de entropía. Primero se deben identificar las causas de estas irreversibilidades termodinámicas.

Saber el grado de reversibilidad en los procesos es muy importante, ya que de acuerdo a este término se involucra el concepto de la calidad de energía y con ello se pueda obtener una utilidad inmediata.

Como se mencionó anteriormente, la entropía es una medida de la energía no disponible. Cada vez que generamos, producimos entropía, estamos creando energía no disponible.

▪ BALANCE DE ENTROPÍA

La entropía para un sistema termodinámico en equilibrio mide el grado de organización del sistema, es decir la razón incremental entre un incremento de energía interna frente a un incremento de temperatura del sistema.

Todos los procesos producen entropía (degradan la energía, aumentando el desorden molecular) y en esta generación se pierde la capacidad para realizar trabajo útil. Por lo cual el término de generación es una medida cuantitativa de la magnitud de las irreversibilidades.

Para esto es necesario establecer un balance de esta propiedad. Este balance predice la producción ΔS_{irrev} , el cual es el aumento irreversible en la entropía del universo. Este término que debe ser una cantidad positiva, es una medida termodinámica de la ineficiencia de un proceso.

Sabemos que la formula general de balance se expresa de la siguiente manera:

$$ENTRADAS - SALIDAS = ACUMULACIÓN - GENERACIÓN$$

En términos de entropía:

$$\frac{Q}{T_{sist}} + \sum m_{entrada} S_{entrada} - \sum m_{salida} S_{salida} = \Delta(m_{sist} S_{sist}) - \Delta S_{generación}$$

Donde el primer término se refiere a el flujo de entropía por la transferencia de calor del exterior del sistema; siendo T la temperatura del sistema.

Al despejar $\Delta S_{generación}$ de la ecuación general se obtiene:

$$\Delta S_{generación} = \Delta(m_{sist} S_{sist}) - \frac{Q}{T_{sist}} + \sum m_{salida} S_{salida} - \sum m_{entrada} S_{entrada}$$

Para un proceso reversible el término de generación es cero, ya que no existen irreversibilidades en el sistema:

$$\Delta S_{generación} = 0$$

❖ TRABAJO PERDIDO

El interés de la termodinámica se centra especialmente en considerar la manera en que se transforman las distintas formas de energía (en calor y trabajo) y la relación existente entre estos procesos y la temperatura.

Uno de los aspectos más importantes dentro del ámbito termodinámico es el potencial de trabajo, ya sea que se obtenga o se requiera dentro de un sistema.

La primera ley se relaciona con la cantidad de energía y las transformaciones de energía de una forma a otra sin considerar su calidad. Conservar la calidad de la energía es una cuestión importante, y la segunda ley provee los medios necesarios para determinarla, así como el grado de degradación que sufre la energía durante un proceso y de la pérdida de oportunidades para efectuar trabajo, además de ofrecer el margen suficiente para la mejora.

Estudiar y analizar estas leyes de manera individual no es lo más apropiado ya que no proporcionan información concreta. Esto es porque al resolver solo bajo el principio de la primera ley nos hace omitir la segunda y por lo tanto se obtendrían resultados erróneos, fuera de la realidad. Es por eso que el término de trabajo perdido hace referencia a la intervención de ambas leyes:

➤ Primera ley:

$$\frac{dE}{dt} = \sum_{i=0}^n Q_i - W + \sum mH_{ent} - \sum mH_{sal}$$

➤ Segunda ley:

$$S_{gen} = \frac{dS}{dt} - \sum_{i=0}^n \frac{Q_i}{T_i} - \sum mS_{entrada} + \sum mS_{salida}$$

Para combinar ambas leyes se requieren igualar a partir del término Q_0 , el cual representa el rango del calor cedido a la atmósfera que ambas leyes contienen, quedando como:

$$Q_0 = \frac{dE}{dt} - \sum_{i=1}^n Q_i + W - \sum mH_{ent} + \sum mH_{sal}$$
$$Q_0 = \frac{T_0 dS}{dt} - T_0 \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{T_i} - T_0 \sum mS_{ent} + T_0 \sum mS_{sal} - T_0 S_{gen}$$

Al combinarlas:

$$\frac{dE}{dt} - \sum_{i=1}^n Q_i + W - \sum mH_{ent} + \sum mH_{sal} = T_0 \frac{dS}{dt} - T_0 \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{T_i} - T_0 \sum mS_{ent} + T_0 \sum mS_{sal} - T_0 S_{gen}$$

Despejando el trabajo nos queda:

$$W = -\frac{d(E - T_0 S)}{dt} + \sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{T_0}{T_i}\right) Q_i + \sum_{ent} m(H - T_0 S) - \sum_{sal} m(H - T_0 S) - T_0 S_{gen}$$

Se puede definir a partir de la ecuación:

$$W_{rev} = -\frac{d(E - T_0 S)}{dt} + \sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{T_0}{T_i}\right) Q_i + \sum_{ent} m(H - T_0 S) - \sum_{sal} m(H - T_0 S)$$

Por lo tanto, se puede deducir que:

$$W = W_{rev} - T_0 S_{gen}$$

La proporcionalidad entre trabajo perdido y la generación de entropía está representada por el Teorema de Gouy-Stodola (denominada también como ley de pérdida de exergía). El cual describe la cantidad de energía no disponible que tiene lugar en un sistema termodinámico:

$$W_{perdido} = T_0 S_{gen}$$

Y se puede establecer:

$$W = W_{rev} - W_{perdido}$$

El límite máximo de trabajo transferido del que es capaz el sistema, se le conoce como trabajo real (W), y se puede evaluar con la diferencia del trabajo reversible (W_{rev}) y el trabajo que se pierde ($W_{perdido}$) debido a las irreversibilidades del proceso que provoca la generación de entropía, el trabajo perdido siempre va a tener un valor positivo. Y cabe mencionar que el trabajo reversible siempre será mayor al trabajo perdido.

Para procesos reversibles el trabajo perdido es cero, ya que en cuanto mayor sean las irreversibilidades de un proceso, el incremento en la entropía total y la cantidad de energía de la cual no se dispone para la producción de trabajo, son mayores.

Teniendo estas ecuaciones se puede decir que la entropía generada del sistema es una medida del trabajo disponible que ha sido destruido.

❖ ANTECEDENTES DEL MÉTODO DE EXERGÍA

El método de exergía es especialmente adecuado para conseguir un uso más eficiente de los recursos energéticos, ya que considera la calidad de energía y no sólo la cantidad de esta, por lo cual se puede relacionar los aspectos tanto termodinámicos como económicos y gracias a este análisis permite optimizar cualquier proceso o sistema industrial.

El concepto de exergía surge en 1824 cuando el científico francés Sadi Carnot publicó su trabajo en el que determinó la cantidad máxima de trabajo que puede ser obtenido de una fuente de calor, y que hoy en día es conocido como la exergía del calor. En 1843 el alemán Julius Meyer formuló el enunciado del primer principio de la termodinámica y para 1848 el inglés James Joule lo demostró experimentalmente. Ya en 1850 el científico alemán Rudolf Clausius (1822 – 1888) formalizó los enunciados de los dos principios de la termodinámica y define la función de entropía.

Pero no fue hasta en 1889 cuando el francés George Gouy propuso el nombre de “Energie utilisable” (Energía utilizable) como una nueva función termodinámica para generalizar el hecho conocido de que solamente una fracción de la energía térmica puede ser convertida en energía mecánica.

Nueve años después, en 1898 el alemán A. Stodola utilizó el término “freie technische energie” para hablar de exergía. Los trabajos de Gouy y Stodola, realizados independientemente, son ciertamente equivalentes. El primero se consagró en los sistemas cerrados y el segundo en los sistemas abiertos. Su principal aportación en el desarrollo de la exergía es la definición de la destrucción de exergía como el producto de la temperatura del medio ambiente y del cambio de entropía que conocemos hoy día como el teorema de Gouy-Stodola.

Entre 1925 y 1932 los norteamericanos William DeBaufgre y Joseph Keenan, y los franceses G. Darrieus, G. Lerbergue y P. Glansdorf crean el término “available energy” (energía disponible). Los términos siguieron surgiendo y a mediados del siglo pasado cuando los especialistas en el tema empiezan a proponer un término de aceptación mundial; es así cuando el alemán U. Grigull propone la palabra “Ektalpie” y que posteriormente fuera debatida por el científico yugoslavo Z. Rant (1904 – 1972) el cual establece la palabra “exergie” o exergía como el término que debe emplearse, fundamentando su estructura con base en su significado etimológico.

❖ EXERGÍA

La exergía es una función de estado termodinámico que mide el máximo trabajo útil que podemos obtener de un flujo de energía dado, en cualquiera de sus formas que sea almacenado o transferido. Así mismo, la exergía es un parámetro que mide la calidad de la energía. Este parámetro puede emplearse para analizar la eficiencia energética de los procesos industriales.

Si el estado de una cantidad fija de materia en un sistema, es diferente al del ambiente, existirá la posibilidad de producir trabajo. Sin embargo, según vaya el sistema evolucionando hacia el equilibrio con el ambiente, dicha posibilidad disminuirá, desapareciendo por completo cuando alcancen el equilibrio uno con el otro. A este estado particular del sistema se le denomina **estado muerto**.

ASPECTOS DE LA EXERGÍA:

- La exergía es una propiedad extensiva.
- El valor de la exergía no puede ser negativo (excepto cuando la presión del sistema sea menor a la presión del estado de referencia)
- La exergía es el trabajo teórico máximo que puede obtenerse del sistema combinado formado por el sistema más el ambiente, al evolucionar el sistema desde un estado dado hasta su estado muerto por su interacción con el ambiente.
- La exergía también puede definirse como el trabajo teórico mínimo que será necesario aportar para conseguir que el sistema pase desde su estado muerto hasta un estado prefijado.
- La exergía no se conserva, sino que se destruye a causa de las irreversibilidades.

● BALANCE DE EXERGÍA:

La naturaleza de la exergía es opuesta a la de la entropía, en la cual la exergía puede destruirse pero no puede crearse. Existe en esencia dos procedimientos relacionados entre sí, que se pueden emplear para cuantificar la naturaleza irreversible de los procesos reales y para efectuar análisis basados en la consideración simultánea de la primera y segunda ley de la termodinámica. Uno de los procedimientos utiliza los conceptos de entropía y de trabajo perdido. El otro procedimiento emplea los conceptos de disponibilidad (exergía) y de irreversibilidades (pérdida de disponibilidad o destrucción de exergía).

