

**UNIVERSIDAD DE HOLGUÍN  
FACULTAD DE INGENIERÍA**

**LA ENERGÍA SOLAR TÉRMICA COMO ALTERNATIVA PARA  
ELEVAR LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EL TRASIEGO DEL  
COMBUSTIBLE FUEL OÍL EN CUPET HOLGUÍN**

**TESIS EN OPCIÓN AL GRADO ACADÉMICO DE  
MÁSTER EN EFICIENCIA ENERGÉTICA.**



**Autor: Lic. Frank Pérez Pérez**

**Holguín, julio de 2016**

**UNIVERSIDAD DE HOLGUÍN**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**LA ENERGÍA SOLAR TÉRMICA COMO ALTERNATIVA PARA  
ELEVAR LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EL TRASIEGO DEL  
COMBUSTIBLE FUEL OÍL EN CUPET HOLGUÍN**

**TESIS EN OPCIÓN AL GRADO ACADÉMICO DE  
MÁSTER EN EFICIENCIA ENERGÉTICA.**

**Autor: Lic. Frank Pérez Pérez**

**Tutor: MSc. Franklyn González Segura**

**Holguín, julio de 2016**

**PENSAMIENTO.**

## **AGRADECIMIENTOS.**

A los profesores de la maestría, por enseñarnos el camino que teníamos que recorrer.

A mis compañeros Silvia y Osmel, por su valiosa ayuda en momentos críticos.

A mis compañeros de trabajo, por ayudarme en las mediciones en el terreno.

A mi familia, por entusiasmarse junto conmigo.

A todo aquel que me ayudó con una acción, un gesto, un material, un consejo.

A todos muchas gracias.

## **DEDICATORIA**

Esta investigación está dedicada a todos aquellos que se interesan por mejorar nuestras condiciones de vida a través de la actividad científico-técnica.

A mi familia

A mis compañeros de trabajo.

A mis compañeros de la maestría.

## **SÍNTESIS**

En este trabajo se analizó la eficiencia energética en el trasiego de combustible Fuel Oil desde el punto de vista de encontrar el método para disminuir su viscosidad mediante su calentamiento que permita alcanzar niveles inferiores de consumo global de energía. Se determinó que la utilización de la Energía Solar Térmica ofrece como resultado la disminución de la viscosidad cinemática del combustible lo que permite aumentar el volumen bombeado por unidad de tiempo al disminuir el periodo de trabajo de la bomba y por consiguiente el consumo global de energía eléctrica y el aumento de la eficiencia energética en el proceso de manipulación de este tipo de combustible.

## SUMMARY

# ÍNDICE

INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO 1-Fundamentación teórica del calentamiento del fuel oíl desde la perspectiva de la eficiencia energética.....	8
1.1- Situación actual y perspectiva de la matriz energética mundial y necesidad de aumentar la eficiencia energética .....	8
1.2- Eficiencia Energética en los procesos de trasiego de fluidos .....	11
1.2.1- Eficiencia energética en sistemas de bombeo.....	13
1.2.2- Eficiencia energética en el bombeo de líquidos viscosos.....	16
1.3- Situación actual de la eficiencia energética en el proceso de recepción almacenamiento y entrega de combustible Fuel Oíl en Cuba y soluciones aplicadas hasta el momento. ....	20
1.4- Conclusiones del Capítulo 1: .....	22
CAPÍTULO 2: Propuesta de soluciones para elevar la eficiencia energética en los sistemas de bombeo del Fuel Oíl mediante su calentamiento. ....	24
2.1- Diagnóstico Energético del Depósito 642 de la Empresa Comercializadora de Combustibles de Holguín.....	24
2.2- Descripción del esquema tecnológico del trasiego de Fuel Oil en el Depósito 642 de la ECC-Holguín.....	26
2.3- Propuesta de solución para aumentar la eficiencia energética en el trasiego del combustible Fuel Oil .....	27
2.4- Valoración económica y ambiental de la solución propuesta. ....	38
2.4.1- Determinación del ahorro por concepto de disminución de consumo de energía eléctrica. ....	38
2.4.2- Determinación de la Rentabilidad Financiera.....	40

2.4.4- Determinación de los beneficios ambientales.....	46
CONCLUSIONES:.....	47
RECOMENDACIONES .....	48
BIBLIOGRAFÍA: .....	49
ANEXOS .....	54

## INTRODUCCIÓN

En el año 1973, con la invasión de Israel a Palestina y producto al rápido agotamiento de las reservas de petróleo, este producto sufre una abrupta elevación de los precios [15]. Surge así lo que se pudiera calificar como la primera gran crisis energética mundial. El mundo se enfrentaba así a una contradicción entre la necesidad y disponibilidad de los combustibles fósiles. La humanidad había alcanzado un desarrollo tecnológico sin precedentes, el cual obligatoriamente siguió aumentando con el paso de los años. Este inmenso desarrollo depende de un enorme suministro energético para ser funcional, por ende, a medida que pase el tiempo aumentará la demanda de este vital elemento. Sin embargo, la matriz energética actual proviene en gran medida de fuentes no renovables como el petróleo, el gas natural, el carbón y el uranio, cuyas reservas irán disminuyendo con el paso del tiempo hasta agotarse completamente. Por tanto, la humanidad tiene dos urgentes tareas a cumplir: lograr, mantener y elevar la eficiencia energética en la generación, distribución y consumo de la misma y la otra es cambiar la matriz energética a fuentes renovables que puedan suministrar energía de forma suficiente, estable, continua y oportuna.

Para Cuba el problema de la disponibilidad energética no fue tan crítico en esos años, pues como parte del Consejo de Ayuda Mutua Económica se favorecía con intercambios económicos fundamentalmente con la antigua URSS que le proveían de un suministro estable de petróleo. Con el derrumbe del campo socialista en 1990 se perdió este suministro y el país cayó en una grave crisis energética [28]. Aunque la discreta recuperación económica del país permitió aliviar parte de esta crisis, no es hasta el año 2006 con la Revolución Energética que se comienza con más intensidad a modificar la matriz energética, la cual, aunque sigue hoy día basada principalmente en los combustibles fósiles, fomenta el aprovechamiento de las fuentes de energías renovables basado en las siguientes condicionantes:

- 1- Agotamiento de los combustibles tradicionales utilizados para la generación de energía, entiéndase petróleo y gas natural, cuyas reservas a nivel mundial se estiman se empiecen a agotar pasados los siguientes 50 años.

