



**Facultad de Ciencias Técnicas**

**Departamento de Química e Ingeniería Química**

**“Integración energética en una batería de grupos  
electrógenos Diesel”**

**TRABAJO DE DIPLOMA PRESENTADO COMO REQUISITO  
PARCIAL PARA  
OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO QUÍMICO**

**Autora:** Elizabeth Lantigua Rodríguez.

**Tutores:** **Dr.C** Agustín Benítez Hernández.

Ing. Tayla Monzón Mena

**Matanzas**

**2021**

***“La conservación de la energía es la base de la independencia energética”***

***Tom Allen***

## Nota de aceptación

---

---

---

---

---

---

---

---

---

Presidente del Tribunal

---

Miembro del Tribunal

---

Miembro del Tribunal

---

Calificación

---

Ciudad, fecha

## **Declaración de autoridad**

Yo, Elizabeth Lantigua Rodríguez, declaro ser la única autora de esta investigación realizada en la Universidad de Matanzas, como requisito parcial para optar por el título de Ingeniero Químico y autorizo que la misma sea utilizada por la mencionada institución como material de consulta. Para que así conste:

---

Nombre y Apellidos

---

Firma

*...a mis padres y a todos los que ayudaron a que este sueño fuera posible...*

*Muchas Gracias*

## **Resumen**

El presente trabajo se realizó en una batería de grupos electrógenos Diesel con el objetivo de reducir el consumo de utilidades a través de una integración energética. Se desintegra energéticamente la red de intercambio de calor y se propone una nueva red de intercambio de calor para alcanzar una reducción de los recursos energéticos y a su vez una disminución de costos por concepto de ahorro de combustible.

## **Abstract**

The present work was carried out in a battery of Diesel generators with the objective of reducing the consumption of utilities through energy integration. The heat exchange network is energetically disintegrated and a new heat exchange network is proposed to achieve a reduction in energy resources and in turn a reduction in costs due to fuel savings.

## Tabla de Contenido

<b>Introducción</b> .....	<b>1</b>
<b>Capítulo I: Análisis bibliográfico.</b> .....	<b>5</b>
1.1 Generación térmica. ....	5
1.1.1 Generación por grupos electrógenos. ....	6
1.1.2 Motores de Combustión Interna Diesel. ....	9
1.2 Intercambiadores de calor. ....	12
1.2.1 Enfriamiento por aire. ....	14
1.2.2 Intercambiadores de tubo y coraza. ....	16
1.2.3 Intercambiadores de tubos con aletas. ....	18
1.3 Análisis energético. ....	19
1.3.1 Integración de procesos. ....	19
1.3.2 Métodos de integración energética. ....	20
1.3.3 <i>Pinch</i> energético. ....	24
1.4 Conclusiones Parciales. ....	26
<b>Capítulo II: Materiales y métodos.</b> .....	<b>27</b>
2.1 Descripción del proceso. ....	27
2.1.1 Sistema de enfriamiento del motor. ....	27
2.2 Metodología de integración energética. ....	29
2.2.1 Desintegrar energéticamente (etapa preliminar). ....	30
2.2.2 Identificación de las corrientes y extracción de sus datos (etapas uno y dos). ....	30
2.2.3 Selección del $\Delta T_{mín}$ inicial (etapa tres). ....	32
2.2.4 Construcción del diagrama de intervalos de temperaturas y del diagrama de cascada (etapas cuatro y cinco). ....	32
2.2.5 Construcción de las curvas compuestas (etapa seis). ....	34
2.2.6 Determinación del número óptimo de intercambiadores de calor y propuesta de intercambio encima y debajo del <i>pinch</i> (etapas siete y ocho). ....	35
2.2.7 Diseño preliminar de la red de intercambiadores y diseño final del diagrama de flujo integrado energéticamente (etapas nueve y diez). ....	36
2.3 Optimización económica de la red de intercambio. ....	38
2.3.1 Análisis económico (etapa once). ....	38
2.3.2 Optimización de temperatura de aproximación mínima (etapa doce). ....	39
<b>Conclusiones</b> .....	<b>40</b>

<b>Recomendaciones.....</b>	<b>41</b>
<b>Bibliografía.....</b>	<b>42</b>
<b>Anexos.....</b>	<b>47</b>

## **Introducción**

La energía es un elemento clave en la sociedad actual y uno de los principales motores de la economía: a mayor crecimiento económico, mayor consumo energético. Pero esta energía no suele utilizarse de la manera más eficiente, ya sea en sus fases de producción, distribución y, sobre todo, durante su uso. (Sardiñas, 2012)

En el mundo moderno, el desarrollo de un país se mide entre otros elementos por el nivel de electrificación que el mismo posee, debido a que la electricidad es la principal fuente de energía para la realización de la inmensa mayoría de las actividades productivas, económicas, administrativas y de servicios. Una interrupción por breve que sea, provoca considerables trastornos y pérdidas en la producción industrial, en el transporte, las comunicaciones, el sector financiero y en las tareas de la defensa del país. (Hourné, 2009)

Uno de los primeros métodos que se utilizaron para generar energía eléctrica, fue aprovechando la fuerza del agua en los ríos fundamentalmente, lo que hoy se conoce como hidroeléctricas, otra forma de crear energía es a través de la fuerza del viento, conocida como energía eólica; también el hombre ha ido desarrollando con los avances tecnológicos otras formas de crear electricidad como son: las plantas termoeléctricas y las termonucleares, que son grandes plantas con una gran capacidad de generación y complicado diseño de fabricación. Existen otros métodos de generación aprovechando la energía del sol mediante su luz, para este tipo se utilizan celdas fotovoltaicas o paneles solares y otro método también conocido es aprovechando la fuerza de los motores de combustión interna en los llamados grupos electrógenos (GE), que es el que se trata.

Según Brito (2009) nos referimos a grupo electrógeno cuando hablamos de un aparato cuya función es convertir la capacidad calorífica en energía mecánica y posteriormente en eléctrica. Brevemente podríamos calificarla como un aparato que consta de un motor y un alternador unidos e implementados en una base junto a varios elementos más. En general, los grupos electrógenos suelen utilizarse como fuente principal de energía o bien como apoyo de otra fuente para poder responder a las demandas energéticas de una forma real y eficiente sea cual sea su aplicación.

La política energética de Cuba en los últimos años ha estado encaminada a la introducción paulatina de grupos electrógenos en el Sistema de Generación Eléctrico Nacional (SEN), esto debido a que en el 2004, Cuba sufrió una severa crisis en este sistema, apoyado en aquel entonces en grandes plantas con elevados índices de consumo de combustibles y redes de transmisión y distribución en mal estado técnico, esta situación conllevó al surgimiento de la puesta en marcha de un nuevo programa, el cual consiste en un esquema de generación eléctrica distribuida que emplea la instalación de emplazamientos compuestos por baterías de grupos electrógenos, que operan con diesel o fuel-oil, constituyendo uno de los más profundos cambios conceptuales en esta esfera. De aquí la necesidad de hacer que tales equipos operen cada vez de manera más eficiente, siendo esto sin lugar a dudas una problemática planteada, lo cual justifica el desarrollo de trabajos de investigación cuyos objetivos estén orientados con este fin. (Villa, 2012)

Estos GE están distribuidos en dependencia de su potencia y utilidad, a todo lo largo y ancho del país y pueden ser pequeños, medianos o grandes. Los grandes, en su mayoría, están conectados a la red nacional (SEN) con el fin de apoyar a las centrales termoeléctricas en el proceso normal de generación.

Los primeros emplazamientos instalados en el país trabajaban con combustible diesel, a principio del año 2007 se anunció la conclusión oficial del programa de los grupos diesel, los cuales aportaban en conjunto más de mil 300 MW de potencia, actualmente el programa que se está llevando a cabo desde el 2007 es el de los grupos fuel-oil, con motores Hyundai de procedencia coreana y MAN de procedencia alemana. (Del Castillo, 2009)

La utilización de emplazamientos de generación distribuida con (GE) de fuel-oil lleva muy poco tiempo de explotación y por ser una tecnología de adopción reciente en el país, no se cuenta con la experiencia y conocimientos necesarios sobre el tema, lo que conlleva al surgimiento de problemas de funcionamiento y operación de la maquinaria. Según criterios de especialistas las causas fundamentales de las averías o fallas son producto de problemas de operación, de mantenimiento, de tecnología y cultura tecnológica que están afectando la disponibilidad y la confiabilidad de estas plantas de generación.

Hoy en día se presentan en la industria moderna con más fuerza que nunca dos principales problemas: el costo de los combustibles y el deterioro ambiental. El constante incremento

en los precios de los combustibles y la aparición de nuevas leyes ambientales convierte a algunos procesos industriales en ineficientes. En muchos casos la solución es eliminar estas tecnologías y diseñar nuevas plantas más eficientes. Sin embargo, es posible que aplicando alguna metodología se pueda mejorar la integración energética y hacer nuevamente eficiente el proceso. (Benítez, Martínez, Domínguez)

Según Covas (2012) la Integración de Procesos se ha convertido en una herramienta muy útil para disminuir los consumos de energía, los vertimientos de residuales contaminantes al medio ambiente en los procesos. Para ello se usan avanzadas herramientas analíticas para identificar las posibilidades de reducir el consumo energético y de residuales en facilidades industriales y alcanzar significativos ahorros en costos y utilidades.

Según Jurgen (2016) la minimización de todo el coste relacionado con el consumo energético de cualquier proceso químico es una problemática que incluye la integración energética para reducir el consumo de utilidades para calentamiento y enfriamiento aprovechando posibles intercambios de calor entre corrientes del mismo proceso y la generación de todas las utilidades que quedan por satisfacer.

El método *Pinch* para la integración de procesos, ha sido desarrollado en los últimos años con el propósito de reducir los costos operacionales y totales en los procesos de la industria química.

Castillo (2014) expone que, si en un proceso se logran reducir los consumos de utilidades y de energía eléctrica, entonces se obtiene una mayor eficiencia energética y económica por disminución de los costos de operación.

En la provincia de Matanzas las centrales eléctricas están formadas por 2 baterías de 8 grupos electrógenos cada una, modelos grandes de alto consumo energético, que, como motor de combustión interna necesitan un correcto sistema de enfriamiento para garantizar un buen funcionamiento.

Por lo que, se propone como **problema científico** de la investigación: ¿Cómo reducir el alto consumo de utilidades en una batería de grupos electrógenos Diesel?

Como posible solución al problema se plantea la siguiente **hipótesis** de trabajo: si se realiza la integración energética se podrá reducir el consumo de utilidades en una batería de grupos electrógenos Diesel.

Para dar cumplimiento a la hipótesis planteada, se propone el siguiente **objetivo general**: integrar energéticamente a una batería de grupos electrógenos Diesel para reducir el consumo de utilidades.

Para cumplir el objetivo propuesto anteriormente se plantean los siguientes **objetivos específicos**:

- Determinar, mediante el análisis bibliográfico, las herramientas más adecuadas para la integración energética en grupos electrógenos.
- Desintegrar energéticamente la red de intercambio de calor.
- Proponer una nueva red de intercambio de calor.