La ecuación para la disponibilidad es semejante a la ecuación de energía, excepto que tiene una gran diferencia; la ecuación de energía expresa la ley de conservación de

energía, mientras que la ecuación de disponibilidad o exergía se puede considerar como un planteamiento del principio de degradación de la energía:

$$\left(\begin{array}{c} \text{Entrada de} \\ \text{exergía} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{Salida de} \\ \text{exergía} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Cambio en la} \\ \text{exergía almacenada} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{Destrucción de} \\ \text{exergía} \end{array} \right)$$

Donde la destrucción de exergía es una cantidad diferente de cero, positiva para todo proceso real. Esto se basa en la naturaleza de que la energía útil (exergía) no se conserva excepto durante procesos termodinámicamente perfectos.

Para obtener datos reales se combinan las dos leyes de la termodinámica, dando como resultado el surgimiento del concepto de **trabajo perdido** el cual ha sido explicado anteriormente, y es ahí donde se parte para poder definir el concepto de *destrucción de exergía* y de *exergía* como tal. La ecuación de trabajo perdido se representa como:

$$W = -\frac{d(E - T_0 S)}{dt} + \sum_{i=1}^n \left(1 - \frac{T_0}{T_i}\right) Q_i + \sum_{ent} m(H - T_0 S) - \sum_{sal} m(H - T_0 S) - T_0 S_{gen}$$

Se utilizaran otros términos que puedan representar de una manera más sencilla este balance y de igual modo se escogió para que sea consistente con la nomenclatura de exergía que se desarrollará más adelante.

- El término **W** que es el máximo trabajo mecánico disponible será representado por (**E_w**).
- El trabajo disponible (exergía) en una interacción de transferencia de calor, así que el término $\left(1 - \frac{T_0}{T_i}\right) Q_i$ se representará por (**E_Q**).
- El flujo aprovechable específico (**H - T₀S**) estará representado por (**b**).
- El término de acumulación de exergía $\left(\frac{d(E - T_0 S)}{dt}\right)$ se representará como (**ΔA**).

Por lo tanto la ecuación en términos de exergía es:

$$E_w = -\Delta A + \sum_{i=1}^n (E_Q)_i + \sum_{ent} mb - \sum_{sal} mb - T_0 S_{gen}$$

La exergía mide la cantidad máxima de trabajo que puede obtenerse cuando una sustancia es llevada desde su estado inicial hasta el equilibrio no restringido con el ambiente que lo rodea. Por lo que el flujo de esa cantidad máxima de trabajo (flujo de exergía) se obtiene restando el flujo aprovechable de la sustancia en condiciones a las que se encuentra (**b**) menos el mismo flujo pero en condiciones de equilibrio con el ambiente (**b₀**):

$$e_x = b - b_0$$

$$e_x = H - H_0 - T_0(S - S_0)$$

Colocando este término en la ecuación:

$$E_w = \sum_{i=1}^n (E_Q)_i + \sum_{ent} me_x - \sum_{sal} me_x - T_0 S_{gen}$$

En estas ecuaciones que se tienen los términos de flujo aprovechable y flujo de exergía, el término $T_0 S_{gen}$, que se conoce como trabajo perdido, ahora es *destrucción de exergía* o *pérdidas de exergía* debido a las irreversibilidades que se presentan en el proceso y se puede representar como E_w perdido:

$$E_w = \sum_{i=1}^n (E_Q)_i + \sum_{ent} me_x - \sum_{sal} me_x - E_w \text{ perdido}$$

Cuando el sistema no requiere ni cede calor y trabajo, la ecuación resulta:

$$E_w \text{ perdido} = \sum_{ent} me_x - \sum_{sal} me_x$$

$$\left(\begin{array}{c} \text{Destrucción} \\ \text{de exergía} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Exergía de} \\ \text{entrada} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{Exergía de} \\ \text{salida} \end{array} \right)$$

Por ahora se ha considerado que la exergía de una sustancia, se obtiene cuando es llevada desde su estado inicial hasta un estado de equilibrio térmico T_0 y P_0 (exergía termodinámica).

Esto es correcto si la sustancia no interviene en un proceso químico y además se encuentra en un circuito cerrado, de lo contrario se debe agregar el término de *exergía química*, el cual define la cantidad de trabajo que se obtiene al llevar a la sustancia desde una composición inicial con un potencial químico (μ) hasta la composición química con el potencial químico del estado de equilibrio restringido (μ_0), en el cual ya no es posible la producción de trabajo.

Se puede observar que el flujo total de exergía de una sustancia que interviene en un proceso químico queda definido por la suma de las energías termomecánica y química, lo que es:

$$e_t = e_x + e_q = e_x + \sum_{i=1}^n N_i(\mu_i - \mu_{i,0})$$

Para un sistema en el que **no** se lleva a cabo un **proceso químico**, la *exergía total* está definida por la *exergía física o termodinámica*, y cuando si se lleva a cabo un **proceso químico**, la *exergía total* la forman la *suma de la exergía física y química*.

(quitar marcador del párrafo y la ecuación)

Así que la **ecuación**, cuando existe una sustancia que interviene en procesos químicos, queda:

$$E_W = \sum_{i=1}^n (E_Q)_i + \sum_{ent} m(e_x + e_q) - \sum_{sal} m(e_x + e_q) - E_{w\ perdidido}$$

Que es lo mismo:

$$E_W = \sum_{i=1}^n (E_Q)_i + \sum_{ent} m e_t - \sum_{sal} m e_t - E_{w\ perdidido}$$

El balance de Exergía está desarrollado a partir de los conceptos y balances de la primera y segunda ley de la termodinámica, así mismo, se puede tratar como una propiedad independiente.

La ecuación general del balance de Exergía involucra cuatro contribuciones a la energía disponible que son: la exergía asociada con trabajo, con intercambio de calor, flux másico y transformaciones físicas o químicas. La suma de dichas contribuciones se iguala con la producción de entropía, ya que estas se generan por las irreversibilidades que existen en los procesos.

La **exergía total** representa el máximo potencial de trabajo utilizable que posee la sustancia en cuestión y que es posible aprovechar si la sustancia es llevada hasta las condiciones del estado de referencia.

El cálculo de exergía en un flux másico es muy complejo, puede considerarse como exergía total de una sustancia:

$$e_t = (H - H_o) - T_o(S - S_o)$$

Donde:

- **e_t**= Exergía total.
- **H**= Entalpía
- **S**= Entropía
- **T**= Temperatura
- Los subíndices representan las condiciones del medio ambiente que rodea al sistema en las que ya no es posible obtener trabajo útil, de tal manera que de acuerdo con el concepto de exergía estos valores valgan cero en ese estado.

La **exergía física** se puede dar en exergía **térmica** (debida a la temperatura) y exergía **mecánica** (debida a la presión).

La exergía está compuesta por sus fracciones térmica, mecánica y química, las cuales están determinadas por los gradientes de temperatura, presión y potencial químico, respectivamente; y por ende, define exactamente lo que es consumido en cualquier sistema.

$$e_{total} = \sum x [Ex_{térmicas} + Ex_{mecánicas} + Ex_{químicas}]$$

Donde:

$$e = \int_{T_o}^T Cp T \left(\frac{1 - T_o}{T} \right) dx$$

$$e_m = RT_o \ln \left(\frac{P_o}{P} \right)$$

$$e_q = h(T_o) - T_o S(T_o, P_o, x) - \mu_o$$

Estas ecuaciones representan las contribuciones de exergía que cada mol de la especie aporta a la mezcla.

Para el cálculo del calor específico (Cp) en la exergía térmica, es obtenido a partir de la ecuación del calor específico a presión constante de la especie como gas ideal:

$$Cp = A + BT + CT^2 + DT^3$$

Por lo que la componente térmica por mol de especie será:

$$e = (A - T_o B)(T - T_o) + \frac{1}{2}(B - T_o C)(T^2 - T_o^2) + \frac{1}{3}(C - T_o D)(T^3 - T_o^3) + \frac{1}{4}(T^4 - T_o^4) - AT_o \ln \left(\frac{T}{T_o} \right)$$

Se desarrollarán los cálculos para la **exergía química**, primero es para cuando la especie existe en una *fase pura* condensada en el ambiente estable de referencia, por lo cual, el potencial químico será:

$$\mu_o = h(T_o, P_o) - T_o S(T_o, P_o)$$

Obteniendo así la ecuación descrita anterior de exergía química (eq) como:

$$e_q = h(T_o) - T_o S(T_o, P_o, x) - (h(T_o, P_o) - T_o S(T_o, P_o))$$

Así mismo, también puede ser calculada la exergía química cuando la especie existe en el ambiente estable de referencia solamente como *gas ideal*, por lo que el potencial químico será:

$$\mu_o = RT \ln(x) - RT_o \ln(x)$$

Si la especie no existe en el ambiente estable de referencia, para el cálculo de exergía química debe formularse una reacción química de ésta con otras especies presentes en el mismo, de tal manera que el resultado sea la formulación de productos que también sean constituyentes de dicho ambiente de referencia.

$$e_q = - \left[\Delta H_R - T_o \Delta S_R + \Delta C p_R (T_o - T) + \Delta C p_R \cdot T_o \cdot \ln \left(\frac{T_o}{T} \right) \right] + R \cdot T_o \cdot \ln \left(\frac{x_{\text{reactivos}}}{(x_1 \cdot x_2)_{\text{productos}}} \right) + R T_o \ln(x, P_o)$$

- **AMBIENTE ESTABLE DE REFERENCIA:**

Como se ha visto a lo largo de este proyecto, un concepto clave para llevar a cabo el análisis de exergía es el ambiente de referencia, por lo cual, es importante definir claramente a que se refiere con este término.

La exergía no es únicamente una propiedad termodinámica sino una co-propiedad construida por dos partes: un sistema y un ambiente de referencia.

Si un sistema está en equilibrio absoluto con su entorno circundante, no existen diferencias entre las propiedades del sistema y la exergía es igual a cero. Una vez que se registra una desviación, el sistema contendrá exergía en la misma medida en que se aleja de su ambiente de referencia

El ambiente estable de referencia para un sistema, es el estado de equilibrio termodinámico completo, en el que no existe la posibilidad de realizar un trabajo por cualquier interacción entre las partes del ambiente, debido a las ausencias de gradientes de temperatura, presión, energía cinética o potencial y potencial químico.

Por lo general las condiciones más frecuentes que se adoptan para los cálculos de energía en un ambiente estable de referencias son:

- Presión atmosférica en el lugar de estudio: $P_0 = 1 \text{ atm}$.
- Temperatura atmosférica promedio en el lugar de estudio: $T_0 = 25^\circ\text{C}$.