- 2- Contaminación del medio ambiente provocado por la quema de petróleo y sus componentes, influyendo visiblemente en el calentamiento ambiental y en la consiguiente elevación del nivel del mar, producto a la cual Cuba, en su condición insular, se verá afectada.
- 3- Encarecimiento de la obtención de petróleo y sus componentes, tanto por los inestables precios en el mercado internacional como por el elevado costo de la obtención y el procesamiento del combustible de producción nacional.

En un estudio realizado por un grupo de especialistas cubanos y mexicanos del sector energético de Cuba en el año 2013 se recomienda entre otros aspectos el desarrollo de tecnologías avanzadas y eficientes para el aprovechamiento de la Fuentes Renovables de Energía (FRE), así como estudiar su potencial en Cuba de forma que, aunque no se logre sustituir la generación de energía a partir de los combustibles fósiles, se desplace un porcentaje importante de la actual carga de consumo hacia las mismas [28].

A tono con estos hechos el gobierno cubano se proyecta por el aprovechamiento óptimo de las FRE, lo que se ejemplifica en el lineamiento número 247 de la Lineamientos de la Política Económica y Social del Partido y la Revolución donde se plantea que se potenciará el aprovechamiento de las distintas fuentes renovables de energía, fundamentalmente la utilización del biogás, la energía eólica, hidráulica, biomasa, solar y otras; priorizando aquellas que tengan el mayor efecto económico [23].

Otro aspecto a tener en cuenta para comprender la necesidad de aprovechar energías renovables es la competitividad. El disponer de una fuente de energía gratuita permite reducir los costos de producción. Esta baja de costos repercute en una baja del precio final del producto sin reducir su calidad. Esto supone una clara ventaja competitiva frente a empresas competidoras que no empleen esta fuente energética [24].

Es necesario tener en cuenta que la gestión de la eficiencia energética en la empresa mediante el empleo de fuentes de energías renovables en los procesos industriales, le permite disminuir el vertimiento directo e indirecto de desechos peligrosos al medio ambiente, como el monóxido de carbono. Ello repercute directamente en la calidad del producto, pues le permite cumplir con estándares internacionales, así como reduce la

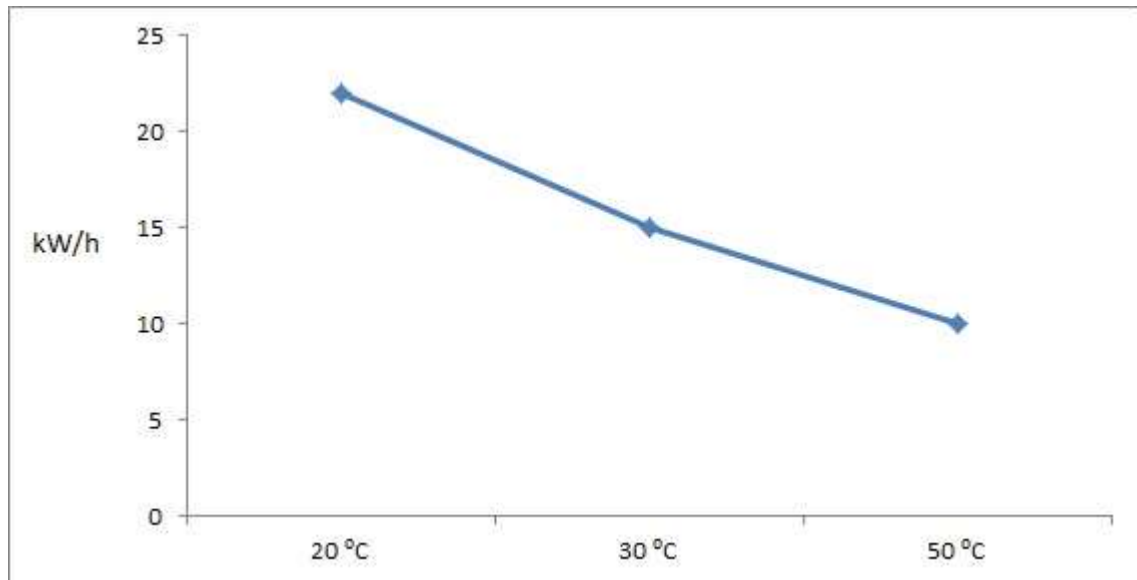
posibilidad de que la empresa sea penalizada por provocar impactos ambientales negativos [21].

En la actualidad, en Cuba, uno de los sistemas de bombeo que posee un alto coeficiente de consumo de energía eléctrica por volumen trasegado es el trasiego de combustible Fuel Oil. Este combustible se utiliza fundamentalmente en procesos industriales, en la generación de vapor para grandes cocinas y lavanderías y en la generación eléctrica. Para hacerlo llegar a su destino final es necesario manipularlo desde un medio de transporte a un depósito y viceversa al menos en dos ocasiones. Pero, debido a su viscosidad, el Fuel Oil no puede ser bombeado por bombas centrífugas convencionales, sino por bombas de desplazamiento positivo [2], las cuales presentan un elevado nivel de energía consumida por volumen de combustible bombeado.