## **Capítulo I: Análisis bibliográfico.**

En el presente capítulo se efectúa una búsqueda bibliográfica acerca de los principales aspectos relacionados con la temática a tratar, con el objetivo de desarrollar la fundamentación teórica de la investigación. Para su realización se emplean buscadores como el Scholar Google, se accede a bases de datos remotas disponibles en Internet como SciELO y Elsevier, y se emplean otros medios de información tales como revistas, tesis de grado, de maestría y doctorales.

### **1.1 Generación térmica.**

La energía térmica es la energía contenida dentro de un sistema y que es responsable de su temperatura. La energía térmica siempre se ha relacionado con el calor y, de hecho, el calor es el flujo de esa energía térmica.

Este tipo de energía es la más antigua que usamos y una de las más importantes, no solo para la producción de electricidad, sino en general. De hecho, hay toda una rama de la física, la termodinámica, que estudia cómo se transfiere el calor entre sistemas y el trabajo que se realiza en el proceso. (Enérgya, 2019)

Para lograr la eficiencia energética de forma sistemática es necesario la aplicación apropiada de un conjunto de conocimientos y métodos que garanticen esta práctica. Ellos deben ser aplicados a los medios de trabajo, los recursos humanos, los procesos, la organización del trabajo, así como los métodos de dirección, control y planificación. A tal efecto se ha desarrollado la tecnología de gestión total eficiente de la energía que sintetiza la experiencia, procedimientos y herramientas obtenidas en la labor por elevar la eficiencia y reducir los costos energéticos en la industria y los servicios. (Borroto, 2001)

El problema de la eficiencia en el uso y las transformaciones de la energía es, actualmente uno de los más importantes para la independencia energética de cada país y para lograr un desarrollo sostenible. En la práctica se tiene que especificar cómo tratar las energías no térmicas; entre otras, la mecánica y la eléctrica. Estas últimas son las de calidad más alta, y es importante subrayar que sobre la base de la tendencia del calor de pasar espontáneamente de temperaturas más altas a temperaturas más bajas (que es el fundamento

del segundo principio de la termodinámica), el derroche de energía es inevitable cada vez que se usa la energía térmica. (Altshuler, 2004.)

La energía térmica nos acompaña desde que dominamos el fuego o usamos el sol para secar alimentos y calentar cosas, y lo seguirá haciendo en nuestro camino hacia un futuro, de aquí que una de las principales aplicaciones de la energía térmica en el día a día es la generación de electricidad a partir del calor. De hecho, ha sido y es una de las principales maneras de hacerlo. El calor es una forma de energía que puede ser convertida en electricidad de múltiples formas. Las principales son:

- A partir del calor de la tierra, como en el caso de la energía geotérmica.
- A partir del calor del sol, que se concentra en colectores, como en el caso de la energía termosolar.
- A partir de reacciones nucleares. Estrictamente hablando, la energía nuclear es también energía termal a partir de un combustible. En este caso, el uranio, que al romper sus átomos (fisión) desprende una enorme cantidad de energía.
- Quemando combustibles fósiles, como carbón o petróleo. Esta ha sido nuestra forma habitual de uso, pero todos sabemos los grandes inconvenientes que tiene este procedimiento. No solo podemos quemar combustibles fósiles, también restos orgánicos, lo que conocemos como biomasa.

Según Coluccio (2021), La energía térmica o energía calórica es el grado de energía interna contenida en un sistema termodinámico en equilibrio (un cuerpo, un conjunto de partículas, una molécula, etc.) y que es proporcional a su temperatura absoluta. Dicho en otras palabras, la energía térmica es la que genera el movimiento interno y aleatorio de las partículas de un cuerpo (es decir, es equivalente a la energía cinética), que aumenta o disminuye por transferencia de energía, usualmente bajo la forma de calor o de trabajo.

### **1.1.1 Generación por grupos electrógenos.**

Según Castro (2007) un grupo electrógeno es una máquina rotativa que acciona un generador eléctrico usando un motor de combustión interna. Se suelen utilizar para trabajos en zonas donde no se dispone de una fuente permanente de energía eléctrica, o como equipos de emergencia por cortes de fluido eléctrico.

Según Autosolar Energy Solutions (2021), nos referimos a grupo electrógeno cuando hablamos de un aparato cuya función es convertir la capacidad calorífica en energía mecánica y posteriormente en eléctrica. Brevemente podríamos calificarla como un aparato que consta de un motor y un alternador unidos e implementados en una base junto a varios elementos más. Estos elementos complementarios podrían ser:

- Alternador: a la hora de seleccionar un alternador debemos primero establecer qué tipo de uso tendrá y las condiciones de trabajo a las que se le someterá.
- Motor: componente fundamental de los grupos electrógenos. Se utiliza para aumentar la productividad y el rendimiento.
- Carrocería: es una chapa con tratamiento anticorrosivo que recubre el equipo electrógeno y se asegura de que el flujo de aire sea óptimo en el interior para la buena refrigeración del motor. Puede ser de varios materiales como aluminio, acero o acero inoxidable.
- Marco de transferencia de carga: se encarga de alternar entre la fuente de energía principal y la auxiliar si la primera fallara asegurando el suministro constante de energía.
- Panel de control: es el “cerebro” del generador. Su función es monitorear y proteger los grupos electrógenos.
- Bancada: cuadro de acero con un sistema antivibración con un depósito para almacenar combustible. También puede utilizarse o no para elevar el generador a cierta altura.

En general, los grupos electrógenos suelen utilizarse como fuente principal de energía o bien como apoyo de otra fuente para poder responder a las demandas energéticas de una forma real y eficiente sea cual sea su aplicación.

Los GE presentan características muy específicas como:

- pueden funcionar en modo de espera o en funcionamiento continuo.
- pueden estar compuestos por más de un grupo electrógeno.
- están equipados con tanques u otros sistemas de suministro de combustible de gran autonomía.
- están equipados con sistemas black-start para garantizar la puesta en marcha de la instalación en caso de fallo de la red.

- son robustos, resistentes y fiables.
- son insonorizados, dado el alto nivel de ruido producido. (Grupel Energy, 2021)

Según Fransisco y Costa (2007) en régimen de emergencia los GE, con capacidades que van desde 7 kVA hasta de 500 kVA en su mayoría, alimentan pequeñas cargas de importancia social o económica como panaderías, policlínicos y empresas, y la idea es que sean utilizados para aliviar al sistema en horarios picos al asumir su carga cuando esta se desconecte de la red. Cuando funcionan en régimen de producción conformando baterías, las mismas pueden trabajar en régimen normal o en emergencia; en ambas condiciones se encuentran sincronizadas en paralelo con la red de distribución. Las baterías están constituidas por grupos de motores múltiples de cinco u ocho, en dependencia del GE (por ejemplo, una batería son cinco u ocho motores, dos baterías son 10 o 16 motores y así sucesivamente). Cuando están en funcionamiento normal, disponiendo de tensión en el lado de baja del transformador, el motogenerador arranca por programación horaria o manualmente por una orden del operador. El sistema de sincronización verifica el sincronismo a ambos lados del interruptor de conexión y automáticamente cierra cuando se verifique la condición de sincronismo entre ambos lados. Las mismas baterías se dice que están en funcionamiento de emergencia cuando los grupos motogeneradores arrancan solo a falta de la red y sin tensión en la barra de baja tensión de los transformadores elevadores, siendo esta operación manual. Debido a una caída del Sistema Electroenergético Nacional (SEN), las baterías de GE pueden trabajar como islas, pero debe tenerse en cuenta que quedarán aislados de cualquier otra generación, encargándose de la vigilancia de tensión y frecuencia. En situación de isla las cargas se introducirán de forma progresiva para que estos grupos tengan tiempo de poder absorberlas y repartírselas. Cuando los GE son de mayor potencia que los de emergencia y en conformación solitaria o de grupos de dos o tres GE, trabajan sincronizados a la red y pueden, en caso de que la red quede sin energía alimentar una parte del sistema eléctrico, estando desconectado eléctricamente del resto del sistema, se dice que están trabajando en régimen de producción aislado. En esta situación los GE pueden trabajar en horarios picos para aliviar la demanda y así ayudar al SEN.

La máxima dirección del Gobierno cubano ha decidido para los próximos años utilizar de forma intensiva los GE considerando las ventajas que hoy plantea este tipo de generación

distribuida. Los GE diesel que se han instalado en el país trabajan en régimen de emergencia, sin sincronización a la red, y en régimen de producción, aislado o en baterías. (Díaz, 2007)

En cuanto al funcionamiento de estos aparatos, los grupos electrógenos están compuestos por un generador que funciona mediante combustión producida en el motor con ayuda del alternador. En cuanto al combustible en estos equipos se puede elegir entre gasóleo o diésel, gas natural, biogás, entre otros.

Según Autosolar Energy Solutions (2021), los grupos electrógenos pueden constituirse como elementos de gran relevancia para cualquier tipo de aplicación o proyecto. Por ejemplo, en el diseño de un proyecto industrial o en el área de la construcción donde una de las dificultades propias es asegurar el suministro continuo y fiable de energía.

En estos casos un deficiente suministro eléctrico puede suponer muchos daños y es en este aspecto donde el grupo electrógeno juega un papel fundamental para hacer frente a esa dificultad ya que son una opción muy confiable y son muy duraderos a la hora de cumplir esta función.

### **1.1.2 Motores de Combustión Interna Diesel.**

Convertir un líquido inflamable en energía, y dicha energía transformarla en calor y movimiento. Esa es la magia que consiguen los motores de combustión interna, piezas de ingeniería milimétrica que forman parte de nuestro día a día. (Martín, 2019)

El motor de combustión interna es un motor térmico en el que una parte de la energía liberada en quemar el combustible se transforma en trabajo, es decir, en movimiento. El motor diesel y el motor de explosión son dos ejemplos. Los gases producidos por el motor se expulsan fuera del vehículo a través del tubo de escape.

Uno de los inconvenientes de este tipo de vehículos es el bajo aprovechamiento que hacen del contenido energético de los hidrocarburos ya que no aprovechan más que el 30% de la energía producida.

No obstante, la eficiencia de los motores ha aumentado de una manera muy importante en las últimas décadas: los vehículos que se fabrican hoy en día consumen unos 4-5 litros de

gasolina cada 100 Km –a más velocidad, más consumo–, a diferencia de los vehículos de hace unos años que tenían un consumo de hasta 15 litros. (Energía y Minería, 2020)

### **Principio de funcionamiento de los motores de combustión interna.**

Según Zarate (2021), una máquina de combustión interna es aquella que quema el combustible dentro de ella misma. La energía del calor del combustible que se quema se convierte en energía mecánica útil.

El motor Diésel es un motor térmico de combustión interna alternativo en el cual el encendido del combustible se logra por la temperatura elevada que produce la compresión del aire en el interior del cilindro, según el principio del ciclo del diésel.