Cualquier ambiente de referencia se considera como infinito y en equilibrio, o el equivalente a un estado muerto. "En el estado muerto, un sistema tiene la misma temperatura y presión como el ambiente de entorno (es decir, que existe en equilibrio térmico y mecánico); no tiene energía potencial ni cinética relativa al ambiente (velocidad y elevación igual a cero) y no reacciona con el ambiente, es decir que es inerte químicamente" "(Quattrochi y Luvall 2004, 303)

Se considera *muerto* porque está asociado con la idea de un límite termodinámico. Ha perdido toda su exergía y como consecuencia, todo su potencial para hacer trabajo (Valero y Valero 2014). Por lo tanto, la exergía mide la diferencia entre un sistema dado y el mencionado estado de equilibrio (Dincer y Cengel 2001)

Por consiguiente para el análisis de Exergía que se realizará en la Planta Metanol II, se considerará:

- Una $P_0 = 0.78 \text{ atm} = 80 \text{ KPa}$, esto debido a que es la presión atmosférica a la cual se encuentra el Estado de Puebla. Así como, una temperatura ambiente de $T_0 = 15.5^\circ\text{C}$.

❖ ANÁLISIS DE EXERGÍA EN EL ÁREA DE REFORMACIÓN DE LA PLANTA METANOL II.

• PROCESO

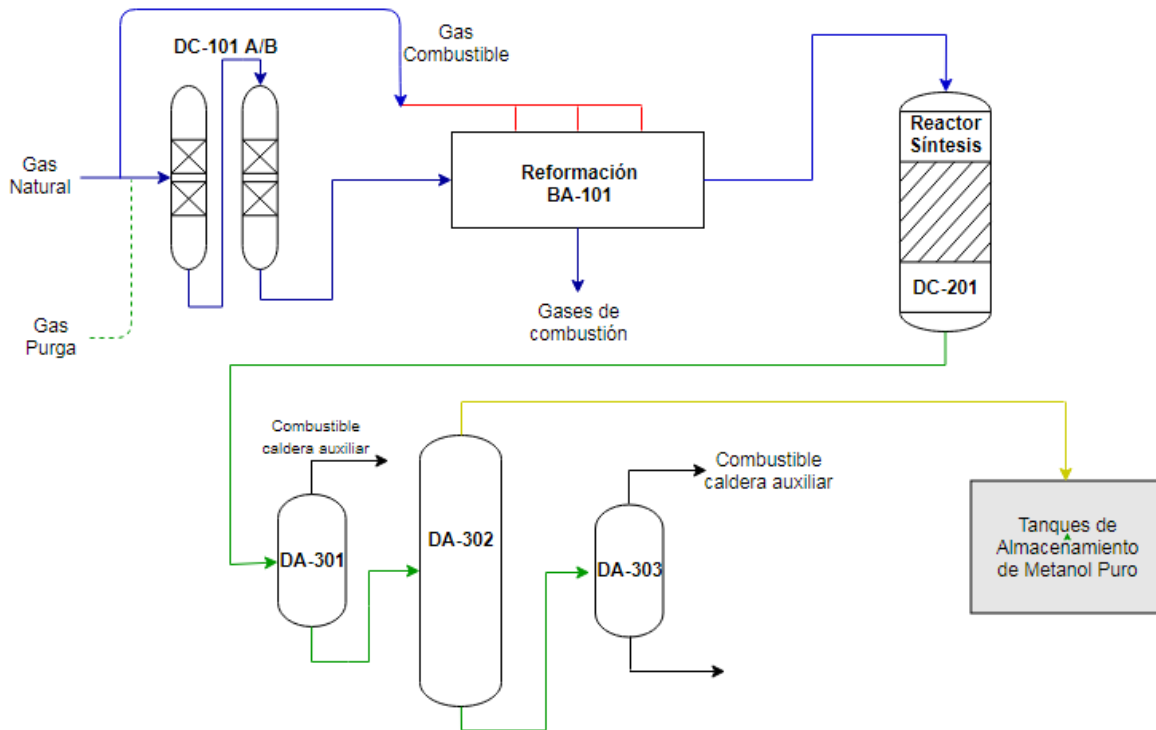


Diagrama de bloques del proceso de la Planta de Metanol II.

El proceso que se lleva a cabo en la Planta Metanol II del Centro Petroquímico Independencia, se emplea como materia prima gas natural (aproximadamente 19,500 m³/h), así mismo como servicios auxiliares se ocupan agua desmineralizada y vapor de agua.

Esta planta se divide en cuatro unidades, la primera unidad (conocida como la **unidad cien**) es el **área de reformación**, en la cual la materia prima pasa por el proceso de desulfurización en las torres DC- 101 A/B, con el propósito de hidrogenar los compuestos de azufre a partir del gas de purga proveniente de la unidad de síntesis, una vez pasado por estas torres, el gas natural se vuelve gas dulce, es decir, que se encuentra libre de compuestos de azufre (esto se hace para no dañar el catalizador del reformador). Pasado por este proceso el gas dulce se dirige al reformador BA-101, la primera reacción que se presenta en este reactor, es una reacción endotérmica, requiere energía para poderse llevar a cabo, por lo tanto, se emplea como combustible gas natural.

Una vez pasado por el reformador, se obtiene gas de síntesis por lo cual se lleva a la siguiente unidad, mientras que los gases de combustión que se produjeron en el reformador, se envían a la zona de convección del proceso, con el objetivo de recuperar y

aprovechar todo ese calor liberado para poder emplearlo en otras corrientes del proceso. Esta parte del proceso, es decir la zona de convección del reformador, será la parte analizada por medio del método de exergía, para conocer su rendimiento energético.

Por otro lado, el gas que se obtiene del reformador, como se mencionó antes pasa a la **unidad doscientos**, que es la **unidad de síntesis**, donde pasa al reactor de síntesis DC-201 y se produce metanol crudo.

Pasando después a la **unidad trescientos**, que es la **unidad de destilación**, donde pasa primero por la torre de destilación DA-301, en donde se separa el metanol de los gases ligeros, en la parte del domo de la columna sale los gases ligeros mientras que en la parte de los fondos sale el metanol con una pureza del 89%, así mismo, sale alcoholes pesados y agua. Posteriormente, los fondos son enviados a la segunda torre de destilación que es la DA-302, donde se separa por la parte del domo el metanol con una pureza del 99.99% y por los fondos el agua acompañada de pequeñas cantidades de metanol y los alcoholes pesados. Por último, los fondos pasan a una tercera torre de destilación que es la DA-303 donde se separa el metanol que quedó en la mezcla, el agua y los alcoholes pesados.

El metanol que se obtiene en la torre de destilación DA-302 pasa a la **unidad cuatrocientos**, que es la **unidad de almacenamiento**.

- **PROCESO DE REFORMACIÓN**

Para la obtención de los datos reales de operación de la planta, se consultaron tanto los Diagramas de Flujo De Proceso (PFD) de las 500 Ton/ día de producción, como en campo, ya que hay algunas condiciones que se tienen en indicadores locales, así mismo, para conocer los datos de las composiciones de la materia prima y de los gases de combustión se obtuvieron a partir de los datos proporcionados por laboratorio.

Como se mencionó anteriormente, el análisis de exergía se llevará a cabo en el ducto de convección en el área de reformación, por lo cual, para obtener un mejor resultado y más preciso, se desarrollará por cada equipo colocado en este ducto el análisis exergético.

Este proceso comienza con los gases de combustión provenientes del reformador BA-101, dichos gases son los que se desprenden de la combustión del metano junto con el aire para proporcionar el calor necesario para que se lleve a cabo la reacción en el reformador.

El primer equipo en el ducto de convección es el precalentador de carga E-101, el cual, por el lado tubos de este equipo lleva la carga (que es el gas natural y vapor de agua) a las condiciones de temperaturas idóneas para que la reacción efectuada en el reformador se lleve a cabo, este calentamiento se hace con los gases de combustión que se obtienen en el reformador, saliendo a una temperatura de 1037°C y empleando el calor liberado para calentar la carga. Posteriormente, estos gases continúan enfriándose y cediendo su calor a los sobrecalentadores de vapor de dos etapas E-102 II, I, primero el vapor saturado que se obtienen en los equipos de generación de la planta, pasan al E-102-II en donde se sobre

calienta con los gases de combustión, enseguida pasa al E-102-I donde existe un aumento de la temperatura hasta alcanzar los 490 °C, este vapor ayuda a impulsar la turbina GT-201 y a su vez a mover el compresor de gas de síntesis.

Una vez que pasan los gases de combustión por estos equipos, se continua a precalentar el aire en el E-105-I que se ocupa para la combustión en el reformador, después de que cede calor a este equipo, pasa al generador de vapor E-103, la entrada de alimentación a calentador es de agua proveniente de la caldereta FB-101, la cual, se encuentra a condiciones de saturación. Gracias a que los gases de combustión han cedido parte de su calor a los equipos ya mencionados, han alcanzado una temperatura a la salida de este generador de 415°C.

Enseguida pasan los gases de combustión al precalentador de agua de alta presión para calderas E-104, de la cual recibe el agua de los precalentadores EA-103 II y I, y la lleva hasta la temperatura de saturación. A la salida de este equipo los gases de combustión han reducido su temperatura hasta alcanzar 284°C.

Finalmente en los precalentadores de aire E-105 III y II, los gases de combustión ceden por último su calor, teniendo una temperatura final de 192 °C, así mismo, estos gases son extraídos por un tiro inducido hacia la atmósfera.