Un ejemplo de esto es el Depósito 642 de la Empresa Comercializadora de Combustibles de Holguín (ECC-H). En esta Instalación para el bombeo del Diésel se emplea una bomba centrífuga con un consumo de 14,5 kWh, la cual bombea 60 m<sup>3</sup>/h para un consumo de 0,24 kWh por metro cúbico bombeado. Para el bombeo del Fuel Oil se emplea una bomba de desplazamiento positivo con un consumo de 22 kWh, la cual bombea con un caudal de 20 m<sup>3</sup>/h, para un consumo de 1,1 kWh por metro cúbico bombeado. Se puede concluir que para el bombeo de Fuel Oil se utiliza cuatro veces la energía eléctrica empleada para bombear el Diésel. Esto se debe a que para trasegar un volumen determinado la bomba de Fuel Oil debe trabajar más tiempo, siendo esta magnitud inversamente proporcional al gasto del bombeo. La forma generalmente utilizada para aumentar este gasto es el calentamiento del combustible. Para lograrlo, uno de los métodos que se utilizan para disminuir la viscosidad del Fuel Oil para su bombeado es el calentamiento con vapor, a través de pequeños conductos (conocidos como venas de vapor) que se adosan a la tubería central de combustible. Otro método que también se usa es el calentamiento mediante resistencias eléctricas [37]. La utilidad del calentamiento se explica en la relación inversa entre la temperatura del Fuel Oil y el consumo de energía eléctrica de la bomba, tal como se muestra en la Figura 1.

Si bien es cierto que estos métodos son efectivos pues mejoran los parámetros de bombeo, a su vez implican la posibilidad de que se aumente la energía total consumida por volumen bombeado.

*Figura 1 Relación de la temperatura del Fuel Oil y el consumo de la bomba*



Una forma de obtener calor para un fin determinado es mediante la utilización de la Energía Solar Térmica la que es el resultado del aprovechamiento de la energía del Sol para producir calor que puede aprovecharse para cocinar alimentos o para la producción de agua caliente destinada al consumo de agua doméstico, ya sea agua caliente sanitaria, calefacción, o para producción de energía mecánica y, a partir de ella, de energía eléctrica. Adicionalmente puede emplearse para alimentar una máquina de refrigeración por absorción, que emplea calor en lugar de electricidad para producir frío con el que se puede acondicionar el aire de los locales [33].

Se puede plantear entonces como una forma de calentar el combustible Fuel Oil para su bombeo es mediante el uso de la Energía Solar Térmica (EST). Todo operador de combustible Fuel Oil puede afirmar que en días soleados este “fluye mejor” que, en días lluviosos o fríos, atestiguando así la influencia de la EST en la viscosidad del producto.

¿Por qué sería factible utilizar la EST para el calentamiento del Fuel Oil?

- Se consumiría prácticamente la mitad de la energía eléctrica utilizada en el proceso de bombeado del combustible, con su correspondiente impacto económico y ambiental.
- Disminuiría el tiempo necesitado para realizar este procedimiento
- Al no usar instalaciones eléctricas ni de vapor disminuye la probabilidad de ocurrencia de averías o accidentes.
- Las instalaciones que aprovechan la EST prácticamente no requieren mantenimientos, salvo la limpieza de los cristales del colector [4].

La utilización de la Energía Solar Térmica se enmarca dentro del concepto de eficiencia energética, por el que se entiende la adecuación de los sistemas de producción, transporte y consumo de energía, destinada a lograr el mayor desarrollo sostenible con los medios tecnológicos al alcance, minimizando el impacto sobre el ambiente, optimizando la conservación de la energía y la reducción de los costos energéticos [10].

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto se define como el **problema de investigación** el siguiente:

¿Cómo elevar la eficiencia energética en el trasiego de combustible Fuel Oil mediante su calentamiento con Energía Solar Térmica?

Este problema científico se enmarca dentro del **Objeto de la investigación**:

Los sistemas de bombeo del combustible Fuel Oil.

Y dentro del **Campo de la investigación**:

la eficiencia energética en el trasiego del combustible Fuel Oil.

Se propone como **Objetivo**:

Proponer una solución al calentamiento del combustible Fuel Oil en el establecimiento 642 de CUPET Holguín para disminuir el consumo energético en su trasiego.

Partiendo de la **Hipótesis** qué:

La utilización de la energía solar térmica para calentar el combustible Fuel Oil será la solución idónea para disminución del consumo de energía eléctrica en el trasiego del producto.

Para llevar a cabo la investigación se definirán las siguientes **tareas de investigación**:

1. Analizar los antecedentes, la situación actual y perspectiva de la eficiencia energética en los sistemas de trasiego de fluidos a nivel mundial.
2. Analizar el estado actual del trasiego de combustibles pesados en Cuba, teniendo en cuenta las soluciones tomadas hasta el momento para aumentar la eficiencia energética.
3. Realizar un diagnóstico energético del Depósito 642 de la Empresa Comercializadora de Combustibles de Holguín para determinar cuánto representa el bombeo de combustibles en el consumo energético global de la entidad.
4. Comparar en cuanto al consumo energético global los métodos empleados hasta el momento para disminuir la viscosidad del Fuel Oil mediante su calentamiento
5. Analizar la factibilidad técnica de la utilización de la Energía Solar Térmica para elevar la eficiencia energética en el trasiego de Fuel Oil mediante su calentamiento.
6. Realizar valoraciones técnico económicas de los resultados obtenidos en los casos de estudio con respecto a costos y a los beneficios ambientales que proporciona la solución propuesta en la investigación.

Como **métodos** empleados durante la investigación se utilizaron los siguientes:

- Teóricos:
  - ✓ **Análisis y síntesis:** Para el estudio de la bibliografía y lograr sintetizar el contenido científico a investigar.
  - ✓ **Histórico – Lógico:** Para realizar el análisis de las tendencias de la utilización de la Energía Solar Térmica en el calentamiento de combustibles, seguir su desarrollo histórico y la lógica de su evolución.
  - ✓ **Hipotético - Deductivo:** Para proponer una hipótesis de trabajo y fijar las variables a investigar.

- Empíricos:
  - ✓ **Observación:** Para obtener el conocimiento del comportamiento del objeto de la investigación y acceder a la información directa e inmediata.
  - ✓ **Estadístico:** Para conocer en tablas y gráficos el comportamiento del objeto en el tiempo.
  - ✓ Los **resultados** que se esperan de la investigación son:

**Actualidad:** La importancia creciente de la energía renovable y la sostenibilidad energética con sus implicaciones sociales, económicas y ecológicas le dan actualidad a todo proyecto de investigación orientado a elevar la eficiencia energética de un sistema. Además, como el costo de la energía es cada vez más creciente, reducir el consumo de energía eléctrica en el trasiego de combustibles, le adjudican una gran actualidad al presente tema de investigación.