Fue inventado y patentado por Rudolf Diesel en 1892, del cual deriva su nombre. Fue diseñado inicialmente y presentado en la feria internacional de 1900 en París como el primer motor para "biocombustible", como aceite puro de palma o de coco. Diesel también reivindicó en su patente el uso de polvo de carbón como combustible, aunque no se utiliza por lo abrasivo que es. El motor diésel existe tanto en el ciclo de 4 tiempos (4T - aplicaciones de vehículos terrestres por carretera como automóviles, camiones y autobuses) como de 2 tiempos (2T - grandes motores de tracción ferroviaria, de propulsión naval, y algunos camiones y autobuses). (Ecured, sin fecha)

Todos los procesos que se producen en el motor se repiten. A la combinación de los procesos que se repiten sucesivamente en el cilindro del motor, se le llama ciclo de trabajo, y a cada uno de los procesos, tiempos.

El ciclo de trabajo está constituido por cuatro tiempos los cuales son:

**Admisión:** Se conoce como admisión al primer tiempo del motor, aquí ocurre que mientras el pistón baja del punto muerto superior (PMS) al punto muerto inferior (PMI), el volumen de la cámara de combustión aumenta, provocando un estremovimiento dentro del cilindro. En este momento se llena el cilindro de la mezcla combustible a través de la válvula de admisión que se abre en ese tiempo. Al llegar el pistón al PMI, termina el primer tiempo.

**Compresión:** Después que el pistón alcanza el PMI, comienza a moverse hacia arriba. Al tiempo que esto sucede, la válvula de admisión se cierra. La válvula de escape queda

cerrada también y, de esta manera, el cilindro se encuentra sellado. Al moverse el pistón hacia arriba se comprime la mezcla aire-combustible con una relación de compresión de 1s: 1 y este alcanza una temperatura de 440°C.

Explosión o fuerza: Al alcanzar el pistón el PMS, en la carrera de compresión se atomiza el combustible y este se inflama debido a la alta temperatura del aire (440°C). La chispa inflama o enciende la mezcla aire-combustible. Esta comienza a quemarse muy rápidamente, y provoca una explosión debida a la expansión de los gases por el calor. Como las válvulas se encuentran cerradas, el pistón recibe un fuerte impulso que lo empuja o dirige hacia la parte inferior del cilindro, este impulso es transmitido por la biela al cigüeñal que lo transforma en movimiento circular. Al llegar el pistón al PMI, termina el tiempo de explosión o fuerza.

Escape: Cuando llega el pistón, nuevamente al PMI, la válvula de escape se abre. Ahora, a medida que el pistón en la carrera o tiempo de escape, forzando los gases quemados hacia el exterior del cilindro a través de la abertura de la válvula de escape. Cuando el pistón alcanza el PMS, la válvula de escape se cierra y la de admisión se abre. En este momento una mezcla de aire-combustible, será aspirada a medida que el pistón desciende otra vez al PMI. Las cuatro carreras anteriores se repiten continuamente durante el funcionamiento del motor. (Martín, 2019)

Los motores de combustión interna poseen seis sistemas principales cada uno con sus funciones y objetivos los cuales son:

- Sistema de gestión y regulación.
- Sistema de combustible.
- Sistema de lubricante.
- Sistema de enfriamiento.
- Sistema de escape.
- Sistema aire de admisión.

## **Funcionamiento del motor Diesel.**

Los procesos del ciclo de trabajo de motor Diesel de cuatro tiempos, se llama igual que los del motor de gasolina, es decir, admisión, compresión, explosión o fuerza y escape, pero sin embargo el contenido de los procesos no es igual.

El tiempo de admisión de los motores Diesel, el cilindro se llena de aire. El tiempo de compresión se produce a temperaturas y presiones altas. La mezcla se forma dentro del cilindro, producto de la inyección del combustible.

La mezcla se auto inflama por efecto de la alta temperatura del aire comprimido, se combustiona, y libera gran cantidad de calor, con lo cual aumenta la presión de los gases, los cuales empujan el pistón hacia abajo y escapan. (Mhadi, 2021).

## **1.2 Intercambiadores de calor.**

Según Kabir (2021) un intercambiador de calor es un equipo que transfiere continuamente calor de un medio a otro. Hay dos tipos principales de intercambiadores de calor: directos e indirectos.

- **Intercambiador de calor directo**, donde ambos medios están en contacto directo entre sí. Se da por sentado que los medios no se mezclan. Un ejemplo de este tipo de intercambiador de calor es una torre de enfriamiento, donde el agua se enfría a través del contacto directo con el aire.
- **Intercambiador de calor indirecto**, donde ambos medios están separados por una pared a través de la cual se transfiere el calor.

El intercambiador de calor es un dispositivo diseñado para transferir calor entre dos fluidos, encontrándose éstos en contacto o separados por una barrera sólida. Los intercambiadores de calor son componentes esenciales en los sistemas de climatización o refrigeración, acondicionamiento de aire, producción energética y procesamiento químico. (Solucion, 2021)

## **Usos del intercambiador de calor.**

Los intercambiadores de calor se emplean para los siguientes usos:

- Elevar la temperatura de un fluido gracias a otro más caliente.
- Refrescar un fluido empleando otro con menor temperatura.
- Llevar al punto de ebullición a un fluido por la acción de un segundo con mayor temperatura.
- Condensar gases utilizando fluidos fríos.
- Llevar a ebullición un determinado fluido mientras se condensa otro gaseoso más caliente.

La función básica de los intercambiadores de calor es la transferencia de energía resultado del gradiente de temperatura, desde el fluido caliente hacia el frío. El calor fluye a través de una pared de separación, la cual se le denomina superficie o área de transferencia de calor. (Manual de diseño de Proceso de Transferencia de calor, 2019)

El aumento controlado o la disminución de la tasa de transferencia de calor mediante métodos activos y pasivos es una de las herramientas poderosas para optimizar el uso de energía. Precalear y preenfriar los fluidos que fluyen en los intercambiadores de calor son el primer paso hacia el uso óptimo de la energía. En un conjunto de trabajo, cuando hay varios intercambiadores de calor con diferentes funciones o temperaturas de trabajo uno al lado del otro, para maximizar la eficiencia del uso de energía, los intercambiadores de calor se pueden ensamblar como una red de intercambiadores de calor (utilizando la tecnología *pinch*). Al comprimir la red de intercambiadores de calor para usarlos en conjuntos más pequeños, la selección de intercambiadores de calor de fluidos múltiples puede ser una opción adecuada para reemplazar la red de intercambiadores de calor. (Vaisi, Javaherdeh, 2021)

Las funciones típicas de un intercambiador de calor en los procesos industriales son las siguientes:

1. Recuperación de calor: la corriente fría recupera parte del calor contenido en la corriente caliente. Es decir, calentamiento y enfriamiento de las corrientes involucradas, las cuales fluyen simultáneamente a ambos lados del área de transferencia de calor.

2. Evaporación: una de las corrientes involucradas en el intercambio de calor cambia de fase líquida a vapor.3. Condensación: una de las corrientes involucradas en el intercambio de calor cambia de fase vapor a fase líquida.

### **1.2.1 Enfriamiento por aire.**

El motor de una moto en funcionamiento puede llegar a temperaturas tan altas que, entre otras cosas, causaría problemas graves como la fundición de las piezas del motor. Para contrarrestar esta situación, se utilizan sistemas de refrigeración por aire o por agua, dos formas distintas de reducir los grados considerablemente, permitiendo que todo funcione con normalidad.

Como su propio nombre indica, el sistema de enfriamiento por aire utiliza el aire del exterior para el enfriar el motor. El aire circula por las paredes del cilindro y de la culata y, gracias unas superficies radiales denominadas aletas (situadas en el bloque y en la culata), se consigue evacuar el calor generado. (MapFre, 2019)

El sistema de enfriamiento por aire de un motor es fundamental para que el motor se mantenga funcionando en buen estado. Por un lado, este sistema tiene la función de disipar el calor para que el motor no se sobrecaliente y, por otro lado, se encarga de mantener los lubricantes a una temperatura ideal para que no pierdan sus características. Si el sistema de enfriamiento falla, el motor pagará las consecuencias y es probable que su reparación sea muy costosa.

### **Los problemas más comunes en el circuito de refrigeración del motor.**

1. Aumento excesivo de la temperatura. En este caso casi siempre se debe a un problema de apertura del termostato, ya sea porque se ha acumulado suciedad en las aletas del radiador o porque se ha obstruido algún conducto. También puede estar causado por problemas en el ventilador o debido a un desgaste de la bomba refrigerante.

2. Pérdida de líquido refrigerante. Normalmente se debe a una fuga, ya sea en la bomba, a través del eje o en la unión. También puede deberse a una perforación en el radiador, la rotura de un manguito o problemas en las juntas. En algunos casos el motor puede ser el responsable ya que termina consumiendo el líquido refrigerante debido a un problema en la culata.

3. Mezcla del líquido refrigerante con el aceite de motor. Si la junta de la culata no aísla bien la cámara de combustión, existen perforaciones en el bloque motor o las camisas de los cilindros presentan problemas, el aceite de puede mezclar con el líquido refrigerante, alterando considerablemente sus prestaciones. (Euromaster, 2021)

La refrigeración en motores de combustión interna es necesaria para disminuir el calor generado por la quema del combustible (superior a 2000°C) y no transformado en energía mecánica, durante el funcionamiento de estos. La principal función de la refrigeración es mantener todos los componentes dentro del rango de temperaturas de diseño del motor evitando su destrucción por deformación y agarrotamiento. (Cipollone, 2021)

Durante la combustión, parte de la energía generada no es convertida en energía mecánica y se disipa en forma de calor. Dependiendo del motor, alrededor del 33% de la energía potencial del combustible se transforma en trabajo mecánico, y el resto se transforma en calor que es necesario disipar para evitar comprometer la integridad mecánica del motor.

El sistema no solo debe limitar la temperatura máxima del motor para evitar daños al mismo, sino también mantener la temperatura óptima de funcionamiento que, dependiendo del diseño del motor, se encuentra en el rango de 80 a 100°C. De su buen funcionamiento depende en buena medida el rendimiento térmico del motor.

Si el motor trabaja por encima de su temperatura óptima, se corre el riesgo de disminuir la viscosidad del aceite y aumentar el desgaste del motor, se produce un recalentamiento de las piezas y una mayor fricción entre estas. También puede producirse detonaciones al encenderse la mezcla combustible antes de tiempo.

Si el motor trabaja por debajo de su temperatura óptima, se aumenta el consumo de aceite y el desgaste de las piezas, ya que éstas están diseñadas para dilatarse por efecto del calor a un tamaño determinado, se reduce la potencia por falta de temperatura para una combustión eficiente, se producen incrustaciones de carbón en válvulas, bujías y pistones. (Giovine, 2021)

### **1.2.2 Intercambiadores de tubo y coraza.**

La satisfacción de muchas demandas industriales requiere el uso de un gran número de horquillas de doble tubo. Estas consumen considerable área superficial, así como presentan un número considerable de puntos en los cuales puede haber fugas. Cuando se requieren superficies grandes de transferencia de calor, pueden ser mejor obtenidas por medio de equipo de tubo y coraza. (Kern, 1965).

El intercambiador de tubo y coraza consiste de un haz de tubos paralelos encerrados en un estuche cilíndrico llamado coraza.