El diagrama que se presenta a continuación, es un diagrama de flujo de proceso de la zona de convección, y se puede observar el proceso descrito anteriormente con algunas condiciones del proceso real. En este diagrama se puede observar claramente los equipos presentes en el ducto, por lo cual, cada uno representa prácticamente un bloque, teniendo en cuenta las entradas y salidas de cada uno de ellos, así mismo, se encontrará el flujo Exergético, realizando el balance de exergía correspondiente para dichos bloques. De esta manera se hará el análisis a 8 intercambiadores de calor tipo serpentín:

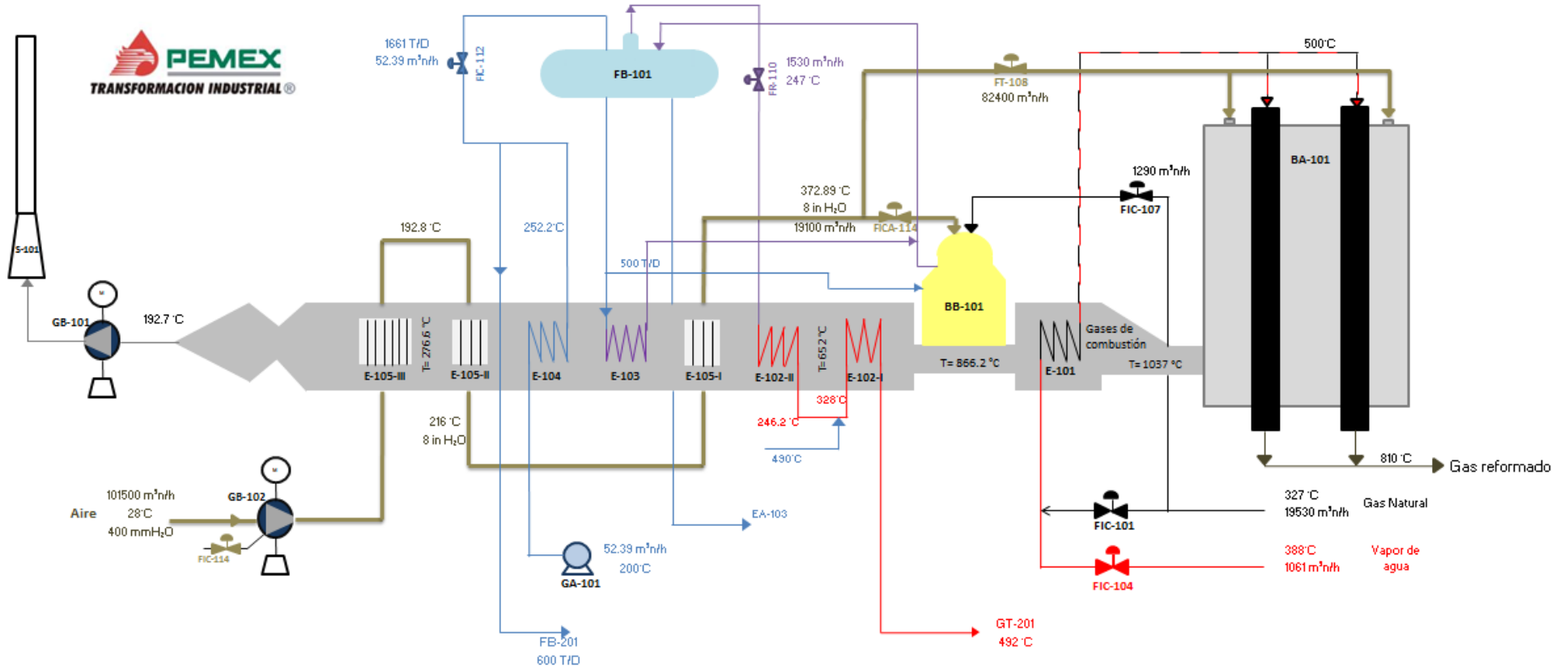


Diagrama de la zona de convección en el área de Reformación de la Planta Metanol II.

- **BALANCE DE EXERGÍA**

Se identificaron todas las corrientes tanto de entrada como de salida de cada bloque que se analizará, para obtener el balance de exergía correspondiente en cada uno de estos puntos. Para lograr este balance, es necesario conocer el balance de materia de los componentes presentes, así como las entalpías y entropías de cada bloque, estos valores se obtuvieron gracias a la ayuda del simulador ASPEN, por lo cual, el proceso se simuló desde la entrada de gas natural y todo el ducto de convección que se encuentra en el área de reformación, empleando las condiciones reales del proceso.

Para llevar a cabo el cálculo de exergía, se tomó en cuenta algunas propiedades termodinámicas, como lo fueron las entalpías y la energía libre de Gibbs de formación, para obtener las entalpías de reacción y las energías libres de Gibbs de reacción, las cuales son empleadas para el cálculo de exergía química, ya que son necesarias para las reacciones que se presentan.

Se tomaron en cuenta las siguientes unidades para cada una de las condiciones necesarias, para el flujo másico [kg/h], temperatura [$^{\circ}C$], presión [kg/cm^2], entalpía [BTU/lb], entropía [$BTU/lb \text{ }^{\circ}R$] y exergía [$MMBTU/h$].

En total se analizaron ocho bloques, comenzando con el bloque de la zona de combustión del BA-101 y posteriormente los 7 serpentines que se encuentran en el ducto de convección. En la siguiente tabla se ilustra los bloques que se analizaron, junto con su descripción y el TAG de cada equipo que se encuentra en el diagrama de flujo de proceso:

TABLA DESCRIPCIÓN DE LOS BLOQUES Y EQUIPOS QUE SE ENCUENTRAN EN EL DUCTO DE CONVECCIÓN

No. De Bloque	DESCRIPCIÓN	TAG
1	Zona de Combustión del BA-101	BA-101
2	Precalentador de carga	E-101
3	Sobrecalentador de vapor alta Presión	E-102-I
4	Sobrecalentador de vapor alta Presión	E-102-II
5	Precalentador de aire a combustión	E-105-I
6	Generador de Vapor	E-103
7	Precalentador de agua a calderas	E-104
8	Precalentador de aire a combustión	E-105-II/III

Para estos bloques se analizaron, las pérdidas irreversibles, la energía suministrada en cada equipo y la efectividad exergética, de la cual ésta última nos ayudara para conocer el rendimiento que tiene cada bloque y observar cual requiere de mayor atención.

- **BALANCE DE MATERIA Y EXERGÍA**

Una vez que se identificaron tanto los bloques y las corrientes que participan en cada uno de ellos, es necesario realizar el balance tanto de materia como de exergía, ya que éste último es el primordial puesto que con ello se verá el rendimiento que tiene cada equipo que se encuentra en la zona de convección y para llegar a ello se requiere del balance de materia.

Como se mencionó anteriormente, para llevar a cabo el balance de exergía en el proceso de reformación, se necesitan algunas propiedades termodinámicas, así como, las composiciones que se tengan de los fluidos que participan en el proceso, el aire en exceso que se emplea para poder llevar a cabo la combustión, etc.

En la siguiente tabla se muestran los resultados del análisis de exergía que se realizó a los equipos presentes en el proceso. Para comenzar se hizo el análisis exergético en los gases de combustión y posteriormente se analizó los fluidos que pasan por los tubos de los intercambiadores de calor. Los valores de EXERGÍA se expresan en las unidades de *[MMBTU/h]*.

Primero, de acuerdo a los resultados obtenidos por parte del análisis de los gases de combustión, quien presenta la mayor *EXERGÍA* es el de la corriente 1, que es la de la corriente que lleva la materia prima, que es el Gas Natural que se emplea también como combustible para el reformador. Y se observa que conforme los gases de combustión pasan por ducto la exergía de los intercambiadores disminuye.

Con respecto al análisis en los flujos que pasan por el interior de los serpentines, se observa de acuerdo a las tablas que quienes presentan mayor *EXERGÍA* son las corrientes: 2, Hidrógeno (conocido como el gas de purga), Gas Desulfurado, GNYP-VAP-IN y GNYP-VAP-OUT (quien lleva la carga a precalentar) y el gas Reformado (este es el que se obtiene una vez que sale del reformador BA-101).

ANÁLISIS DEL FLUJO QUE PASA POR LOS TUBOS DE LOS SERPENTINES

	PM	Gas total	Hidrógeno	Gas	FIC-104	Ent Serp 1	Sal Serp 1	Sal rad. BA-	Ent Serp 2	Sal Serp 2	Ent Serp 3 [E-102-	Sal Serp 3 [E-102-
		2		Desulfurado	Vapor media	[E-101]	[E-101]	101	E-102-I]	[E-102-I]	II]	II]
						GNYP-VAP-	GNYP-VAP-	Reformado	MIX 2	HP STEAM	MIX 1 IN (Vap 101	MIX 2 (E102-II Y
						IN	OUT		(E102-II Y		Y Steam Syn)	GA101)
									GA-101)			
Fracción vapor		1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
T [°C]		20	40	340	385	390	500	850	295	490	252	330
P [kg/cm ²]		17	60	17.8	19.5	18	17.1	15.9	40	40	40	40
N ₂ [mole]	28.0134	0.00764	0.01360	0.0111	0.0000	0.0052	0.0052	0.0033	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
O ₂	31.9988	0.00000	0.00000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
CO ₂	44.0099	0.00372	0.03740	0.0234	0.0000	0.0109	0.0109	0.0123	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
H ₂ O	18.0153	0.00000	0.00030	0.0002	1.0000	0.5349	0.5349	0.2393	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
CO	28.0105	0.00000	0.02420	0.0142	0.0000	0.0066	0.0066	0.1378	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
CH ₄	16.0430	0.96296	0.08810	0.4509	0.0000	0.2098	0.2098	0.0243	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
C ₂ H ₆	30.0701	0.02048	0.00000	0.0085	0.0000	0.0040	0.0040	0.0017	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
C ₃ H ₈	44.0972	0.00323	0.00000	0.0013	0.0000	0.0006	0.0006	0.0002	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
C ₄ H ₁₀	58.1243	0.00147	0.00000	0.0006	0.0000	0.0003	0.0003	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
C ₅ H ₁₂	72.1514	0.00049	0.00000	0.0002	0.0000	0.0001	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
H ₂	2.0159	0.00000	0.83640	0.4895	0.0000	0.2277	0.2277	0.5811	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
		1.00000	1.00000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
Kgmol/h		798.165	1126.369	1924.534	2212.68	4137.214	4137.214	5791.95	4760.29	4760.29	4758.18	4758.18
Kg/hr		13334.08414	6543.873932	19877.95808	39862.18251	59740.14059	59740.14059	60408.05229	85758.24285	85758.24285	85720.23048	85720.23048
H [BTU/lb]		-1980.32	-1747.08	-4065.05	-5282.64	-4065.05	-3929.2	-2153.8	-5552.03	-5430	16.18037698	14.08791341
S [BTU/lb°R]		1.64	1.305	0.4538	0.5533	0.4538	0.3485	0.6925	0.5094	0.7291	-5628.39	-5581.52
Densidad [g/m ³]		11.42349737	13.12570444	3.535647856	6.295362347	4.622604981	3.766555947	1.741233238	880.7	878.7	0.7648	0.749
Flujo de calor [BTU/h]		5.82E+07	2.52E+07	1.78E+08	4.64E+08	5.35E+08	5.17E+08	2.87E+08	1.05E+09	1.03E+09	1.06E+09	1.05E+09
Exergía [MMBTU/hr]		630.367835	793.1740556	1791.286632	146.1623283	2515.15276	2515.283126	5011.691533	258.0561572	259.54605	218.4344651	228.8432002
PM [mezcla]		16.70592439	5.809707061	10.32871234	18.01534	14.4397028	14.4397028	10.42965707	18.01534	18.01534	18.01534	18.01534