**Novedad:** Se hace un estudio de la utilización de la Energía Solar Térmica en el trasiego de combustibles pesados con la finalidad de disminuir el consumo de energía eléctrica.

**Aporte práctico:** Se aporta como resultado práctico la demostración de la posibilidad de utilización de la Energía Solar Térmica en el trasiego de combustibles pesados con la finalidad de disminuir el consumo de energía eléctrica.

Para un mejor entendimiento del tema el trabajo se dividió en dos capítulos. El capítulo uno versará sobre la fundamentación teórica de la eficiencia energética en los sistemas de trasiego de combustibles y el capítulo dos versará sobre la propuesta de solución para aumentar la eficiencia energética en los sistemas de trasiego de combustible Fuel Oil.

## **CAPÍTULO 1-Fundamentación teórica del calentamiento del fuel oil desde la perspectiva de la eficiencia energética.**

### **1.1- Situación actual y perspectiva de la matriz energética mundial y necesidad de aumentar la eficiencia energética**

Se entiende por eficiencia energética la adecuación de los sistemas de producción, transporte y consumo de energía, destinada a lograr el mayor desarrollo sostenible con los medios tecnológicos al alcance, minimizando el impacto sobre el ambiente, optimizando la conservación de la energía y la reducción de los costos energéticos [16]. Es una herramienta que ayuda a reducir el consumo energético de los sistemas eléctricos y térmicos, y a su vez busca optimizar el desempeño de los mismos, evaluando sus parámetros de funcionamiento, sus consumos energéticos, la variación de la carga durante el periodo de trabajo, sus rendimientos, entre otros parámetros específicos de cada equipo [13].

La eficiencia energética es una práctica empleada durante el consumo de energía que tiene como objeto reducir el consumo de energía. Los individuos y las organizaciones que son consumidores directos de la energía pueden reducir el consumo energético para disminuir costos y promover sostenibilidad económica, política y ambiental. Los usuarios industriales y comerciales pueden desear aumentar eficacia y maximizar así su beneficio. Entre las preocupaciones actuales está el ahorro de energía y el efecto medioambiental de la generación de energía eléctrica. También se denomina ahorro de energía [1].

La Revolución industrial fue un periodo histórico en el que el mundo sufre el mayor conjunto de transformaciones socioeconómicas, tecnológicas y culturales de la historia de la humanidad, desde el neolítico [11].

La economía basada en el trabajo manual fue reemplazada por otra dominada por la industria y la manufactura. La innovación tecnológica más importante fue la máquina de vapor. El aporte de este invento fue que sustituía el trabajo de personas y animales al convertir la energía química contenida en el combustible, en este caso el carbón, en energía mecánica [11]. Surge así entonces la necesidad de un suministro suficiente y

estable de carbón, cuya mayor parte se formó durante el período Carbonífero (hace 359 a 299 millones de años), por lo que se califica como un recurso no renovable [36].

Otro salto en el desarrollo industrial fue el motor de combustión interna el cual significó en general un salto abismal en el aprovechamiento del poder calórico de los combustibles fósiles en su transformación en energía mecánica [36]. Parecía entonces que todo estaba resuelto pues el trabajo bruto humano estaba sustituido por la energía mecánica útil a partir de los combustibles fósiles. Surgió entonces otra preocupación. El petróleo es una fuente de energía no renovable, pues no se puede regenerar al mismo ritmo que se extrae. Esto indica que se agotará en un futuro determinado.

Si la extracción continúa al mismo ritmo que en el 2012, salvo que se encontrasen nuevos yacimientos, las reservas mundiales durarían aproximadamente 32 años. Se calcula que quedan unos 143 000 millones de toneladas. Hay entre 6,8 y 7,2 barriles de petróleo por tonelada, en dependencia de la densidad del petróleo. Por tanto, las reservas de crudo se calculan alrededor de 1 003 billones de barriles de petróleo. Sin embargo, el límite de las reservas podría estar más cercano aún si se tienen en cuenta modelos de previsión con un consumo creciente como ha venido siendo normal a lo largo de todo el siglo pasado. Los nuevos descubrimientos de yacimientos se han reducido drásticamente en las últimas décadas haciendo insostenible por mucho tiempo los elevados niveles de extracción actuales, sin incluir la futura demanda de los consumidores asiáticos. Por otra parte, la mayoría de las principales reservas mundiales han entrado en declive y solo las de Oriente Medio mantienen un crecimiento sostenido. Se espera que incluso esos yacimientos entren en declive hacia el 2020, lo que provocaría que toda la producción mundial disminuyera irremediablemente, conduciendo a la mayor crisis energética que haya sufrido el mundo industrializado [35].

Según la Teoría del pico de Hubbert, actualizada con datos recientes por la Asociación para el estudio del pico del petróleo, el inicio de dicho declive se habría producido en torno a 2007. La Agencia Internacional de la Energía reconoció en 2010 que el cénit de la extracción mundial de petróleo convencional se había producido en 2006. Existen otros tipos de reservas de hidrocarburos, conocidos como bitúmenes, el cual es petróleo extra

pesado, cuyas reservas más conocidas son las de bitumen de las Arenas de Atabasca en Canadá, y la faja petrolífera del Orinoco en Venezuela. Según cálculos de la estatal venezolana PDVSA, la unión de estas reservas no convencionales con reservas convencionales le da a Venezuela el primer puesto como el país con mayores reservas de hidrocarburos en el planeta [15].