Hay tres tipos básicos de intercambiadores de tubo y coraza, dependiendo del método utilizado para mantener los tubos dentro de la coraza. El primero es el de tipo fijo o intercambiadores de placa de tubos fija o de cabezal fijo. En este caso, el equipo tiene tubos rectos, asegurados en ambos extremos en placas de tubos soldados a la coraza. En este tipo de construcción, algunas veces es necesario incorporar en la coraza una junta de expansión o una junta de empaques, debido a la expansión diferencial de la coraza y los tubos. Esta expansión se debe a la operación del equipo a diferentes temperaturas y a la utilización de diferentes materiales en la construcción. La necesidad de esta junta es determinada tanto por la magnitud de la expansión diferencial como del ciclo operativo esperado. Cuando no se requieren estas juntas o empaques, el equipo ofrece el máximo de protección contra la fuga del líquido contenido en la coraza. El haz de tubos no puede ser removido para inspección y limpieza, pero el cabezal en el lado de los tubos, las empaques, la cubierta del canal, etc. Son accesibles para mantenimiento y reemplazo de las partes. La coraza puede ser limpiada por retrolavado o químicamente. (Covas, 2012)

Los intercambiadores de cabezal fijo son usados en servicios donde el fluido de la coraza es un fluido limpio, como vapor de agua, refrigerante, gases, cierto tipo de agua de enfriamiento, etc.

El segundo tipo de intercambiadores de tubo y coraza utiliza tubos en forma de U, con ambos extremos de los tubos sujetos a una placa de tubos simple, eliminándose así los problemas de expansión diferencial porque los tubos pueden expandirse y contraerse libremente, la forma de U absorbe estos cambios. A estas unidades se les denomina

intercambiadores con tubos en U. El haz de tubos puede ser removido de la coraza para inspección y limpieza; pero la limpieza mecánica interna de los tubos y su reemplazo es difícil, por lo que este tipo de intercambiadores es usualmente aplicable en servicios limpios o cuando la limpieza química es efectiva. El costo de estas unidades a presión baja es aproximadamente igual al de las unidades de cabezal fijo, pero a presión alta es significativamente más barato, por lo que es muy usado en este tipo de aplicación. El tercer tipo de intercambiadores de tubo y coraza, al igual que las unidades de cabezal fijo, presenta dos placas de tubos, pero con solo una de ellas soldada a la coraza y la otra moviéndose libremente, y así evitando los problemas de expansión diferencial. A este diseño se le conoce como intercambiadores de cabezal flotante. El haz de tubos de este tipo de intercambiador puede removerse para mantenimiento y para la limpieza mecánica de la coraza y los tubos, también, pueden ser limpiados mecánicamente tanto en su exterior como en su interior. El diseño de cabezal flotante es más caro (aprox. en un 25%) que el diseño de cabezal fijo, y es apropiado para servicios asociados a altas temperatura y presiones, pero limitado a aquellos servicios donde la fuga del fluido contenido en la coraza es tolerable. (Manual de diseño de procesos. Transferencia de calor. Intercambiadores de calor. Intercambiadores de tubo y coraza, 2019).

Este es el tipo de intercambiador que se utiliza comúnmente en las refinerías. No es caro, es fácil de limpiar y relativamente fácil de construir en diferentes tamaños y puede ser diseñado para presiones desde moderadas a altas, sin que varíe sustancialmente el costo. Fácil de mantener y reparar (aquellas partes sujetas a fallas frecuentes, tubos y empacaduras, son fáciles de reemplazar). (Jones, 2006)

Un intercambiador de calor se considera una combinación de componentes que permiten una transmisión de energía térmica de manera fácil y eficiente. En la década de 1960 comenzaron a surgir diversas modificaciones en las aletas del intercambiador para aumentar la eficiencia de estos. Esto se realiza en base a que una de las limitaciones del rendimiento de un intercambiador de calor se encuentra en el lado del aire, dado que su resistencia térmica es dominante comparado con el agua a causa del bajo coeficiente de transferencia de calor. Se estima que la resistencia térmica en el lado del aire puede alcanzar un 85 % o más de la resistencia total en el equipo. (Encina, 2018)

### **1.2.3 Intercambiadores de tubos con aletas.**

Como elemento de mejora de la transferencia de calor eficiente, el tubo con aletas tiene un buen potencial en el campo de la utilización del calor residual de los gases de combustión industriales. Sin embargo, el gas de combustión industrial a menudo contiene una gran cantidad de partículas de ceniza. Mientras tanto, la deposición de cenizas en la superficie del intercambiador de calor puede empeorar el rendimiento de la transferencia de calor e incluso acortar la vida útil del intercambiador de calor. (Cheng, 2021)

Los intercambiadores de calor de aletas y tubos son intercambiadores de superficies extendidas donde los tubos son aleteados en la parte externa para aumentar el área de transferencia de calor. En estos tipos de intercambiadores es común que el fluido interno (generalmente un refrigerante) se encuentre en estado bifásico. Debido a que la hidrodinámica y los aspectos relacionados con la transferencia de calor para flujo en 2 fases no está bien entendida, como se entiende el flujo en una fase, las predicciones de caída de presión y coeficientes de transferencia de calor se realizan por medio de correlaciones empíricas, que han sido desarrolladas para ciertas condiciones de operación hidrodinámica y no se garantiza que se ajusten bien a todas las posibles condiciones de operación. (Córdoba, 2016)

Entre los intercambiadores de calor, éste es el más común. Las aplicaciones usuales suelen ser en refrigeración comercial y aire acondicionado, en las que pueden funcionar como evaporador o condensador. El ingeniero Adrián García detalló que en ambas operaciones deben tener ciertos cuidados para garantizar su correcto funcionamiento. En el primero, es necesario el sobrecalentamiento del vapor en la línea de succión; en el segundo, se debe atender el subenfriamiento en la línea de líquido.

Estos equipos están fabricados con cobre y aluminio y se componen de tubos cilíndricos, aletas, un cabezal fijo y otro removible, deflectores y una placa tubular.

El funcionamiento de los intercambiadores de calor de tubo y aletas consiste en pasar el fluido refrigerante por los tubos, mientras que las aletas incrementan el área de transferencia de calor. (San Juan, 2018)

### **1.3 Análisis energético.**

Según San José (2016) desde los albores de la humanidad, el uso y la transformación de diversas fuentes de energía han sido uno de los pilares fundamentales que han posibilitado su progreso. Por ello, no es de extrañar que la optimización de procesos energéticos haya sido y, actualmente, sea, un importante elemento de estudio.

En una instalación industrial pueden existir corrientes fluidas que formando parte de un proceso necesitan ser enfriadas, líneas calientes, y son excedentarias de calor; asimismo existen corrientes fluidas que necesitan ser calentadas, líneas frías, y son deficitarias de calor.

El ahorro energético en un proceso térmico se puede conseguir mediante una red de intercambiadores de calor que, recuperando calor de las líneas calientes y enviándolo a las frías, minimice las necesidades energéticas en los servicios auxiliares donde estas líneas se deben calentar o enfriar, reduciendo así los costes de funcionamiento de la instalación.

La colocación de un intercambiador de calor entre un fluido excedentario de calor y otro deficitario, desde un punto de vista meramente termodinámico, es bastante sencillo, por cuanto sólo está limitado por el rango de temperaturas de ambos fluidos, ya que para que un fluido ceda calor a otro, el primero ha de estar a mayor temperatura que el segundo. (Renedo, 2003)

Desde los puntos de vista energético y medioambiental, la mejor solución es colocar un intercambiador de calor lo más grande posible que realice el mayor intercambio térmico permitido por las temperaturas de ambos fluidos, consiguiendo así el máximo ahorro energético y por tanto una mínima emisión de contaminantes.

#### **1.3.1 Integración de procesos.**

La creciente importancia de la integración del calor puede atribuirse al gran aumento del costo del combustible/energía que comenzó a principios de la década de 1970. La formalización de la integración de calor y la tecnología *pinch* se ha debido a la labor de varios investigadores como Linhoff, Flower, Hohmann y Umeda. (Turton, 1997)

Según NAMP (2003), la integración de procesos es la síntesis de control, ingeniería, modelación y simulación de procesos con herramientas que pueden lidiar con las grandes

cantidades de datos operacionales ahora disponibles por los sistemas de información de proceso. Es un área emergente, que ofrece la promesa de control y gestión mejorada de eficiencias operacionales, uso de energía, impactos ambientales, efectividad de capital, diseño de procesos y administración de operaciones.

La integración de procesos es una tecnología sistemática basada en un enfoque hacia el desarrollo de procesos, que permite al ingeniero ver un gran escenario, primero, y los detalles después; identificar los objetivos globales de eficiencia antes de cualquier actividad de desarrollo, y encontrar la estrategia óptima para llevarlo a cabo. Estos objetivos pueden ser, por ejemplo, la minimización tanto de los requerimientos energéticos como de la generación de residuales, y por otra parte la maximización de la eficiencia del proceso. La integración de procesos se ha convertido en una herramienta muy útil para disminuir los consumos de energía, los vertimientos de residuales contaminantes al medio ambiente en los procesos. Para ello se usan avanzadas herramientas analíticas para identificar las posibilidades de reducir el consumo energético y de residuales en facilidades industriales y alcanzar significativos ahorros en costos y utilidades. (Zamora, 2005)

Entre las técnicas de integración de procesos que han sido desarrolladas e implementadas en algunos procesos se encuentra las redes de intercambio de energía, HEN (Heat Exchanger Network). Los trabajos que abordan las redes de intercambio de calor fueron los primeros en los que se trató este tema de la integración de procesos, incluyéndose el análisis *pinch*, que constituye un indicador de la eficiencia del sistema. (Catá, 2009)

La integración de energía caracteriza el flujo global dentro de cualquier proceso, e identifica las políticas óptimas para su distribución (y redistribución), y de esta forma se obtiene la configuración óptima para el consumo mínimo de ésta. (Sardiñas, 2012)

### **1.3.2 Métodos de integración energética.**

La Integración de Procesos (IP) es una herramienta que por más de cuarenta años ha demostrado su fortaleza para brindar soluciones óptimas a problemas complejos. La interacción de los sistemas de intercambio de energía y de las redes de agua constituye un caso típico de este tipo de problemas. El incremento gradual en los consumos de agua y

energía ha determinado la necesidad de desarrollar metodologías que tomen en cuenta la integración simultánea de estos recursos. (Lorenzo, 2016)

Según Martínez (2015) el aumento del costo de la energía y una conciencia cada vez mayor puesta al cuidado del medio ambiente y a la sustentabilidad, llevan a la inquietud por parte de las industrias por aplicar métodos eficientes para reducir el consumo de energía en las operaciones. Muchos algoritmos han sido desarrollados con el objetivo de disminuir los consumos de servicios auxiliares dentro de una línea de procesos productivos. Uno de estos métodos, es la denominada integración energética, el cual consiste en primera instancia en, diseñar redes de intercambio de energía de tal manera que las corrientes del proceso que se desean enfriar lo hagan mediante las corrientes del mismo proceso que deben ser calentadas y viceversa.