ANÁLISIS DEL FLUJO QUE PASA POR LOS TUBOS DE LOS SERPENTINES

	PM	Ent Serp 4 [E-105-I]	Sal Serp 4 [E-105-I]	Ent Serp5 [E-103]	Sal Serp 5 [E-103]	Ent Serp 6 [E-104]	Sal Serp 6 [E-104]	Ent Serp7 [E-105-III-II]	Sal serp7[E-105-III-II]
		AIRE 2	AIRE 3	LIQ-FB101	VAPOR 1	EA-103	VAPOR	AIRE 1	AIRE 2
Fracción vapor		1	1	1	1	0	0	1	1
T [°C]		250	348	150	248	204	242	20	250
P [kg/cm2]		0.9	0.9	40	40	60	60	0.9	0.9
N ₂ [mole]	28.0134	0.7900	0.7900	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.7900	0.7900
O ₂	31.9988	0.2100	0.2100	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.2100	0.2100
CO ₂	44.0099	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
H ₂ O	18.0153	0.0000	0.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.0000	0.0000
CO	28.0105	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
CH ₄	16.0430	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
C ₂ H ₆	30.0701	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
C ₃ H ₈	44.0972	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
C ₄ H ₁₀	58.1243	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
C ₅ H ₁₂	72.1514	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
H ₂	2.0159	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
		1.0000	1.0001	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
Kgmol/h		443.546714	443.536714	500.464	500.464	4955.24	4955.24	443.546714	443.546714
Kg/hr		12796.83172	12796.83172	9016.029118	9016.029118	89270.33338	89270.33338	12796.83172	12796.83172
H [BTU/lb]		101.9325	164.466	-6040	-5771.5	-6560.8	-6499	-15.27062	96.9325
S [BTU/lb°R]		0.2391	0.2439	0.995	0.9485	0.945	0.998	0.46875	0.1991
Densidad [kg/m3]		0.5202	0.4201	4.38	4.38	797.49	745.57	4.38	4.153
Exergía [MMBTU/hr]		19.46879461	21.16261338	12.41612176	18.23320978	25.55274908	32.29580615	12.79609405	19.91405438
Flujo de calor [BTU/h]		-2.88E+06	-4.64E+06	1.20E+08	1.15E+08	1.29E+09	1.28E+09	4.31E+05	-2.73E+06
PM [mezcla]		28.8511476	28.85179808	18.01534	18.01534	18.01534	18.01534	28.8511476	28.8511476

- **PÉRDIDAS EXERGÉTICAS**

Se calculó la *EXERGÍA* que se tiene de cada bloque del ducto de convección, y gracias a estos datos se puede determinar las pérdidas exergéticas que se tiene, tomando en cuenta las *Exergías* individuales de las corrientes tanto de entradas como de salidas. Así mismo, en el sistema existen corrientes de procesos y de servicios, lo que provocará que pueda aumentar o disminuir el flujo de Exergía, dependiendo el bloque en donde se encuentren, además, en un proceso real siempre se genera una pérdida de *EXERGÍA* debido a la *degradación de exergía y a las irreversibilidades*.

Las pérdidas de *EXERGÍA* se dan por dos razones:

1. La primera, se refiere a las pérdidas por la generación de entropía y a la utilización del potencial disponible para que el proceso ocurra. Estas pérdidas se le conoce como trabajo perdido ($T_o S_{gen}$), que surgen de la combinación de las leyes de la termodinámica, en este caso se le conoce como pérdidas irreversibles o destrucción de *EXERGÍA*. Se calculan mediante la diferencia entre la suma de los flujos de *EXERGÍA* que entran a un bloque, equipo o proceso, menos la suma de los flujos de *EXERGÍA* que salen:

$$\dot{E}w_{perdido} = \sum (\dot{m}e_x)_{entrada} - \sum (\dot{m}e_x)_{salida}$$

Dónde:

e_x = es el flujo específico de exergía

m = es el flujo másico

2. Pérdidas que se producen al desalojar corrientes al ambiente, se le conocen como flujo de *EXERGÍA* lanzado al ambiente o simplemente pérdidas efluentes. Estas se obtienen directamente del valor de flujo de *EXERGÍA* que es lanzado al ambiente y representa un potencial directo de recuperación.

La suma de las pérdidas irreversibles y efluentes en el caso de que existieran en el mismo bloque o equipo, se le conoce como Pérdidas Totales.

Para el proceso de reformación de la Planta Metanol II, se calcularon éstas pérdidas para cada bloque, mostrándose a continuación en forma de tabla los resultados:

TABLA PÉRDIDAS IRREVERSIBLES EN LOS BLOQUES DEL DUCTO DE CONVECCIÓN		
No. De Bloque	DESCRIPCIÓN	PÉRDIDAS IRREVERSIBLES [MMBTU/hr]
1	Zona de Combustión del <i>BA-101</i>	148.8514215
2	Precalentador de carga <i>E-101</i>	0.078857613
3	Sobrecalentador de vapor alta Presión <i>E-102-I</i>	4.281265999
4	Sobrecalentador de vapor alta Presión <i>E-102-II</i>	21.11967339
5	Precalentador de aire a combustión <i>E-105-I</i>	4.057655517
6	Generador de Vapor <i>E-103</i>	12.77840882
7	Precalentador de agua a calderas <i>E-104</i>	14.52566804
8	Precalentador de aire a combustión <i>E-105-II/III</i>	15.11170511

Para el cálculo de las pérdidas irreversibles se empleó la ecuación mencionada anteriormente, tomando en cuenta las exergías individuales de cada corriente, por lo tanto, de acuerdo a lo obtenido a cada bloque se determinaron sus pérdidas, y se observa que en el primer bloque es quien representa una mayor pérdida y esto se debe a las irreversibilidades del proceso de combustión, así mismo, el cuarto bloque es quien presenta una mayor pérdida esto es debido de transferencia de calor que se presentan en los intercambiadores de calor.

Por el contrario, los bloques que presentan una menor pérdida debido a las irreversibilidades son en el precalentador de carga, así como, el precalentador de aire a combustión *E-105-I* y el sobrecalentador de vapor de alta presión *E-102-I*.

- **EFFECTIVIDAD EXERGÉTICA**

El concepto de eficiencia es muy utilizado en el ámbito de la termodinámica. La eficiencia basada en la *exergía* que se desarrolla de balances exergéticos se denomina eficiencia exergética.

La eficiencia exergética es definida como la relación porcentual de la exergía total que sale del sistema y la exergía total que entra, pero también se expresa como la fracción de las pérdidas irreversibles de exergía. Debe hacerse una distinción entre lo consumido (que hace referencia a las entradas) y el efecto de lo obtenido (salidas del proceso). Esta forma, a través de incremento en la *exergía* de entrada y salida permite en principio, la construcción de una eficiencia reflejando el grado al cual el propósito de un sistema es alcanzado. De cualquier forma, es posible obtener diferentes valores para la eficiencia, debido a que diferentes cosas pueden ser entendidas como efectos útiles y consumos.

Ésta proporciona una medida del aprovechamiento de la *exergía* y de que tan bien efectúa el sistema su función. La efectividad mide el funcionamiento de un equipo o bloque, independientemente de si la ganancia de *exergía* se obtiene en una corriente de proceso o de servicio. En algunas ocasiones, hay equipos que no presentan ganancia de *exergía* ni siquiera para una corriente de servicio, en este caso la efectividad es nula.

Se calcula mediante la relación del incremento de EXERGÍA que se obtiene en una determinada corriente dentro de un bloque, entre la disminución en EXERGÍA que se encuentra en la corriente que suministra una corriente al equipo para que opere:

$$\varepsilon = \frac{\sum \Delta E_{salida}}{\sum \Delta E_{entrada}} = \frac{\text{Energía útil}}{\text{Energía consumida}}$$

La eficiencia exergética es siempre inferior a la unidad, excepto en el caso de un proceso reversible e ideal, en el que es igual a la unidad, por lo tanto, se busca que el proceso llegue a tan cerca cómo se pueda de la unidad. Esta eficiencia está restringida a procesos a régimen permanente, es incentiva para algunos de ellos y mide sólo el funcionamiento termodinámico del proceso, sin importar si cumple con su función.

Debe entenderse que tanto η como ε miden la efectividad con que las entradas se convierten en productos. El parámetro η lo hace en términos energéticos, mientras que el parámetro ε lo hace en términos exergéticos.

Por lo cual, la eficiencia exergética es el parámetro idóneo para poder comparar sistemas, ya que las exergías de gases calientes, vapor, etc., son equivalentes unas con otras como medidas del alejamiento del equilibrio y la capacidad para producir un cambio.

Esta eficiencia exergética se realizó en todos los bloques que se analizaron en el ducto de convección del proceso de reformación de la Planta Metanol II. Los resultados de este análisis se muestran a continuación:

TABLA EFECTIVIDAD EXERGÉTICA EN LOS BLOQUES DEL DUCTO DE CONVECCIÓN		
No. De Bloque	DESCRIPCIÓN	EFECTIVIDAD EXERGÉTICA [%]
1	Zona de Combustión del <i>BA-101</i>	89.62
2	Pre calentador de carga <i>E-101</i>	62.31
3	Sobrecalentador de vapor alta Presión <i>E-102-I</i>	53.37
4	Sobrecalentador de vapor alta Presión <i>E-102-II</i>	97.18
5	Pre calentador de aire a combustión <i>E-105-I</i>	71.66
6	Generador de Vapor <i>E-103</i>	83.56
7	Pre calentador de agua a calderas <i>E-104</i>	86.64
8	Pre calentador de aire a combustión <i>E-105-II/III</i>	89.04

De acuerdo a la tabla anterior se puede observar que quien presenta una mayor efectividad exergética es el sobrecalentador de vapor alta Presión *E-102-II* con 97.18%, en este se emplea vapor de agua que sale del tambor FB-101, así mismo, uno de los equipos que presenta una mayor efectividad exergética son los pre calentadores de aire *E-105-II/III* con el 89.04%.

En los sobrecalentadores de vapor alta Presión *E-102-I* y el pre calentador de agua a calderas *E-104* (que emplean vapor y agua respectivamente) presentan una menor eficiencia exergética con respecto a la zona de combustión que se tiene en el reformador BA-101 ya que este emplea gases de combustión para que se lleve a cabo la reacción, debido a la mayor cantidad de gases empleados para dar el servicio.