Teniendo en cuenta que los combustibles fósiles se agotarán en un momento futuro la humanidad ha dirigido su desarrollo tecnológico por el camino de la eficiencia energética por dos vertientes fundamentales:

1- Optimización del consumo de la energía obtenida a partir de los combustibles fósiles y otras fuentes de energía no renovable

Se entiende por optimización la búsqueda sistemática dentro del rango de condiciones de operación permitido para mejorar la función de evaluación tanto como sea posible. El propósito de la optimización es en general, encontrar el conjunto de valores de las variables de diseño que minimizan el costo de los productos finales. En el caso del costo del producto final se tiene como elemento fundamental la cantidad de energía que se debe invertir para lograr un producto o servicio [24]. Los elementos más importantes a lograr la optimización son: la generación, distribución y consumo de energía eléctrica donde se busca obtener más cantidad de energía eléctrica con el menor consumo de combustibles y lograr la menor pérdidas en la distribución, así como lograr un uso final de la energía más racional, tanto en el área productiva y de servicios como en el área doméstica; la eficiencia en el transporte mediante la disminución del índice de consumo de los medios; la climatización y refrigeración, donde la optimización se centra en aumentar el aislamiento con el medio y el ajuste de cargas, lo cual se utiliza de igual forma para las aplicaciones de calor (cocina, fundición, calderas, tratamiento térmico y calefacción) .

2- Incremento del aprovechamiento de las fuentes renovables de energía que permita trasladar a esta gran parte del consumo de los portadores energéticos convencionales.

Se denomina energía renovable a la energía que se obtiene de fuentes naturales virtualmente inagotables, ya sea por la inmensa cantidad de energía que contienen, o porque son capaces de regenerarse por medios naturales. Entre las energías renovables

se cuentan la solar, eólica, geotérmica, hidroeléctrica, mareomotriz, solar, la biomasa y los biocombustibles [3].

Un concepto similar, pero no idéntico es del de las energías alternativas: una energía alternativa, o más precisamente una fuente de energía alternativa es aquella que puede suplir a las energías o fuentes energéticas actuales, ya sea por su menor efecto contaminante, o fundamentalmente por su posibilidad de renovación. Según esta definición, algunos autores incluyen la energía nuclear dentro de las energías alternativas, ya que generan muy pocos gases de efecto invernadero [36].

Las fuentes de energías renovables tienen como desventaja que dependen en gran medida de las variables meteorológicas. En un día nublado es difícil aprovechar la energía solar, así como que en días donde no haya viento no se puede aprovechar la energía eólica. No obstante, la organización ambientalista Greenpeace presentó un informe en el que sostiene que la utilización de energías renovables para producir el 100% de la energía es técnicamente viable y económicamente asumible, por lo que, según la organización ecologista, lo único que falta para que en el mundo se dejen a un lado las energías sucias, es necesaria voluntad política y conciencia social. Para lograrlo, son necesarios dos desarrollos paralelos: de las energías renovables y de la eficiencia energética (eliminación del consumo innecesario) [33].

La energía solar por su aprovechamiento se puede clasificar en térmica y fotovoltaica. La térmica se aprovecha para el calentamiento de agua con fines sanitarios, con fines industriales y para generación de energía eléctrica mediante la generación de vapor. Para convertir la radiación solar en calor se utilizan captadores que por su diseño se pueden clasificar en planos, de tubos al vacío, cilindro parabólico, fresnel, cilindro parabólicos compuestos campos de concentración solar. Mediante esta tecnología se pueden alcanzar temperaturas desde los 80 hasta más de 400 grados Celsius en dependencia del diseño [33].

## **1.2- Eficiencia Energética en los procesos de trasiego de fluidos**

En la naturaleza existen una gran cantidad de sustancias necesarias para la vida del hombre que pueden considerarse como fluidos ya que son un tipo de medio continuo

formado por alguna sustancia entre cuyas moléculas hay una fuerza de atracción débil. Los fluidos se caracterizan por cambiar de forma sin que existan fuerzas que lo obliguen a recuperar la forma "original". Un fluido es un conjunto de partículas que se mantienen unidas entre sí por fuerzas cohesivas débiles y/o las paredes de un recipiente; el término engloba a los líquidos y los gases. En el cambio de forma de un fluido la posición que toman sus moléculas varía, ante una fuerza aplicada sobre ellos, pues justamente fluyen. Los líquidos toman la forma del recipiente que los aloja, manteniendo su propio volumen, mientras que los gases carecen tanto de volumen como de forma propia. Las moléculas no cohesionadas se deslizan en los líquidos, y se mueven con libertad en los gases. Los fluidos están conformados por los líquidos y los gases, siendo los segundos mucho menos viscosos (casi fluidos ideales) [17].

Entre estos fluidos el más común que utiliza el hombre es el agua, dado lo imprescindible de esta sustancia para la vida. Otros líquidos que el hombre ha aprendido a utilizar a lo largo de su desarrollo son los aceites vegetales y posteriormente el petróleo y sus componentes. Producto el desarrollo de la humanidad cada vez van siendo superiores los volúmenes necesarios de trasegar y almacenar. Pero, para lograr que un fluido se mueva en una dirección determinada, se debe tener en cuenta que este solo lo hará en la dirección donde exista una diferencia de presión. En la práctica, si no se aplica una fuerza externa la presión va a estar determinada por la altura de la columna de líquido. Por ejemplo, para aprovechar el agua almacenada en un tanque elevado solo hay que abrir la válvula, pues la diferencia de altura entre la columna del líquido del tanque y de la válvula provoca el desplazamiento del líquido. Sin embargo, para elevar el agua desde la cisterna hasta el tanque se hace necesario aplicar una fuerza externa, pues el líquido por sí solo no se elevará más allá del nivel donde se iguale la altura de las columnas del mismo, debido al principio de Pascal, también conocido como la ley de los vasos comunicantes [14].

Este fenómeno es aplicable igualmente para todas las sustancias que el hombre necesite almacenar y trasegar para su empleo y que sean fluidos, independientemente de sus características físicas, ya sean productos alimenticios como pastas y siropes, pulpa de papel, desechos y aguas residuales, mezclas de hormigón, combustibles, etc.