La integración energética constituye una poderosa herramienta que encierra un procedimiento termodinámico bien estructurado para una optimización técnico-económica de cada red de intercambio de calor, puesto que posee fundamentos en la Primera y Segunda Ley de la Termodinámica y constituye una etapa fundamental en el diseño de una nueva planta o en la optimización de una ya existente, haciendo énfasis en el uso eficiente de la energía y la reducción de los efectos medioambientales. (Domínguez, 2015)

En la actualidad se reportan en la literatura científica varios métodos de integración energética para lograr este objetivo, entre los que se destacan: métodos heurísticos, métodos basados en el conocimiento, y métodos termodinámicos. Los métodos termodinámicos pueden ser clasificados en:

- Métodos basados en el análisis de la Primera Ley (Tecnología *Pinch*, Métodos basados en la Programación Matemática).
- Métodos basados en el análisis de la Segunda Ley (Análisis Exergético).
- Métodos basados en la combinación del análisis Económicos y la Segunda ley (Análisis Exergoeconómico).

En la aplicación de estos métodos se hace primordial la selección de un proceso en el cual sea posible la integración de calor, es decir, en el cual existan corrientes energéticas que estén siendo desaprovechadas. (Finetti, 2015)

### **Tecnología *Pinch*.**

La metodología del Análisis *Pinch*, ampliamente difundida, se ha venido aplicando a redes de intercambiadores de calor en diferentes procesos industriales. Esta tecnología ha producido mejoras significativas en la eficiencia de la energía y del capital en diferentes industrias a nivel mundial. Ha sido sustancialmente aplicado en procesos petroquímicos, en industrias de química básica, de alimentos y de papel, (Cheresources, 2004)

### **Métodos basados en la Programación Matemática.**

Según Romero (2005) una de las metodologías que se ha vuelto imprescindible a la hora de diseñar una red de intercambio, son los métodos de optimización (Estocásticos y Programación Matemática), específicamente el Método de Programación Matemática, el cual ofrece la posibilidad de desarrollar herramientas automáticas que sirven de base en la exploración de alternativas y la optimización en el diseño, con lo cual puede desarrollarse la integración energética de una red.

Rossiter y Rutkowski (1993) aseguran que el método de modelación numérica se basa en técnicas de simulación donde se usan modelos matemáticos simplificados del proceso. Estos son combinados con ecuaciones de costo para cuantificar el impacto de las decisiones de diseño en la economía del proceso.

A pesar de que el desarrollo de los métodos de Programación Matemática se hace más complejo debido a la formulación y solución matemática que requieren y por el uso de programas profesionales para su aplicación, son los indicados para evaluar la eficiencia energética de la sección debido a que permiten una optimización más profunda del proceso. (Calzadilla, 2016)

### **Análisis Exergético.**

La aplicación del análisis exergético a los procesos industriales permite obtener la información necesaria para su mejora termodinámica, contribuyendo decisivamente a la eficiencia, integración y optimización energética de las unidades de proceso entre sí. (Cámara, 2003)

El análisis exergético está relacionado con la sostenibilidad debido a que, al incrementar la sostenibilidad en el uso de la energía, se deben considerar no sólo las pérdidas de energía sino también las pérdidas de exergía. Una de las principales ventajas del análisis exergético sobre el análisis energético es que la exergía contenida en los flujos de un proceso es mejor evaluada que la energía, ya que la exergía indica la fracción de energía útil y que es realmente usada. La exergía tiene dos componentes, la llamada exergía física y la exergía química. La aplicación del análisis exergético a un componente, proceso o sector puede guiar sobre cómo mejorar la sostenibilidad reduciendo las pérdidas exergéticas. (González, 2016)

### **Análisis Exergoeconómico.**

La exergoeconomía basada en las leyes de la termodinámica y la contabilidad de costos exergéticos, no omite la exergía de los recursos energéticos ni los costos asociados con sostenibilidad y compensación por las ineficiencias (efluentes y contaminantes) generadas como otras salidas del proceso de producción. En la literatura, es aún incipiente la perspectiva integradora de una medición económica, técnica y sostenible. Las pérdidas exergéticas de los procesos industriales se pueden dividir en dos partes, una interna asociada a la destrucción de exergía causada por irreversibilidad del sistema y una externa relacionada con la degradación de recursos de baja entropía (combustible fósil, o materiales) para convertirlos en “recursos” de alta entropía que se desechan como residuos.

La teoría exergoeconómica incluye las cadenas y eslabones de los sistemas de producción y del mercado de trabajo, como método que traduce externalidades (capital, mano de obra, exergía, materiales y costos ambientales) en costos exergéticos acumulativos en los flujos, que permiten una evaluación integral del costo de los recursos, la eficiencia del proceso y la productividad. Las tendencias apuntan hacia la evaluación de la productividad, mediante indicadores inherentes a los acuerdos, retos y compromisos internacionales, en los nuevos escenarios del progreso tecnológico, la ecoeficiencia y la ecología industrial. (Cely, 2017)

Según Sánchez (2020) la exergoeconomía se utiliza para el mejoramiento de la ecología ambiental, dado que, con sus resultados permiten que los procesos industriales lineales se analicen en sistemas de circuito cerrado, similares a los ecosistemas naturales. Además, crea indicadores que permiten mejorar un sistema y hacerlo sostenible donde los residuos

se manejan eficientes y rentablemente, agregándole a las plantas industriales un potencial ahorro de energía que aumenta su eficiencia productiva.

### **1.3.3 Pinch energético.**

El análisis *pinch* (en inglés *Pinch Analysis*, o literalmente, análisis de "pellizco"), también llamado *método pinch de diseño de procesos* o *tecnología pinch*, es una metodología para optimizar la recuperación energética en un proceso químico industrial, minimizando la inversión de capital.

La tecnología *pinch* para la integración energética consiste, en primer término, en proponer una red de transferencia de calor óptima entre las diferentes corrientes del proceso. El objetivo de esta red es aprovechar al máximo todas las posibilidades de calentamiento y enfriamiento entre las propias corrientes, disminuyendo así la necesidad de utilizar fuentes externas. (Benítez, 2007)

Según Fernández (2003) el principio básico de la tecnología *pinch* es que la misma busca aumentar la energía recuperada con lo que disminuye el consumo de energía, a la vez que se intenta minimizar el número de intercambiadores de calor y el área de éstos, que son factores que penalizan el control y, económicamente, la instalación de la red de intercambiadores. Esta tecnología permite fácilmente establecer restricciones en el diseño y una comprensión intuitiva para el diseñador de la red de la transferencia de calor.

La metodología *Pinch* tiene las siguientes ventajas:

- Es una metodología sistemática para el diseño integrado de plantas de proceso
- Identifica el mínimo consumo de energía necesario
- Permite considerar diferentes opciones de diseño
- Considera al mismo tiempo el coste de energía y de capital
- Se puede aplicar en plantas de proceso nuevas o ya existentes

Surge como una herramienta para el mejoramiento del diseño de procesos contra la generalizada crisis energética mundial. Los principios están basados en los conceptos de calor y potencia termodinámicamente analizados, y su estrategia principal es numerar blancos (objetivos) a priori del diseño central (análisis de las reglas termodinámicas). Sin

embargo, la metodología se ha extendido a otros sistemas que incluyen, los que combinan el calor y la potencia, esquemas de integración de columnas de destilación, hornos, diseño genera de procesos. Una de las principales ventajas de la tecnología *pinch* es la habilidad de establecer objetivos económicos de energía y capital para procesos individuales, o para todo el sitio de producción previo a su diseño. Por lo tanto, al identificar un proyecto específico, se puede conocer el alcance de los ahorros de energía y los requerimientos de inversión. (Linnhoff, 1984)

Desde el punto de vista económico, cuanto mayor sea el intercambiador instalado, mayor será la recuperación de calor conseguida, y con ello el ahorro en costos de energía en los equipos auxiliares de calentamiento y refrigeración, pero también es mayor su precio, al tiempo que se incrementa la energía de bombeo de los fluidos, con lo que la solución óptima económica se logra con un compromiso entre el ahorro económico producido en energía y los costes en los que se incurren para lograrlo, lo que tiene que ser objeto de un amplio y concienzudo estudio económico. (Renedo, 2003)

### **Reglas Básicas de la Tecnología *Pinch*.**

Las reglas básicas de la Tecnología *Pinch*, para lograr la máxima transferencia de calor, entre las líneas calientes y frías son:

- No se debe transferir energía de la parte superior a la inferior del *Pinch*, ya que esto atenta directamente contra la transferencia de calor en modo vertical, y todo intercambio térmico en este sentido aumentará en la misma cuantía los servicios auxiliares de calentamiento y refrigeración.
- No se han de instalar servicios de refrigeración por encima del *Pinch*, ya que de realizarse así se disminuye la posibilidad de recuperar calor en las líneas calientes y se requeriría incrementar el calor comunicado a los servicios de calentamiento la cantidad de calor que extrajo esta refrigeración.
- No se han de colocar servicios de calentamiento por debajo del *Pinch*, de modo análogo a lo anterior, ya que cualquier servicio de calentamiento bajo el *Pinch* implica un aumento de los servicios de refrigeración en la cuantía del calentamiento. (Fernández, 2003)

#### **1.4 Conclusiones Parciales.**

El estudio de estas temáticas ha permitido agrandar los conocimientos acerca de los fundamentos de la Integración Energética, así como de las metodologías más usadas, aportando las herramientas teóricas necesarias para darle solución a cualquier problema que se pueda presentar, concluyendo que:

- Los motores de combustión interna son capaces de convertir un líquido inflamable en energía, y dicha energía transformarla en calor y movimiento.
- La Integración Energética constituye un paso fundamental en la síntesis y diseño de una planta, ya que puede ser considerada como una herramienta para mejorar la eficiencia económica de cualquier proceso químico.
- El método termodinámico de *Pinch* Energético es una herramienta simple para la integración y optimización energética de cualquier proceso, su aplicación requiere sólo del conocimiento de algunas variables termodinámicas.

## **Capítulo II: Materiales y métodos.**

En este capítulo se describe el proceso objeto de estudio y se realiza el diseño de la metodología utilizada.

### **2.1 Descripción del proceso.**

Los equipos electrógenos diesel que se encuentran instalados en Baterías están designados para suministrar corriente eléctrica al Sistema Electroenergético Nacional, ya sea alimentando a una parte del sistema, o suministrando a toda la red nacional. Los Grupos Electrógenos están compuestos principalmente por:

- Motor de Combustión Interna Diesel.
- Generador Eléctrico Sincrónico.
- Sistema de Control o Paneles Eléctricos.

Los Motores de Combustión Interna se caracterizan por seis sistemas principales cada uno con sus funciones y objetivos los cuales son:

Sistema de gestión: Regulación y control de los principales parámetros operativos.

Sistema de admisión: Suministrar aire limpio a la temperatura correcta y cantidad al motor para que se produzca la combustión.

Sistema de lubricación: Reduce fricción para evitar el desgaste de las piezas, enfría, sella los aros de los pistones, limpia, absorbe la presión en las cargas de choque y diagnostica.

Sistema de combustible: Regula y transporta el combustible en el tiempo preciso y con la suficiente presión a la cámara de combustión de cada cilindro de modo que mezclado con el aire pueda ser quemado.

Sistema de escape: Regula y elimina los gases quemados por la combustión.