Debido a las irreversibilidades que se presentan en el proceso el Pre calentador de carga *E-101* tiene una efectividad exergética un poco baja, que corresponde al 62.31%.

- **POTENCIAL DE MEJORAMIENTO**

Al relacionar las pérdidas de exergía y la efectividad se predice el funcionamiento de un sistema, por lo tanto esta relación es el *Potencial de Mejoramiento*. Es decir, es un parámetro que determina que tanto y que tan fácilmente puede ser mejorado un sistema.

Este parámetro sirve para identificar a los bloques de un sistema que necesitan un determinado grado de optimización. Este parámetro está determinado por:

$$Pot = Pérdidas Irreversibles * (1 - \varepsilon)$$

El Potencial de Mejoramiento de un sistema es la medida de cuánto y cómo fácilmente el sistema podría mejorarse para propósitos de optimización. Este potencial de mejoramiento consta de tres contribuciones:

- **Potencial relativo:** si la efectividad es muy baja, entonces el potencial relativo $(1 - \varepsilon)$ aprovecha su valor máximo, de tal manera que el sistema debería en principio poder ser mejorado con facilidad.
- **Potencial absoluto:** Son las pérdidas irreversibles y representan que tanto se puede mejorar un sistema.
- **Potencial ambiental:** todas las corrientes que son desalojadas al medio ambiente son identificadas como los efluentes de exergía, y se consideran así mismo como pérdidas de exergía.

Este concepto nos ayuda a conocer en qué puntos del proceso se requiere un mejoramiento, así como, en los equipos o áreas de proceso que tienen la capacidad de recuperar exergía.

En la tabla siguiente se muestran los potenciales de mejoramiento que presenta cada bloque analizado en el ducto de convección:

TABLA POTENCIAL DE MEJORAMIENTO EN LOS BLOQUES DEL DUCTO DE CONVECCIÓN		
No. De Bloque	DESCRIPCIÓN	POTENCIAL DE MEJORAMIENTO [MMBTU/h]
1	Zona de Combustión del <i>BA-101</i>	15.45634998
2	Precalentador de carga <i>E-101</i>	0.029721939
3	Sobrecalentador de vapor alta Presión <i>E-102-I</i>	1.996144475
4	Sobrecalentador de vapor alta Presión <i>E-102-II</i>	0.595879963
5	Precalentador de aire a combustión <i>E-105-I</i>	1.150122615
6	Generador de Vapor <i>E-103</i>	2.100387928
7	Precalentador de agua a calderas <i>E-104</i>	1.940250515
8	Precalentador de aire a combustión <i>E-105-II/III</i>	1.655619063

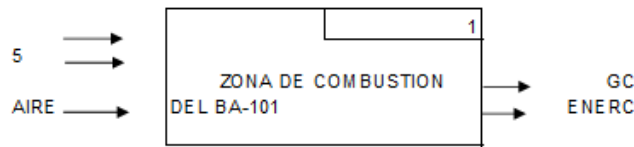
De acuerdo a la tabla que se presentó, se puede observar que el bloque 1 (Zona de Combustión del *BA-101*) es quien presenta un mayor potencial de mejoramiento con 15.4563 MMBTU que equivale al 62.01% del total de potencial de mejoramiento de la zona de convección, por lo cual, significa que en esta parte del proceso es donde se debería de poner énfasis para poder optimizarla. El hecho de que se tenga un alto potencial de mejoramiento es debido a las altas pérdidas irreversibles que se presentan en la zona de combustión.

Por consiguiente, otros equipos que tienen un potencial de mejoramiento son el Generador de Vapor *E-103*, Sobrecalentador de vapor alta Presión *E-102-I*, que ambos representan el 16.44% del total del potencial de mejoramiento, así como, el Precalentador de agua a calderas *E-104* que ocupa el 7.78% del total. Si se atienden estos equipos, la eficiencia de este proceso incrementaría y se tendría un mejor rendimiento energético.

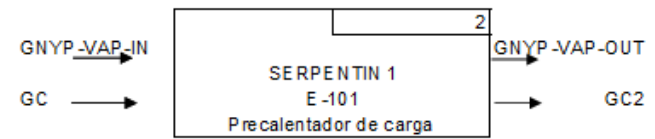
Los que tienen un potencial de mejoramiento menor son Sobrecalentador de vapor alta Presión *E-102-II* que es el 2.4% del total del potencial, así como, en menor cantidad el Precalentador de carga *E-101* con el 0.12% del total del potencial de mejoramiento.

- **ANEXOS DEL ANÁLISIS EXERGÉTICO: PÉRDIDAS IRREVERSIBLES, EFECTIVIDAD EXERGÉTICA Y POTENCIAL DE MEJORAMIENTO.**

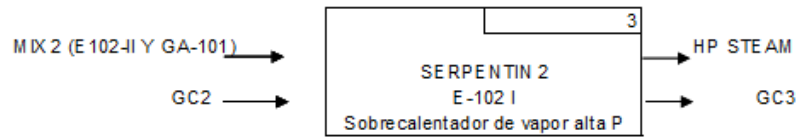
A continuación se presenta de manera resumida los valores de los bloques analizados en el proceso de reformación, especialmente en el ducto de convección, se mostrarán sus pérdidas irreversibles, la efectividad exergética, así como la energía suministrada y el potencial de mejoramiento que se tiene en cada uno de ellos.



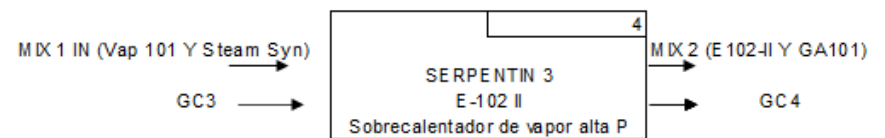
PERDIDAS IRREVERSIBLES = $E_5 + E_{aire} - (E_{gc} + E_{enerc}) = 148.85$ MMBTU/hr
 EXERGIA SUMINISTRADA = $E_5 + E_{aire} = 46.40332742$ MMBTU/hr
 EFECTIVIDAD EXERGETICA = $[E_{gc} / (E_5 + E_{aire})]100 = 89.61625639$ %
 POTENCIAL DE MEJORAMIENTO = P.I. (1-EF. EX.) = 15.45634998 MMBTU/hr



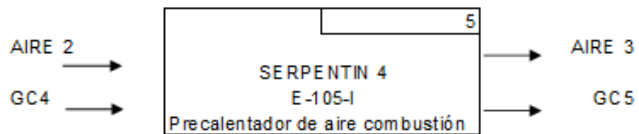
PERDIDAS IRREVERSIBLES = $(e_{GNIN} - e_{GNOUT}) + (e_{GC} - e_{GC2}) = 0.078857613$ MMBTU/hr
 EXERGIA SUMINISTRADA = $E_{GNYP} + E_{GC} = 2556.737685$ MMBTU/hr
 EFECTIVIDAD EXERGETICA = $[(e_{GNIN} - e_{GNOUT}) / (e_{GC2} - e_{GC})]100 = 62.30935975$ %
 POTENCIAL DE MEJORAMIENTO = P.I. (1-EF. EX.) = 0.029721939 MMBTU/hr



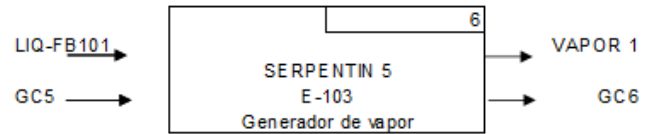
PERDIDAS IRREVERSIBLES = $(e_{MIX2} - e_{HP}) + (e_{GC2} - e_{GC3}) = 4.281265999$ MMBTU/hr
 EXERGIA SUMINISTRADA = $E_{MIX2} + E_{GC2} = 299.4318588$ MMBTU/hr
 EFECTIVIDAD EXERGETICA = $[(e_{MIX2} - e_{HP}) / (e_{GC3} - e_{GC2})]100 = 53.37490182$ %
 POTENCIAL DE MEJORAMIENTO = P.I. (1-EF. EX.) = 1.996144475 MMBTU/hr



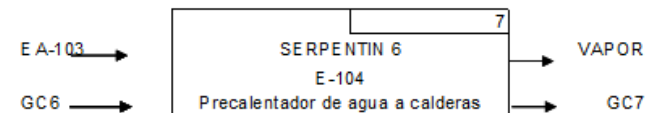
PERDIDAS IRREVERSIBLES = $(E_{mix1} - e_{MIX2}) + (e_{GC4} - e_{GC3}) = 21.11967339$ MMBTU/hr
 EXERGIA SUMINISTRADA = $E_{MIX1} + E_{GC3} = 257.0187934$ MMBTU/hr
 EFECTIVIDAD EXERGETICA = $[(e_{MIX2} - e_{MIX1}) / (e_{GC3} - e_{GC4})]100 = 97.17855503$ %
 POTENCIAL DE MEJORAMIENTO = P.I. (1-EF. EX.) = 0.595879963 MMBTU/hr



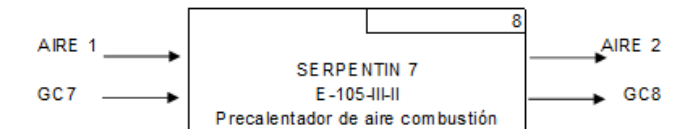
PERDIDAS IRREVERSIBLES = $(e_{AIRE3} - e_{AIRE2}) + (e_{GC5} - e_{GC4}) = 4.057655517$ MMBTU/hr
 EXERGIA SUMINISTRADA = $e_{AIRE2} + e_{GC4} = 47.34218458$ MMBTU/hr
 EFECTIVIDAD EXERGETICA = $[(e_{AIRE3} - e_{AIRE2}) / (e_{GC5} - e_{GC4})]100 = 71.65548899$ %
 POTENCIAL DE MEJORAMIENTO = P.I. (1-EF. EX.) = 1.150122615 MMBTU/hr



PERDIDAS IRREVERSIBLES = $(e_{LIQFB101} - e_{Vapor1}) + (e_{GC5} - e_{GC6}) = 12.77840882$ MMBTU/hr
 EXERGIA SUMINISTRADA = $E_{GC5} + E_{liqfb101} = 37.92567499$ MMBTU/hr
 EFECTIVIDAD EXERGETICA = $[(e_{LIQFB101} - e_{VAPOR1}) / (e_{GC5} - e_{GC6})]100 = 83.56299318$ %
 POTENCIAL DE MEJORAMIENTO = P.I. (1-EF. EX.) = 2.100387928 MMBTU/hr



PERDIDAS IRREVERSIBLES = $(e_{VAPOR} - e_{EA103}) + (e_{GC6} - e_{GC7}) = 14.52566804$ MMBTU/hr
 EXERGIA SUMINISTRADA = $e_{EA103} + e_{GC6} = 44.10098152$ MMBTU/hr
 EFECTIVIDAD EXERGETICA = $[(e_{EA103} - e_{VAPOR}) / (e_{GC6} - e_{GC7})]100 = 86.64260735$ %
 POTENCIAL DE MEJORAMIENTO = P.I. (1-EF. EX.) = 1.940250515 MMBTU/hr



PERDIDAS IRREVERSIBLES = $(e_{AIRE2} - e_{AIRE1}) + (e_{GC7} - e_{GC8}) = 15.11170511$ MMBTU/hr
 EXERGIA SUMINISTRADA = $E_{GC7} + E_{aire1} = 23.56171551$ MMBTU/hr
 EFECTIVIDAD EXERGETICA = $[(e_{AIRE2} - e_{AIRE1}) / (e_{GC7} - e_{GC8})]100 = 89.04412804$ %
 POTENCIAL DE MEJORAMIENTO = P.I. (1-EF. EX.) = 1.655619063 MMBTU/hr

PROPUESTAS

De acuerdo con los resultados obtenidos del análisis de exergía nos pudimos dar cuenta que la zona que presenta un mayor potencial de mejoramiento es la zona de convección del reactor BA-101.