### 1.2.1- Eficiencia energética en sistemas de bombeo.

En estas aplicaciones es necesario tener en cuenta que, como se consume un portador energético, ya sea, electricidad o combustibles fósiles, se hace necesaria la optimización de estos procesos, mediante el mejoramiento de la función de evaluación mediante la búsqueda sistemática dentro del rango permisible de operación. Las principales acciones realizadas en esta dirección se centran en la eficiencia de trabajo del motor eléctrico de la bomba. Para entender las principales medidas que se deben tomar se deben conocer primero las causas más frecuentes de la ineficiencia en los sistemas de bombeo:

- Mala selección de la bomba.
- Condiciones de operación diferentes a las de diseño.
- Bombas sobredimensionadas para asimilar futuras ampliaciones de capacidad en la planta.
- Factores de diseño muy conservadores para asegurar que la bomba cumpla con las condiciones requeridas.
- Otras consideraciones de diseño válidas cuando los costos de la energía eran menores [27]

La búsqueda de oportunidades de ahorro en los sistemas de bombeo, se concentran en el 20 % de las bombas que consumen el 80 % de la energía por este concepto. Otra alternativa consiste en analizar solo las bombas por encima de un cierto tamaño, por ejemplo, de más de 18 kW.

Los principales aspectos hacia los que se enfoca esta búsqueda de oportunidades de ahorro de energía son:

1. Mantenimiento excesivo, el cual puede estar asociado con:

- Bombas sobredimensionadas, operando severamente estranguladas.
- Bombas en cavitación.
- Bombas en muy mal estado técnico.

- Bombas no adecuadas para la función que realizan.
2. Sistemas de bombeo con grandes variaciones de flujo o de presión.
  3. Recirculación de flujos en dispositivos de control o de protección.
  4. Válvulas de control de flujo por estrangulamiento
  5. Ruidos en bombas o en válvulas.
  6. Sistemas con bombas múltiples.
  7. Cambios en las condiciones de operación
  8. Consumos con bajos flujos y alta presión.
  9. Bombas con sobrecapacidad conocida.

Una vez que las posibles causas de ineficiencia han sido identificadas, deben evaluarse los potenciales de ahorro y el costo de implementación y los indicadores de rentabilidad de los posibles proyectos de mejora. El análisis de las condiciones actuales de operación sobre la curva característica original de la bomba puede ser un buen punto de partida para ello [27].

Algunas de las principales medidas de ahorro de energía en sistemas de bombeo, ordenadas en orden creciente en cuanto a la inversión requerida para su implementación se resumen a continuación:

- Sacar de servicio bombas innecesarias. Esta es una medida obvia, pero que muchas veces no sea aprovechada. Si el exceso de capacidad en funcionamiento se debe a que los requerimientos de flujo varían, se puede pensar controlar el número de bombas en operación mediante un sistema automático, instalando sensores de presión e interruptores en una o más bombas.
- Restaurar las holguras internas de las bombas. Esta medida se puede aplicar en los casos en que las características de una bomba hayan variado significativamente a causa de desgaste de las partes de la bomba, lo cual afecta sensiblemente las recirculaciones internas y su eficiencia.

- Recorte o cambio de impelentes. Si la carga es excesiva se puede utilizar esta medida cuando el estrangulamiento no es suficiente para permitir sacar bombas de servicio. El recorte de impelente es el método más económico para corregir el sobredimensionamiento de una bomba. La carga se puede reducir entre un 10 y un 50 % mediante el recorte del impelente, sin sobrepasar los límites establecidos por el fabricante para la carcasa dada.
- Reemplazo de bombas sobredimensionadas. Las bombas sobredimensionadas constituyen la causa número uno de pérdidas de energía en los sistemas de bombeo. El reemplazo de bombas debe evaluarse con relación a otras alternativas de reducción de capacidad, tales como el recorte o sustitución de impelentes o el control de velocidad.
- Uso de bombas múltiples. El empleo de varias bombas conectadas en paralelo ofrece una alternativa a los métodos de control de capacidad por estrangulamiento, recirculación o variación de velocidad. Los ahorros resultan de poder sacar de servicio una o más bombas a bajas demandas, logrando que las bombas en servicio operen a alta eficiencia. Un sistema con bombas múltiples debe considerarse en los casos en que la demanda se mantiene en periodos prolongados por debajo de la mitad de la capacidad unitaria de la bomba instalada.
- Usar una bomba “booster”. El consumo de energía general del sistema puede reducirse significativamente si se emplea una bomba “booster” para suministrar el flujo a alta presión que requiere un consumidor específico, al permitir que el resto del sistema opere a una presión menor.
- Cambio de velocidad de la bomba. Los accionamientos de velocidad variable permiten alcanzar los mayores ahorros de energía, al lograr acoplar la salida de la bomba con los requerimientos del sistema. No obstante, estos métodos requieren mayores inversiones que otros métodos de control de capacidad. Dentro de los accionamientos de velocidad variable están:
  - Acoplamientos o transmisiones con relación de velocidad variable (mecánica, hidráulica, electromagnética)
  - Motores eléctricos de dos velocidades.

- Variadores de frecuencia [27].

### 1.2.2- Eficiencia energética en el bombeo de líquidos viscosos.

La facilidad con la que un fluido se derrama es una indicación de su viscosidad. Es notable que un lubricante “corre” o fluye menos cuando está frío, que cuando está caliente, esto quiere decir que la viscosidad es más alta cuando está frío. Por tanto, se define como viscosidad como la propiedad de un fluido que ofrece resistencia al movimiento relativo de sus moléculas. Este movimiento relativo de las moléculas provoca un esfuerzo de cizallamiento en el fluido. En un fluido como el agua, alcohol, aceite, u otros líquidos comunes la magnitud del esfuerzo a cizallamiento es directamente proporcional al cambio de velocidad entre las diferentes posiciones en el fluido. Esa relación del cambio de velocidad con respecto a la posición en la dirección perpendicular a la pared es lineal, y se le llama gradiente de velocidad ( $\partial v / \partial y$ ), y también se le llama índice de cizallamiento. Al hecho de que el esfuerzo de cizallamiento en el fluido es directamente proporcional al gradiente de velocidad, se puede establecer matemáticamente que:  $\tau = \mu \partial v / \partial y$ , siendo la constante de proporcionalidad la letra griega  $\mu$  y llamada viscosidad dinámica. En los cálculos de mecánica de los fluidos se relaciona la viscosidad dinámica con la densidad del fluido ( $\rho$ ). A esta relación se le llama Viscosidad Cinemática y se denota con la letra griega  $\nu$  ( $m^2/seg$ ) [14]:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