Sistema de enfriamiento

#### **2.1.1 Sistema de enfriamiento del motor.**

La función principal del sistema de enfriamiento es regular la temperatura del motor. Esto asegura que el motor opere al rango más eficiente y que tenga una larga vida útil. La

temperatura en la mayoría de los motores se mantiene de 82°C a 95°C (180°F a 200°F). Las temperaturas por encima de este punto, pueden crear problemas, incluyendo pre encendido, detonaciones, pistones y válvulas quemadas, camisas rayadas y el sistema de lubricación dañado. Operar el motor por debajo de esas temperaturas conduce a problemas tales como sedimentos y acumulación de agua en la caja del cigüeñal, pobre economía del combustible e innecesario desgaste del motor.

El sistema de enfriamiento que se utiliza es sistema cerrado, sistema en el cual el refrigerante se recircula o se rehúsa enviándolo desde el motor intercambiador de calor (radiador) para rechazar el calor.

#### **Partes del sistema de enfriamiento:**

- Camisas de agua.
- Termostato.
- Bomba de agua y conducción.
- Líquido Refrigerante.
- Radiador o intercambiador de calor.
- Ventilador y conductos.
- Colectores de agua, mangueras y cubiertas.

El sistema de refrigeración posee dos circuitos separados uno de alta temperatura que enfría el motor (HT) y otro de baja temperatura (NT) que se encarga de enfriar el aire de sobrealimentación. Además, cuenta con una refrigeración posterior del líquido refrigerante mediante un radiador con ventilador accionado electrónicamente y un intercambiador de calor de tubo y coraza. Dicho circuito de refrigeración está controlado electrónicamente por termostato.

#### **Circuito del líquido refrigerante (LR) del motor (alta temperatura HT).**

La bomba del líquido refrigerante (1) montada en el motor bombea el LR a través del motor. El LR fluye a través de las cámaras de LR del bloque motor, rodea las camisas de cilindro y penetra en la culata. Desde allí pasa por las cámaras de LR y los orificios de LR de las culatas (estos detalles internos del motor no se muestran en el anexo E). El LR llega hasta el regulador de temperatura (4) a través de las tuberías colectoras de LR. Una parte

del LR se separa antes del regulador de temperatura (4) y refluye a través de un diafragma (5) directamente hasta la bomba del LR (1). El regulador de temperatura (4) impulsa en función de la temperatura una parte del LR a través del radiador de refrigeración de retorno del LR del motor (6). A continuación, el LR fluye a lo largo del intercambiador de calor del aceite lubricante (7) antes de llegar de nuevo a la bomba de LR del motor (1).

### **Circuito de LR del aire de sobrealimentación (AS) (baja temperatura, NT).**

La bomba del LR del AS (13) bombea el LR del AS hacia el refrigerador del AS (14). El LR del AS llega hasta el regulador de temperatura (15) a través del refrigerador del AS (14). El regulador envía el LR del AS directamente a la bomba del LR del AS (13) con el motor frío. Con el motor a temperatura de servicio se dirige el LR del AS a través del radiador de refrigeración de retorno del LR del motor (16) hasta la bomba del LR del AS (13).

## **2.2 Metodología de integración energética.**

Para la integración energética la tecnología *pinch* consiste, en proponer una red de transferencia de calor óptima entre las diferentes corrientes del proceso, donde esta red tiene como objetivo; aprovechar al máximo todas las posibilidades de calentamiento y enfriamiento entre las propias corrientes, disminuyendo así la necesidad de utilizar fuentes externas.

Para proponer la red de intercambiadores integrada, la tecnología *pinch* se divide en doce etapas con tareas de trabajo específicas que se pueden agrupar como:

- 1 (Simulación) Definición del problema (etapa preliminar, uno, dos y tres).
- 2 Determinación del punto de *pinch* (etapas cuatro, cinco y seis).
- 3 Diseño de la red de intercambiadores (etapas siete, ocho, nueve y diez).
- 4 (Análisis económico) Optimización la diferencia de temperatura para minimizar los costos de la red diseñada (etapas once y doce).

### **2.2.1 Desintegrar energéticamente (etapa preliminar).**

En esta primera etapa preliminar se realiza una desintegración energética, la cual consiste en descartar todos los intercambiadores de calor del diagrama de flujo del proceso de estudio y en su lugar mostrar el calentamiento o enfriamiento de las corrientes mediante su temperatura inicial y final.

### **2.2.2 Identificación de las corrientes y extracción de sus datos (etapas uno y dos).**

El primer paso que debe darse al enfrentarse a un nuevo problema mediante el uso de técnicas de optimización, es obtener los datos necesarios para poder resolver este problema. Estos datos suelen provenir de un diagrama de flujo del proceso en las etapas previas del diseño, o del diagrama de flujo de una instalación existente que se desee integrar energéticamente.

Se considera como corriente energética a toda corriente del proceso que conserva su masa y composición, pero cambia su contenido energético (temperatura o estado de agregación) entre la entrada y salida de una operación, generalmente son aquellas que pasan por equipos de transferencia de calor y pueden clasificarse como:

Corrientes calientes: Son aquellas que pueden o deben ser enfriadas y su temperatura de entrada es mayor que la de salida, por tanto, ceden calor.

Corrientes frías: Son aquellas que deben ser calentadas y su temperatura de entrada es menor que la de salida, por tanto, absorben calor.

Utilidades: Son fluidos adicionales que se utilizan como medio de enfriamiento (utilidades frías) o calentamiento (utilidades calientes), cuando no es económico o práctico el uso de intercambio de calor entre las corrientes del proceso.

Cuando se conocen las corrientes a intercambiar es necesario un balance de masa y energía, el cual se determina aplicando la primera ley de la termodinámica:

$$\Delta H = Q \pm W \qquad 2.1$$

Es muy importante saber interpretar los datos que proporciona el diagrama de flujo, para poder entresacar de todos estos datos solo los que son realmente necesarios.

Se sabe que en un intercambiador de calor no se realiza trabajo mecánico, por tanto, la ecuación de la primera ley queda de la siguiente manera:

$$\Delta H = Q \quad 2.2$$

En integración energética, el dato más importante de una corriente es su contenido energético (entalpía, calor específico, flujo de calor, entre otros). Además otros datos importantes son el flujo y las temperaturas de entrada y de salida de cada corriente por tanto:

Q representa el valor energético (calor), resultando cuando se habla de calor sensible:

$$Q = m C_p (T_{ent} - T_{sal}) \quad 2.3$$

y cuando se presenta calor latente:

$$Q = m \lambda \quad 2.4$$

Siendo:

Q: calor intercambiado, kW.

m: caudal másico, kg/h

C<sub>p</sub>: calor específico del fluido, kJ/kg°C.

T<sub>ent</sub>: temperatura de entrada del fluido, °C.

T<sub>sal</sub>: temperatura de salida del fluido, °C.

W: trabajo mecánico, kW.

ΔH: variación de entalpía, kW.

Cuando se trata de las corrientes frías  $Q < 0$  figura que se les debe suministrar esa energía para lograr la temperatura de salida (calor absorbido). En el caso de las corrientes calientes  $Q > 0$  simboliza que debe eliminarse ese calor para alcanzar la temperatura de salida (calor cedido).

El calor neto del sistema es la suma del calor de todas las corrientes y representa la cantidad de energía adicional que debe suministrarse o eliminarse del sistema mediante utilidades

para lograr un balance energético. Si  $Q_{\text{neto}} < 0$  significa que al sistema se le debe suministrar esa energía mediante utilidades calientes; en cambio, si  $Q_{\text{neto}} > 0$  aparenta que ese calor debe ser eliminado mediante utilidades frías.

### **2.2.3 Selección del $\Delta T_{\text{mín}}$ inicial (etapa tres).**

En cualquier punto de un intercambiador de calor existe una diferencia mínima de temperatura debido, a que, en el diseño de cualquier equipo de transferencia de calor tiene que cumplirse la Segunda Ley de la Termodinámica que prohíbe cualquier cruce de temperatura entre las corrientes frías y calientes. Esa diferencia mínima de temperatura figura la menor diferencia de temperaturas que puede existir entre una corriente fría y una caliente a lo largo de un intercambiador de calor, para que la transferencia sea efectiva y se denomina temperatura de aproximación mínima  $\Delta T_{\text{mín}}$ .

Mientras menor sea la diferencia de temperatura seleccionada, mayor será el área de transferencia de calor necesaria en los intercambiadores, por lo que aumentarían los costos de adquisición, instalación y mantenimiento, pero a su vez serán menores los requerimientos de utilidades, los cuales disminuirán los costos de operación; por ende, la selección de la diferencia de temperatura mínima más adecuada constituye un problema de optimización.

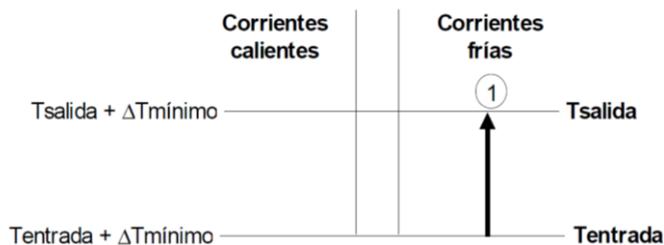
### **2.2.4 Construcción del diagrama de intervalos de temperaturas y del diagrama de cascada (etapas cuatro y cinco).**

#### **Diagrama de intervalos de temperaturas.**

El diagrama de intervalos de temperaturas es un gráfico–tabla donde se plotea la data de corrientes definida en el epígrafe 2.2.2. Cada corriente se representa con una flecha vertical que parte desde la temperatura de entrada hasta la temperatura de salida. Tras definir el valor de la variación mínima de temperatura ( $\Delta T_{\text{mín}}$ ) se procede a la construcción del diagrama de temperatura, el cual proporciona la información cualitativa y cuantitativa del intercambio entre las corrientes del sistema. Además se establecen escalas de temperaturas para cada una de las corrientes, donde se toman sus valores tanto de entrada como de salida, de modo que todos los valores de temperatura de las corrientes calientes queden hacia el lado de Corrientes Calientes del diagrama, representado de la siguiente forma:



En el caso de las Corrientes Frías quedaría de la siguiente manera:



Los valores correspondientes al lado Corrientes Frías del diagrama son calculados según el  $\Delta T_{mín}$  seleccionado con anterioridad para garantizar que se transfiera calor desde las corrientes calientes a las corrientes frías; así si  $t_{1C}$  es la temperatura de entrada de la corriente 1 entonces  $t_{1F}$  es la diferencia entre  $t_{1C}$  y el  $\Delta T_{mín}$  ( $t_{1F} = t_{1C} - \Delta T_{mín}$ ). De igual forma ocurre con los valores de las corrientes frías. En ocasiones los valores de las corrientes (frías y calientes) coinciden, lo cual resulta provechoso. De esta manera quedan establecidos intervalos que representan el tramo de las corrientes por medio de flechas. Los datos de las capacidades calóricas ( $m_i C_{p_i}$ ) se toman igualmente de la tabla de definición de las corrientes, antes hecho, con los cuales se calcula la entalpía de cada intervalo:

$$Q_i = [T_{Cal_{max}} - T_{Cal_{min}}] \sum_{i=1}^{CorrCal} (m_i C_{p_i}) - [T_{Fría_{max}} - T_{Fría_{min}}] \sum_{i=1}^{CorrFría} (m_i C_{p_i}) \quad 2.5$$

Donde:

$T_{Cal_{max}}$  y  $T_{Cal_{min}}$ : son las temperaturas máxima y mínima del intervalo para el lado caliente

$T_{fríamax}$  y  $T_{fríamin}$ : son las mismas temperaturas para el lado frío del intervalo

### **Diagrama de cascada.**

Para la construcción del diagrama de cascada se determina la cantidad óptima de energía que se debe suministrar y extraer del proceso mediante utilidades, así como la temperatura a la que se produce el *Pinch*. En cada cuadrado se balancea la energía que entra (encontrada al lado izquierdo y arriba de cada cuadrado) con la que existe en el intervalo para determinar la energía de salida. La energía que sale de cada intervalo debe ser mayor o igual que cero. Cada vez que se requiera energía adicional para completar el balance de la etapa, se extrae de la utilidad caliente. Al final toda la energía remanente del proceso se pasa a la utilidad fría. El calor neto del sistema es la diferencia de calor entre las utilidades frías y calientes y tiene que coincidir con el calor neto obtenido de los datos de la corriente.