La infraestructura y la tecnología que presenta la Planta de Metanol II ya es muy obsoleta, por lo cual, hace que el proceso presente diferentes ineficiencias. En este caso los quemadores (quienes son una parte importante para la combustión, que se encuentra en la parte superior del reformador), son los que pueden estar presentando dichas ineficiencias, ya que el modelo de estos son de los años 70's. Lo que se propone es mejorar la tecnología de estos quemadores para que el proceso pueda tener una eficiencia mucho mayor, y mejorar el rendimiento energético para el proceso.

CONCLUSIONES

La Exergía es una propiedad que permite determinar el potencial de trabajo útil de una determinada cantidad de energía que se puede alcanzar por la interacción entre el sistema y su entorno.

El objetivo principal del análisis exergético es poder descubrir las causas que propician a que un proceso tenga un bajo rendimiento y poder cuantificar estas causas, así mismo, este análisis ha sido una herramienta muy útil, rentable y que ha traído consigo beneficios que ayudan a optimizar los procesos industriales, y a tomar decisiones con respecto a su diseño o para realizar alguna modificación, ya que orienta a reducir las ineficiencias que se presentan. Este análisis permite establecer parámetros para cuantificar la calidad de la energía en cada bloque de un sistema, sea este de aspecto energético, económico, ecológico y social.

Además, el análisis exergético ayuda a aprovechar la energía para realizar un trabajo ya sea mecánico, eléctrico o de otro tipo. Así mismo, el análisis determina de manera cuantitativa el valor termodinámico de cualquier recurso, y permite analizar estrictamente las pérdidas de los recursos en las actividades que se desarrollan, con el propósito de mejorarlas y darles un uso eficiente.

La industria petroquímica es una parte importante en el aspecto económico en el país, puesto que gracias a estas industrias se producen diferentes productos que empleamos comúnmente, por lo cual es importante tener alternativas para mejorar los procesos con el propósito de obtener una mayor producción reduciendo los costos. Y un aspecto principal es el ahorro energético, por lo cual en este proyecto se decidió realizar el análisis exergético en el ducto de convección en el área de Reformación de la Planta de Metanol II que se encuentra en el Centro Petroquímico Independencia.

Gracias a este análisis nos pudimos dar cuenta en qué equipos se requiere de mayor atención en el ducto de convección, en el cual es en la zona de combustión del reactor BA-101 y en el generador de vapor E-103. Todos estos datos se guiaron a partir de los datos reales de operación de la planta de Metanol II. Se requieren analizar las alternativas para poder lograr aumentar su eficiencia y aprovechar su energía.

ANEXOS:

❖ AIRE PARA LA COMBUSTIÓN

La reacción principal que se lleva en el reactor BA-101 es una reacción endotérmica, es decir, requiere de calor para que se lleve a cabo, por lo cual, este calor se proporciona a partir de una combustión, que se hace en el lado externo de los tubos del reactor, como combustible se emplea gas natural, y como se sabe requiere de aire para que se pueda dar completa la reacción de combustión, por lo tanto, fue necesario calcular el aire requerido para que se lleve a cabo. Estos fueron los datos y cálculos necesarios para obtener la cantidad de aire:

Se requiere las propiedades de los compuestos puros que participan en la composición del gas natural:

PROPIEDADES TERMODINÁMICAS DE COMPUESTOS PUROS				
COMPUESTO	ESTADO	Δh°_f [cal/mol]	S [cal/mol ^o K]	ΔG°_f [cal mol ^o k]
N ₂	Gas	0	45770	0
O ₂	Gas	0	49000	0
CO ₂	Gas	-94052	51060	-94260
H ₂ O	Líquido	-68317	16720	-56690
CO	Gas	-26416	47300	-32808
CH ₄	Gas	-17889	44500	-12140
C ₂ H ₆	gas	-20236	54850	-7860
C ₃ H ₈	Gas	-24820	64510	-5614
C ₄ H ₁₀	Gas	-29812	-74100	-3754
C ₅ H ₁₂	Gas	-35000	83270	-1.960
H ₂	Gas	0	31210	0
H ₂ O	Gas	-57798		-54635

De cada uno de estos compuestos tienen una participación en las reacciones de combustión, así que, se analizará cada una de estos compuestos para poder obtener de una manera más precisa el calor del aire requerido, por lo cual se necesitan saber los coeficientes estequiométricos de cada uno de los compuestos que reaccionan con el aire, para poder obtener los calores de entalpía de formación y la energía libre de Gibbs de formación:

Entalpía de reacción:

$$\Delta H_{rxn} = v \cdot \Delta H_f^{\circ}$$

Energía libre de Gibbs de formación:

$$\Delta G_{rxn} = v \cdot \Delta G_f^\circ$$

Obteniendo los siguientes resultados:

Datos de las Reacciones de Equilibrio Químico con el ambiente estable de referencia 293.15											
COMPUESTO	Δh_{rxn} [cal/gmol]	ΔG_r [cal/gmol]	Δs_r [cal/mol°K]	Δh_r [BTU/lbmol]	ΔG_r [BTU/lbmol]	Δs_r [BTU/lbmol°R]	Δc_{pr} [cal mol °k]	ν_{O_2}	ν_{CO_2}	ν_{N_2}	P.M.
N2	□	□	□	□	□	□	□				28.0134
O2	□	□	□	□	□	□	□				31.9988
H2O (g)	-57798	-54635	10.78969811	-104036.4	-98343	-5.8901303		0.5	0	0	18
CO	-67636	-61452	21.09500256	-121744.8	-110613.6	-11.515828	-1.6	0.5	1	0	44
CH ₄	-212797	-195500	59.00392291	-383034.6	-351900	-32.210428	22.32	2	1	0	16.04
C ₂ H ₆	-372819	-350730	75.35050316	-671074.2	-631314	-41.134078	34.58	3.5	2	0	30.07
C ₃ H ₈	-530604	-503926	91.00460515	-955087.2	-907066.8	-49.679702	45.94	5	3	0	44.09
C ₄ H ₁₀	-687981	-656736	106.5836602	-1238365.8	-1182124.8	-58.184357	56.56	6.5	4	0	58.12
C ₅ H ₁₂	-845162	-811438.04	115.0399454	-1521291.6	1460588.472	-62.80067039	67.46	8	5	0	72.15
H2	-68317	-56690	39.66228893	-122970.6	-102042	-21.65176909	7.6	0.5	0	0	2

A partir de las reacciones de combustión y el balance de materia que se hizo anteriormente, podemos calcular el número de moles necesarios para que se lleven las reacciones, para que a partir de ahí se calcule el aire teórico, el de exceso y posteriormente el aire real que se emplea en el reformador de la Planta Metanol II.

- **AIRE TEÓRICO:** es la cantidad exacta de aire necesario para que haya el oxígeno preciso para la combustión completa.
- **AIRE EN EXCESO:** Es la reacción que se produce con una cantidad de aire superior al mínimo necesario. Cuando se utiliza un exceso de aire, la combustión tiende a no producir sustancias combustibles en los gases de reacción. En este tipo de combustión es típica la presencia de oxígeno en los gases de combustión. La razón por la cual se utiliza normalmente un exceso de aire es hacer reaccionar completamente el combustible disponible en el proceso.

CÁLCULO DEL AIRE NECESARIO PARA LA COMBUSTIÓN

CH ₄	1.924372331
C ₂ H ₆	0.073144321
C ₃ H ₈	0.016498719
C ₄ H ₁₀	0.009747225
C ₅ H ₁₂	0.003989752
	2.027752348 mol O ₂ /mol gas

9.655963564 mol aire/mol gas

AIRE TEORICO

565.3566667 Kg mol /h de aire

AIRE EN EXCESO

10%

AIRE REAL

621.8923333 Kg mol/h de aire

Para el caso de este proceso se empleó un 10% de aire en exceso, por lo cual, para el reactor BA-101 del proceso de reformación de la Planta Metanol II, requiere 621.8923 kmol/ h de aire.

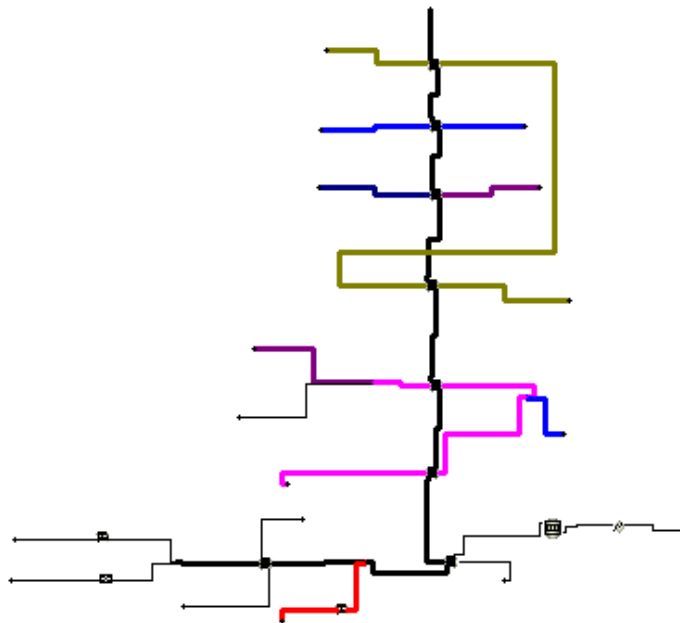
❖ SIMULACIÓN EN ASPEN

Los programas de Simulación de Proceso, son simuladores dedicados fundamentalmente a la industria con el objetivo de mejorar e incrementar la eficiencia de las mismas a permitir hacer simulaciones de diferentes procesos antes de que ocurran en realidad, las cuales producen resultados que pueden ser analizados para una futura realización de los mismos.