Para comprender por qué la viscosidad influye en el gasto de un flujo se debe tener en cuenta que la viscosidad es la propiedad de un fluido de ofrecer resistencia al movimiento relativo de sus moléculas. Esto indica que cada molécula tiende a adherirse a toda superficie con la que tenga contacto, muy similar a lo que ocurre con la fuerza de rozamiento, cuando tiende a frenar el movimiento de un cuerpo al que se le aplica una fuerza determinada. Luego si se hace una comparación entre el combustible Diésel y el combustible Fuel Oil, con el supuesto de que los dos fluidos están en conductos de igual longitud y diámetro y se les aplica una fuerza igual en función de la presión de trabajo de

la bomba, se observa que el valor de flujo másico (masa de fluido de una densidad  $\rho$  pasando por una sección en la unidad de tiempo) para el Diésel será mucho mayor que el del Fuel Oil, toda vez que la viscosidad del primero es cien veces inferior a la del segundo [14].

Esto explica por qué es imposible utilizar bombas centrífugas para bombear Fuel Oil. En su lugar se emplean bombas de desplazamiento positivo, que si bien no logran el mismo gasto que las bombas centrífugas son más efectivas para impulsar fluidos de viscosidad alta [8].

Para lograr una mayor eficiencia energética en este tipo de bomba, teniendo en cuenta el tipo de fluido con que trabajan se observa la ecuación siguiente [14]:

$$G = \frac{\pi \times r^2 \times \Delta p}{8 \times \mu \times l}$$

Donde  $r$ , es el radio de la tubería;  $\Delta p$ , la diferencia de presión en los extremos de la tubería, (en este caso la presión de trabajo de la bomba de combustible);  $\mu$  la viscosidad del Fuel Oil y  $l$  la longitud de la tubería [14].

Luego si el radio y la longitud de la tubería y la presión de trabajo de la bomba son constantes, la única forma de aumentar el gasto en la tubería, lo que equivale a aumentar el volumen de fluido trasegado por unidad de tiempo es disminuyendo la viscosidad del producto. Para ello las dos principales técnicas utilizadas son el calentamiento y agregando aditivos.

En la Tabla 1.1 se muestra la relación de la temperatura con la viscosidad para el caso del combustible Fuel Oil. (Véase Anexo 1 para temperaturas inferiores a 50 °C)

*Tabla 1.1: Relación de la temperatura del Fuel Oil con su viscosidad [18].*

Viscosidad cinemática del Fuel Oil según temperatura	Temperatura en °C			
	50	60	80	100
Viscosidad en $\mu\text{m}^2/\text{seg}$	240	55	32	9.6

Para elevar la temperatura del combustible se utilizan diferentes métodos. Los más comunes son el calentamiento con resistencias eléctricas y el calentamiento con vapor. El calentamiento con resistencias eléctricas se usa principalmente en países de climas fríos, ya que se evita el riesgo de los cambios bruscos de temperatura en las instalaciones si se utilizara el vapor de agua. Permite un mejor aprovechamiento de la inercia térmica y dada la versatilidad de formas que puede tener una resistencia eléctrica permite su instalación en prácticamente la totalidad de las instalaciones. Otra ventaja que ofrece es la posibilidad de licuar el combustible remanente en el interior de la bomba, el cual, al aumentar su viscosidad por la disminución de la temperatura ambiental, alcanza un grado de solidificación que impide la correcta arrancada de la bomba [37].

La principal desventaja que ofrece este sistema radica en el elevado consumo global de energía que requiere, el cual puede igualar o ser superior al consumo de energía propio de la bomba de combustible, por lo cual su utilización responde casi exclusivamente al criterio técnico de alcanzar una viscosidad apta para el trasiego del producto. Se emplean dos sistemas de calentamiento: eléctrico y con vapor.

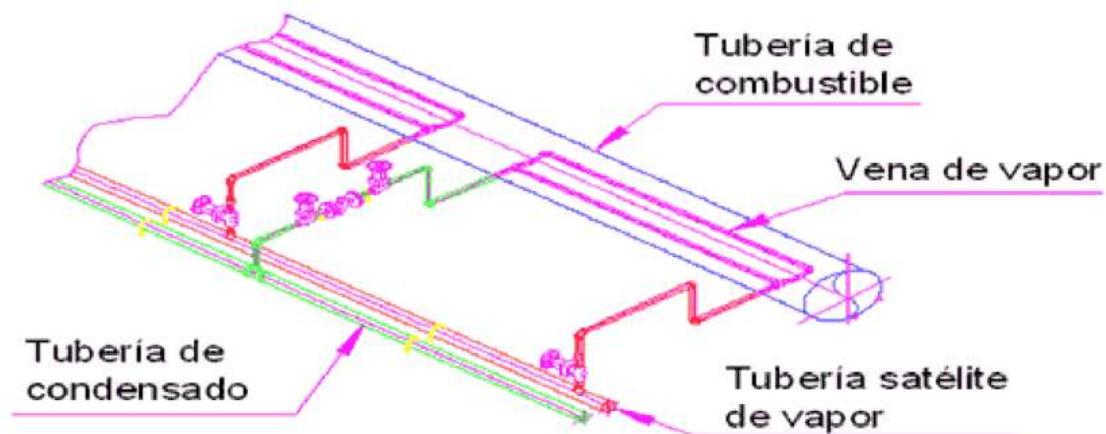
En los países tropicales, como es el caso de Cuba, cuyas condiciones ambientales son adversas para los mecanismos eléctricos, se usa el calentamiento con vapor, a través de pequeños conductos –conocidos como venas de vapor– que se adosan a la tubería central de combustible.

La estructura espacial que conforma un oleoducto, con la utilización de venas de vapor de agua como sistema de calentamiento, se muestra en la Figura 2.