#### **2.2.5 Construcción de las curvas compuestas (etapa seis).**

Las curvas compuestas son diagramas de entalpía acumulada contra temperatura donde se examina el calor disponible y se tienen las demandas de calor del proceso.

Para construir las curvas compuestas se separan las corrientes frías de las calientes y calculan los datos energéticos de cada intervalo de temperatura. Generalmente se resumen en una tabla que contiene la letra que identifica el intervalo (en orden decreciente y comenzando por un intervalo adicional al último), la temperatura superior de cada intervalo, el calor o entalpía de las corrientes (separando las calientes de las frías) en cada intervalo y la entalpía acumulada de las corrientes hasta el intervalo.

Como el intervalo adicional al último no tiene corrientes ni temperatura inferior, la primera entalpía es siempre cero. El calor o entalpía acumulada se calcula como la suma de todas las entalpías desde el primer intervalo (el adicional) hasta el intervalo actual.

Para construir las curvas compuestas se grafican los puntos de temperatura superior de cada intervalo en función de la entalpía acumulada hasta el intervalo. Los puntos se unen con rectas. Sobre la misma carta se deben representar las tablas de corrientes calientes y de corrientes frías, obteniéndose dos líneas.

## 2.2.6 Determinación del número óptimo de intercambiadores de calor y propuesta de intercambio encima y debajo del *pinch* (etapas siete y ocho).

### Determinación del número óptimo de intercambiadores de calor.

En esta etapa se debe tener en cuenta que una corriente nunca debe transferir calor a través de la temperatura de *Pinch* el proceso se divide en "encima del *pinch*" y "debajo del *pinch*" para calcular la cantidad de intercambiadores y diseñar la red de intercambio. Una vez determinado el punto de *pinch*, es necesario calcular el número mínimo de intercambiadores de calor que garanticen una transferencia eficiente para las condiciones mínimas de utilidades.

El número de intercambiadores encima del *pinch* se calcula como:

$$Nisp = Nccsp + Ncfsp + Nuc - 1 \quad 2.6$$

Por debajo como:

$$Nibp = Nccbp + Ncfbp + Nuf - 1 \quad 2.7$$

Donde:

Nisp: Número de intercambiadores sobre el *pinch*

Nccsp: Número de corrientes calientes sobre el *pinch*

Ncfsp: Número de corrientes frías sobre el *pinch*

Nuc: Número de utilidades calientes

Nibp: Número de intercambiadores bajo el *pinch*

Nccbp: Número de corrientes calientes bajo el *pinch*

Ncfbp: Número de corrientes frías bajo el *pinch*

Nuf: Número de utilidades frías

El número total de intercambiadores de calor a instalar es la suma de intercambiadores sobre y bajo el *pinch*.

### **Propuesta de intercambio encima y debajo del *pinch*.**

El objetivo de esta etapa consiste en determinar, para cada intercambiador de calor, las corrientes involucradas y la cantidad de energía que intercambian entre sí. En la confección de la red propuesta se colocan las corrientes en rectángulos, las calientes encima (incluidas las utilidades calientes) y las frías debajo (incluidas las utilidades frías), además dentro de los rectángulos se escribe también la cantidad de energía que absorberá o liberará cada corriente. Los intercambiadores de calor se simbolizan con círculos numerados consecutivamente y se debe pasar toda la energía de las corrientes calientes a las frías, utilizando sólo la cantidad de intercambiadores calculados en la etapa anterior.

### **2.2.7 Diseño preliminar de la red de intercambiadores y diseño final del diagrama de flujo integrado energéticamente (etapas nueve y diez).**

#### **Diseño preliminar de la red de intercambiadores.**

El diseño de redes de intercambio de energía es una actividad importante en el diseño en ingeniería química, el mismo ha pasado por diferentes etapas, partiendo desde los métodos conceptuales, heurísticos, hasta hoy que se presentan métodos específicos, para cada etapa del diseño.

Para el diseño de la red de intercambiadores de calor se ubican los intercambiadores en orden en el diagrama donde las corrientes frías se representan de derecha a izquierda y las calientes, viceversa. Posteriormente se colocan los intercambiadores en la línea de las corrientes según la distribución realizada en el paso 8 y se calculan sus temperaturas de entrada y de salida. Después de conocer los valores de dichas temperaturas se debe cumplir que que la diferencia de temperatura entre el fluido frío y el caliente sea mayor o igual que la diferencia mínima de temperatura seleccionada (10°C).

Para el cálculo de las temperaturas utilizamos la siguiente ecuación:

$$T_{ecf} = T_{scf} - \frac{Q}{m \cdot C_p} \quad 2.8$$

Donde:

T<sub>ecf</sub>: Temperatura de entrada de la corriente fría.

Tscf: Temperatura de salida de la corriente fría.

Es importante analizar, en cada intercambiador de calor, que la diferencia entre las temperaturas de las corrientes calientes y frías sea mayor o igual al  $\Delta T_{\text{mín}}$  seleccionado. En el caso que existan intercambiadores de calor con cruce de temperaturas o que no garanticen el  $\Delta T_{\text{mín}}$  se debe realizar otra distribución, cambiando el orden de los equipos propuesto en esta etapa o, incluso, cambiando la distribución preliminar propuesta desde la etapa 8.

El caudal de vapor saturado se calcula por:

$$m = \frac{Q}{h_{fg}} \quad 2.9$$

El caudal de agua de enfriamiento se calcula como:

$$m = \frac{Q}{\Delta h_f + h_{fg}} \quad 2.10$$

### **Diseño final del diagrama de flujo integrado energéticamente.**

Reconstruir el diagrama de flujo del proceso integrado y realizar el diseño de los intercambiadores constituye la etapa final de la integración energética propiamente dicha.

Para determinar el área de un intercambiador de calor, se utiliza la ecuación de diseño

$$A = \frac{Q}{U_d LMTD} \quad 2.11$$

Donde:

A: Área del intercambiador,  $m^2$ .

Q: Calor total transferido, W.

$U_d$ : Coeficiente global de transferencia de calor para las condiciones de operación,  $W/m^2K$ .

LMTD: Diferencia media logarítmica de temperatura,  $^{\circ}C$

La diferencia logarítmica de temperatura para intercambiadores de calor que operan a contracorriente puede ser determinada por la ecuación:

$$LMTD = \frac{\Delta T_{mayor} - \Delta T_{menor}}{\ln\left(\frac{\Delta T_{mayor}}{\Delta T_{menor}}\right)} \quad 2.12$$

Donde:

$\Delta T_{mayor}$ : Diferencia de temperatura mayor, °C.

$\Delta T_{menor}$ : Diferencia de temperatura menor, °C.

$$\Delta T_{mayor} = T_2 - t_1 \quad 2.13$$

$$\Delta T_{menor} = T_1 - t_2 \quad 2.14$$

### **2.3 Optimización económica de la red de intercambio.**

El análisis de integración es una herramienta ágil, que se centra en facilitarle a la empresa que esté analizando su proceso de producción una inversión mínima, para ello se llevan a cabo las dos últimas etapas de la metodología de integración energética.

#### **2.3.1 Análisis económico (etapa once).**

El análisis económico incluye el costo por consumo de utilidades y el costo por amortización de la inversión de los intercambiadores, pues el resto de los costos productivos no serán modificados, al mantenerse además el mismo volumen de producción, debido a que al realizarse la integración no serán afectadas las principales operaciones del proceso productivo.

Una vez que se realiza la distribución energética y se conforma la red de intercambio de calor, es posible estimar la cantidad de energía que será entregada a cada intercambiador en particular que requiera de servicios auxiliares, y de esta manera es posible conocer la cantidad o flujo de utilidad que se maneja en cada unidad de intercambio, mediante un balance de energía en dependencia del tipo de utilidad.

El costo de las utilidades puede ser estimado, aproximadamente, mediante las expresiones y tablas reportadas en la literatura especializada, y el costo de inversión para cada intercambiador de calor puede ser estimado mediante los índices de costo reportados en la literatura, por medio de softwares o mediante catálogos de fabricantes. También pueden ser utilizadas correlaciones empíricas en la estimación del costo de construcción, instalación y montaje de intercambiadores:

$$\text{Costo} = a + (b A^c d e)$$

2.15

Donde:

A: área de transferencia de calor en  $\text{ft}^2$

A, b y c: coeficientes que definen el tipo de intercambiador

d: coeficiente que define al material de construcción

e: coeficiente que define la presión de operación del equipo

### **2.3.2 Optimización de temperatura de aproximación mínima (etapa doce).**

Para finalizar la integración energética se realiza una optimización, la cual consiste en repetir toda la integración energética, desde la etapa 3 hasta la 11, seleccionando diferentes valores de  $\Delta T_{\text{mín}}$  en cada repetición y representando gráficamente el costo para cada uno, todo esto se ejecuta para determinar un valor de  $\Delta T_{\text{mín}}$  óptimo, para el cual los costos totales se hagan mínimos. Esta operación se puede efectuar a partir de la gráfica donde se puede estimar el punto de  $\Delta T_{\text{mín}}$  donde se hace mínimo el costo, se puede ajustar un modelo y optimizarlo matemáticamente o bien se puede obrar una última integración que compruebe el costo mínimo estimado.

## Conclusiones

1. El procedimiento planteado reduce el consumo de utilidades en una batería de grupos electrógenos Diesel.
2. Se desarrolla la metodología de *pinch* energético para obtener una nueva red de intercambiadores de calor.
3. Mediante la metodología propuesta se valora que la integración energética es fundamental en la síntesis, diseño y rediseño de las plantas químicas, pues la misma mejora la eficiencia económica de cualquier proceso.

## **Recomendaciones**

1. Presentar a la dirección de los Grupos Electrógenos la metodología propuesta para evaluar los posibles resultados.
2. Preparar y capacitar aún más al personal que trabaja con los motores de combustión interna Diesel en la temática tratada.