Para este proceso se empleó el simulador ASPEN (Advanced System for Process Engineering), este simulador es una herramienta muy importante en el modelado de proceso de diseño conceptual, optimización y monitoreo de desempeño para la industria química, polímeros, especialidades químicas, metales y minerales. Este simulador tiene muchas ventajas ya que tiene una base de datos más amplia entre los simuladores de procesos comerciales, e incluye comportamiento de iones y de electrolitos. Además, modela y simula cualquier tipo de proceso para el cual hay un flujo continuo de materiales y energía de una unidad de proceso a otra.

Se ha utilizado para modelar procesos en industrias: química y petroquímica, refinado de petróleo, procesamientos de gas y aceites, generación de energía, metales y minerales, industrias del papel y la pulpa y otros.

Para el proceso de Reformación fue de gran ayuda este simulador, ya que nos ayudó para la obtención de entropías, entalpías y otros datos que fueron necesarios para poder desarrollar el método de exergía, así mismo, se simuló todo el ducto de convección y el reactor BA-101.

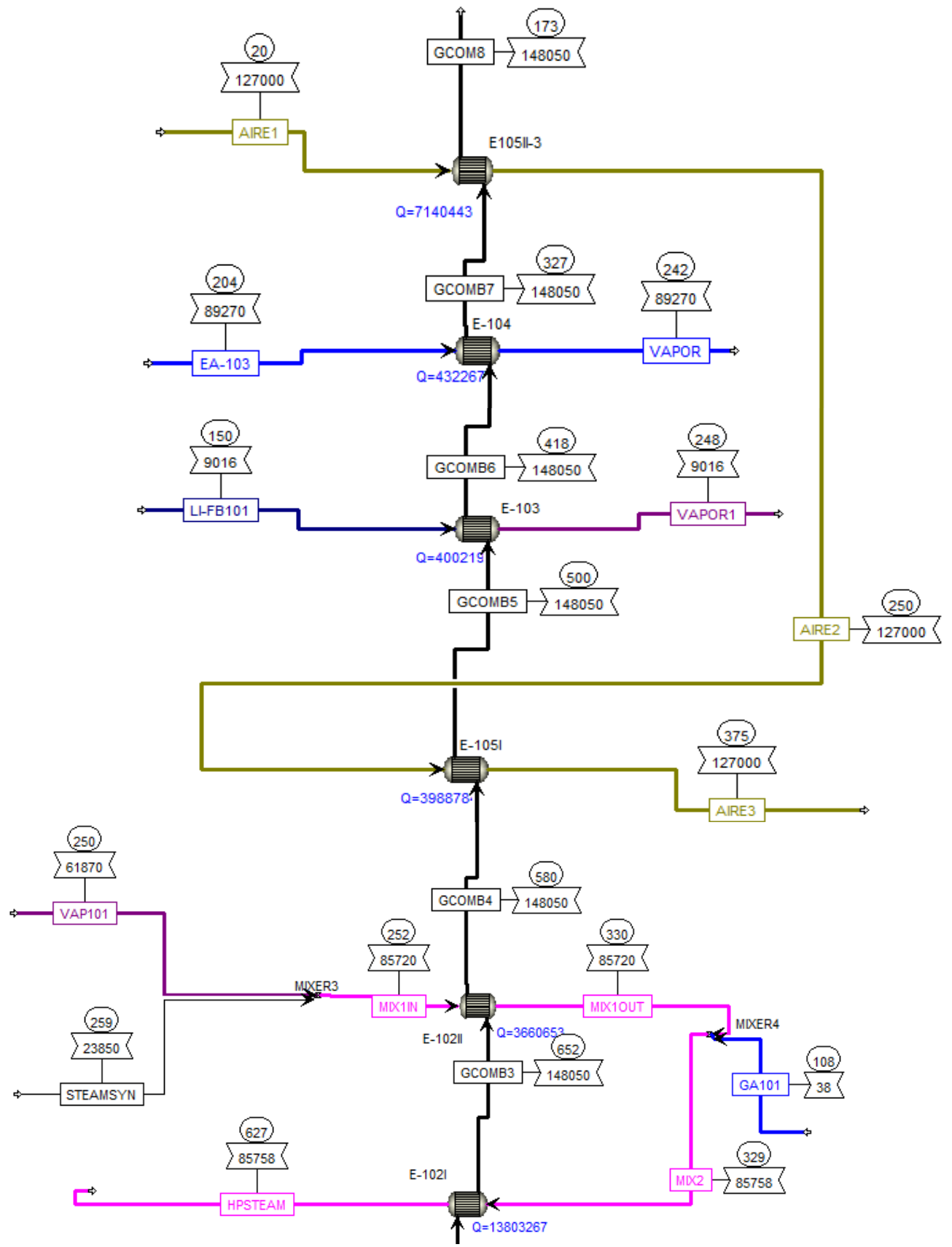


Simulación de Proceso de reformación de la Planta Metanol II.

En este diagrama se puede observar todo el proceso de reformación teniendo en cuenta que, en la línea gruesa negra, es la línea de proceso principal en donde se desarrolla el análisis exergético.

La línea roja es la entrada del vapor agua al proceso por la válvula FIC-104, y esta se combina el gas dulce que está destinado a ir al reformador BA-101. Así mismo, las líneas de color rosa son el flujo de vapor que se calientan y que salen de los precalentadores E-102-I/II que se dirige hacia la unidad doscientos. La línea morada hace referencia al vapor que sale del tambor FB-101 y que entra al precalentador E-102-II. La línea azul que se encuentra en la entrada de vapor en el primer intercambiador E-102-I, es agua proveniente de una parte del proceso, que se combina con el vapor que sale del segundo intercambiador E-102-II. Las líneas de color marrón son las que llevan el aire a precalentarse para la combustión, el aire pasa por los intercambiadores E-105-I/II/III. La línea azul marino representa el líquido que sale del FB-101 que entra al generador de vapor E-103, y a la salida de este equipo se genera vapor que es representado por la línea morada. La línea azul que entran al E-104 es agua proveniente de la bomba GA-101, y a la salida se manda al tambor de vapor FB-101.

A continuación se presenta la simulación realizada en ASPEN PLUS, en donde se podrá observar las condiciones de entrada y salida de cada uno de los equipos empleados en el ducto de convección.



Bibliografía

- Álvarez, X. B., Fortes, M. C., & Aguilar, R. (7 de Julio-Diciembre de 2007). Redalyc. Recuperado el 01 de Octubre de 2018, de <http://www.redalyc.org/pdf/342/34202802.pdf>
- Ayotte-Sauvé, E., & Sorin, M. (09 de Abril de 2010). Industrial and Engineering Chemistry Research. Recuperado el 01 de Octubre de 2018, de <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/ie100369f>
- Lugo, R., Salazar, M., Zamora, J. M., Torres, A., & Toledo, M. (1 de enero-marzo de 2009). Análisis exergético de una central termoeléctrica. Recuperado el 02 de Octubre de 2018, de Redalyc: <http://www.redalyc.org/pdf/614/61412184004.pdf>
- Mendoza, D., & Riascos, C. A. (17 de Abril de 2015). Metodología para el diseño, análisis y optimización termodinámica de columnas de destilación con intercambiadores de calor. Barranquilla, Colombia .
- Petroleum, B. (13 de Junio de 2018). British Petroleum México. Recuperado el 23 de Septiembre de 2018, de https://www.bp.com/es_mx/mexico/InformeEstadisticoMundial-BP-2018.html
- Rodríguez, L. B., Alexandri Rionda, R., Cafaggi Félix, F., Barrera Ríos, S., Henández Miranda, B., Guerrero Hernández, M., y otros. (2017). Balance General de Energía. Recuperado el 13 de septiembre de 2018, de Secretaría de Energía: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/288692/Balance_Nacional_de_Energ_a_2016__2_.pdf
- Orellana, A. (2009). Análisis Exergético de bienes de equipo. 20 de octubre de 2018, de Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona Sitio web: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/8032/An%C3%A1lisis%20exerg%C3%A9tico%20de%20bienes%20de%20equipo.pdf>
- Ayotte-Sauve, E. y Sorin, M. (2010). Energy requirements of distillation: exergy, pinch points and the reversible column. industrial and Engineering Chemistry Research 49, 5439-5449.
- Scientific Journal from the Experimental Faculty of Sciences, at the Universidad del Zulia Volume 22 (Número Especial), 2014.
- Gracia, A. López, C. García, L. Goldwasser, M. Moya, A. Ojeda, I. (2014). Análisis del equilibrio termodinámico en procesos de reformado de metano con vapor, CO₂ y O₂. 08 de marzo de 2019, Sitio web: https://www.researchgate.net/publication/269762156_Analisis_del_equilibrio_termodinamico_en_procesos_de_reformado_de_metano_con_vapor_CO_2_y_O_2
- Villar, J. (2016). Oxidación parcial de metano sobre catalizadores NiAl₂O₄/CeO₂. 09 de abril de 2019, Sitio web:

https://addi.ehu.es/bitstream/handle/10810/20184/TFG_VillarGimenoJoane.pdf?sequence=3&isAllowed=y

Hernandez, J. (2006). SUSTENTABILIDAD DEL SECTOR PETROLERO EN MÉXICO APLICANDO EL MÉTODO DE ANÁLISIS DE EXERGIA. 09 de abril de 2019, de UNAM Sitio web:

<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/748/hernandezsantoyo.pdf?sequence=15>

Thermal Remote Sensing in Land Surface Processin. Quattrochi y Luvall 2004, 303

CABELLOS, M. ZAFRA, J.. (2016). Balance exergético en la turbina de vapor TGM de 21.7 MW para el incremento de su eficiencia-empresa agroindustrias San Jacinto S.A.A. 09 de abril de 2019, de UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA FACULTAD DE INGENIERÍA Sitio web:

<http://repositorio.uns.edu.pe/bitstream/handle/UNS/2640/42921.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Fundamentos de Termodinámica Técnica. 2ª ed. (4ª ed. original) M. J. Moran, H. N. Shapiro. Ed. Reverté. (Capítulo 7. Análisis exergético).