## Bibliografía

- Altshuler, J. (2004). Suplemento especial. Editorial academia.2004.
- Autosolar Energy Solutions SLU, Autosolar Energía y Servicios S.L.U. Carrer de Traginers, 20, 46290 Alcàsser (Valencia). (2021). Disponible en: <https://autosolar.es/blog/aspectos-tecnicos/que-es-un-grupo-electrogeno>
- Benítez Hernández, Agustín. Martínez Ochoa, Yamilé. Domínguez Alfonso, Félix Juan. (2007). Tecnología *Pinch*: Una Introducción a la Integración Energética DEPARTAMENTO DE QUÍMICA E INGENIERÍA QUÍMICA UNIVERSIDAD DE MATANZAS "CAMILO CIENFUEGOS"
- Borroto, A. (2001). "Gestión energética empresarial". Editorial Universidad de Cienfuegos. Cienfuegos, 2001.
- Calzadilla León, L. (2016). Integración energética mediante programación lineal en la sección de Hidrofinación de Diesel de una refinería de petróleo. Universidad de Matanzas. Facultad de Ciencias Técnicas. Departamento de Química e Ingeniería Química. Matanzas. Cuba. 2016.
- Cámara Rascón, Ángel. Delgado Diestre, J. Querol Aragón, Enrique. Menéndez Pérez, Emilio. García Torrent, J. (2003). Análisis exergetico para la integración energética de tres esquemas GTL.
- Castillo, R. (2014). Análisis de la gestión de la energía en la planta de destilación atmosférica de la refinería “Camilo Cienfuegos”. Tesis presentada en opción al título de Ingeniero Químico. Facultad de Ingeniería, Universidad de Cienfuegos “Carlos Rafael Rodríguez”. Cienfuegos, Cuba.
- Cely Niño, V. H. (2017). Medición de la productividad en procesos industriales que integren cadena de frío, basada en evaluaciones de exergoeconomía y ecoeficiencia. Tesis Doctoral presentada como requisito parcial para optar al título de: Doctor en Ingeniería –Industria y Organizaciones. Bogotá, D.C. Colombia. 2017.
- Chaves, Luiz Inácio. Da Silva, Marcelo José. (2015). Small-scale power generation analysis: Downdraft gasifier coupled to engine generator set.
- Cheng, Min. Liao, Qiang. (2021). Heat transfer and pressure drop characteristics of 3-D finned tube heat exchanger in ash-laden flue gas.

- Cheresources. (2004). "*Pinch* Technology: Basics for Beginners". (2004). Disponible en: <http://www.cheresources.com>
- Córdoba, E.J. (2016). Modeling and simulation of flow in fin-and-tube heat exchangers with phase change in the coolant side.
- Covas, Jose A. 2012. Propuesta de mejora de la red de intercambio de calor de la planta de Reformación Catalítica de la Refinería de Petróleo “Camilo Cienfuegos”
- Deng, Chao. Ibrahim, Thamir K. (2020). Air cooling techniques and corresponding impacts on combined cycle power plant (CCPP) performance: A review  
Techniques de refroidissement de l’air et impacts correspondants sur les performances des centrales électriques à cycle combine.
- Dra. González Cortés, Meilyn. Dr.Sc. González Suárez, Erenio. (2012). Impact of Process Integration in the Sugar and Derivatives Processes. Facultad de Química Farmacia, Universidad Central "Marta Abreu", Las Villas, Cuba. 2012.
- Ecured. Motor Diesel. Consultado noviembre (2021) [https://www.ecured.cu/Motor\\_di%C3%A9sel](https://www.ecured.cu/Motor_di%C3%A9sel).
- Encina, Carlos. (2018). AUMENTO DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR MEDIANTE MODIFICACIÓN DE ALETAS EN INTERCAMBIADORES DE TUBOS OVALADOS Y ALETAS. Santiago de Chile. 2018.
- Enérgya. (2019). ¿Qué es la energía térmica? Abril, 22. 2019. Disponible en: <https://www.energyavm.es/que-es-la-energia-termica/>
- Enérgya-VM ® (2017). Enérgya VM Gestión de Energía s.l.u., Enérgya VM Generación, s.l.u. y Enérgya VM Energías Especiales, s.l.u. pertenecen al Grupo Villar Mir Energía. C/ Federico Mompou 5, Edificio 1, 4ª planta, 28050 Madrid, España.
- Euromaster. (2021). Sistema de enfriamiento por aire del motor: ¿Cómo funciona y cómo prevenir los problemas más comunes? Disponible en: <https://www.euromaster-neumaticos.es/blog/sistema-refrigeracion-coche>
- Fransisco, Marielys. Díaz, Raúl. Castro, Miguel. Costa, Ángel. (2007). Grupos electrógenos y calidad de la energía. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, Ciudad de La Habana, Cuba.

- Giovine, G. Di. Cipollone, R. (2021). Modeling and experimental validation of a triple-screw pump for internal combustion engine cooling.
- González Cortés, M. Herrera Álvarez, S. Martínez Martínez, Y. Albernas Carvajal, Y. (2016). Exergy analysis of integrated sceneries to ethanol and other products production from sugar cane.
- Grupel Energy. Consulta, noviembre (2021). Disponible: <https://grupel.eu/es/applications/centrales-electricas/>
- Jones, D. S. J. S. (2006) Handbook of Petroleum Processing.
- K. Javaherdeh, A. Vaisi, R. Moosavi, M. Esmaeilpour. (2017). Experimental and numerical investigations on louvered fin-and-tube heat exchanger with variable geometrical parameters.
- Kern, D. (1965) Procesos de transferencia de calor.
- Linnhoff, B. Vredeveld, D.R. (1984). "Pinch Technology Has Come of Age" Chemical Engineering. Prog Julio 1984.
- Lorenzo Llanes, Junior. Lourdes, Zumalacárregui de Cárdenas. Mayo Abad, Orestes. (2016). Integración simultánea de agua y energía: logros y desafíos.
- Manual de diseño de Proceso de Transferencia de calor (2019). Intercambiadores de calor. Principios básicos. PDVSA # MDP-05-E-01.
- Manual de diseño de procesos (2019). Transferencia de calor. Intercambiadores de calor. Intercambiadores de tubo y coraza. PDVSA # MDP-05-E-02.
- MapFre. (2019). Refrigeración por aire o por agua en motos, ¿cuál es mejor? Disponible en: <https://www.motor.mapfre.es/motos/noticias-motos/refrigeracion-por-aire-por-o-agua/>
- Martín, Jesús. (2019). El funcionamiento de un motor de combustión, paso a paso. Disponible en: <https://www.motorpasion.com/revision/funcionamiento-motor-combustion-paso-a-paso>
- Martínez, Julieta. Domínguez, Orlando. Finetti, J.E. (2015). DISEÑO DE REDES DE INTERCAMBIO DE ENERGÍA, SU ENSEÑANZA EN DISEÑO DE PROCESOS EN INGENIERÍA QUÍMICA. Diseño de Procesos. Facultad de Ingeniería Química. Universidad Nacional de Salta. Argentina. 2015.

- Moore, J.A. Stevenson, J.P. (2016). Thermal and flow characteristics of a single-row circular-finned tube heat exchanger under elevated free-stream turbulence.
- Rashid A. Aziz. Mhadi A. Ismael. Ezrann Z. Zainal A. Salah E. Mohammed. Masri B. Baharom. (2021). Effect of generator configuration on the free-piston motion and power generation of air-driven expander system.
- Rivero Gutiérrez, Heydi. (2016). Integración energética en la sección de destilación atmosférica de una refinería de petróleo. Tesis de Grado en opción al Título de Ingeniera Química.
- Romero, P. (2005), Comparación de las metodologías de integración energética en el caso de estudio para la producción de anhídrido acético. Tesis presentada en opción al título de Ingeniero Químico. Universidad de Matanzas Camilo Cienfuegos.
- Rossiter, A. P., Rutkowski, M. A. (1993). Process Integration for waste water minimization. Linhoff March Inc.
- San José Díaz, Enrique. (2016). Análisis Energético y Exergético de la Integración de Ciclos Criogénicos con Plantas de Regasificación de Gas Natural Licuado (GNL).
- San Juan, Danahé. (2018). Intercambiadores de calor, características y peculiaridades. Disponible en: <https://0grados.com.mx/intercambiadores-de-calor-caracteristicas-y-peculiaridades/>
- Sánchez Cuellar, A. (2020). Análisis de la productividad en la industria alimenticia con base en una metodología desarrollada y fundamentada en la exergoeconomía y la exergía social. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. Colombia. 2020.
- Sardiñas Aranguren, Lisandra. (2012). Integración energética en la línea de jugos simples y néctares de la empresa citrícola “Héroes de Girón” de Jagüey Grande.
- Solucion. (2021). Intercambiador de calor: ¿qué es y para qué sirve? Disponible en: <https://t-solucion.com/intercambiadores-calor-que-son-sirven/>
- Turton, R. Bailie, R.C. Whiting, W.B. Shaeiwitz, J.A. (1997). Analysis, Synthesis, and Design of Chemical Processes. Section 4: Synthesis and Optimization of a Process Flow Diagram.

- Villa Pérez, Dayan. (2012). Análisis de los consumos internos en centrales eléctricas de generación distribuida.
- Zarate Rocha, Hendrick Maxil. Martins Nogueira, Manoel Fernandes. Da Silva Guerra, Danielle Regina. Hernandez, Juan José. Santos Queiroz, Larissa. (2021). Improving the usage of vegetable oils in generator sets used for off-grid power generation by hydrogen addition.

## Anexos

### Anexo A:



Grupo electrógeno.

### Anexo B:



Panel de control de un grupo electrógeno.

**Anexo C:**



Motor de combustión interna diésel.

**Anexo D:**



Intercambiador de calor.

## Anexo E:

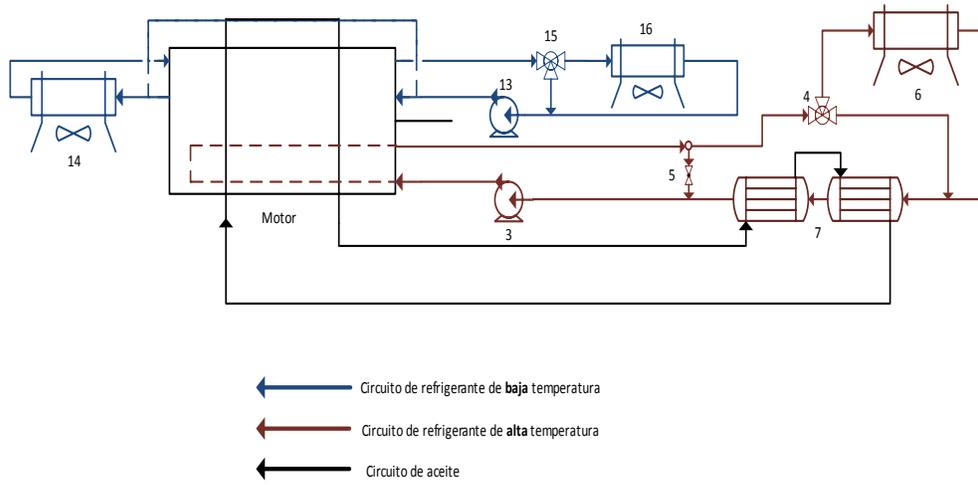


Diagrama de Flujo.