Los componentes que integran estos sistemas son los siguientes:

- Tubería de distribución del combustible o ducto: Es la arteria central del sistema, por medio de la cual es transportado el flujo total del líquido hasta el consumidor.
- Tubería satélite de vapor: encargada de suministrar la totalidad del vapor de calentamiento y ubicada en paralelo respecto a la tubería de distribución de combustible.

Figura 2: Distribución de las venas de vapor de agua en oleoductos para combustibles líquidos viscosos.



- Venas de vapor: finas tuberías encargadas del calentamiento directo de las tuberías de distribución de combustible. Estas salen de la tubería satélite (cabezal central de vapor) y se adosan a la envolvente de la tubería de combustible. Su cantidad, longitud y diámetro es el resultado del cálculo térmico del oleoducto.
- Tuberías de condensado: encargadas de la recolección del condensado formado en el interior de la tubería satélite y las venas de vapor durante el intercambio térmico. Al igual que la tubería satélite de vapor, su disposición es paralela a la tubería de combustible.
- Trampas de vapor: colocadas al final de cada vena de vapor y en los pozos de goteo de la tubería satélite.
- Bombas de impulsión: encargadas del suministro continuo y estable del combustible a los consumidores. Para el transporte de líquidos de alta viscosidad se utilizan, principalmente, bombas de desplazamiento positivo –reciprocantes y rotatorias
- Aislamiento térmico: con las funciones conocidas, pero con algunas peculiaridades por alojarse en su interior las venas de vapor, tal como puede observarse en el anexo.

En términos generales el proceso se puede describir como una tubería central de combustible sobre cuya superficie se adosan finas tuberías, o venas de vapor. Ambos

sistemas, tuberías de combustible y vapor, quedan aislados térmicamente del medio exterior mediante un material aislante. En estas condiciones se establecen los procesos de intercambio térmico que garantizan el calentamiento del combustible hasta la temperatura de operación –aquella que garantiza la viscosidad necesaria para la fluidez del combustible–. Una representación gráfica del sistema se muestra en los Anexos 4 y 5.

Este sistema ofrece como ventaja que permite aplicar el principio de cogeneración, al utilizar el vapor sobrante de algún otro proceso industrial, lo que a su vez también significa su principal desventaja, pues en depósitos distantes de las industrias la utilización del calentamiento por vapor implicaría un consumo global de energía igual o superior al consumo propio de la bomba de combustible. Además, estos sistemas son muy complejos en su instalación, operación y mantenimiento.

### **1.3- Situación actual de la eficiencia energética en el proceso de recepción almacenamiento y entrega de combustible Fuel Oil en Cuba y soluciones aplicadas hasta el momento.**

El mejor argumento para tomar tal decisión de utilizar el Fuel Oil como combustible para procesos industriales constituyó la superioridad calorífica de éste con relación al carbón mineral, ya que el Fuel Oil genera aproximadamente 41 900 kJ/kg, mientras que un buen carbón sólo proporciona 29 300 kJ/kg. [11]. En la actualidad, en Cuba, el Fuel Oil se utiliza fundamentalmente en procesos industriales, en la generación de vapor para grandes cocinas y lavanderías y en la generación eléctrica. Para hacerlo llegar a su destino final es necesario manipularlo desde un medio de transporte a un depósito y viceversa al menos en dos ocasiones. Pero, debido a su viscosidad, el Fuel Oil no puede ser bombeado por bombas centrífugas convencionales, sino por bombas de desplazamiento positivo [2], las cuales presentan un elevado nivel de energía consumida por volumen de combustible bombeado [13].

En el Anexo 6 se presenta una comparación de la viscosidad del Fuel Oil con otros combustibles, en el que se muestra el alto grado de viscosidad del mismo.

La eficiencia energética en el proceso de **RAE** de combustibles en la actualidad se dirige en las direcciones siguientes:

- Sustitución de las bombas actuales por bombas más eficientes.

En este caso se debe tener en cuenta que muchas de las bombas que se utilizan en la actualidad poseen más de 30 años de antigüedad, y algunas incluso sobrepasaban los 50 años, como las que se encontraban en el cargadero de Nicaro. Estas bombas en el mercado internacional presentan un costo muy elevado.

Hasta el momento la variante más extendida es el mantenimiento correctivo y la sustitución del enrollado en caso de avería. Este método si bien representa una solución temporal, representa un riesgo toda vez que ya la bomba no presenta las cualidades de seguridad originales, lo que aumenta la posibilidad de derrame, avería o accidente [16].

- Disminución de la viscosidad de los combustibles pesados mediante su calentamiento.

Este método consiste en calentar el combustible mediante vapor o electricidad para facilitar su desplazamiento a través del sistema de bombas, ductos y válvulas. Tiene también como ventajas que posibilita un mejor asiento de agua e impurezas, así como permite una mayor estabilidad en el gasto del bombeo al evitar la cavitación o aspiraciones en vacío, que es un efecto hidrodinámico que se produce cuando el combustible pasa a gran velocidad por una arista afilada, produciendo una descompresión del fluido debido a la conservación de la constante de Bernoulli. Puede ocurrir que se alcance la presión de vapor del líquido de tal forma que las moléculas que lo componen cambian inmediatamente a estado de vapor, formándose burbujas o, más correctamente, cavidades. Las burbujas formadas viajan a zonas de mayor presión e implosionan (el vapor regresa al estado líquido de manera súbita, «aplastándose» bruscamente las burbujas) produciendo una estela de gas y un arranque de metal de la superficie en la que origina este fenómeno [13].

Estos métodos si bien implican estas ventajas tienen como inconveniente que se mantiene o aumenta el gasto global de energía, ya que para ellos se utilizan portadores energéticos

como el Fuel Oil o el Diésel en el caso del calentamiento con vapor o la energía eléctrica en el caso de que el calentamiento se realice con energía eléctrica.

- Aprovechamiento de la energía potencial gravitatoria en depósitos con diferencia de altura favorable.

Este método es raramente usado, ya que, aunque es funcional prácticamente se utiliza como solución ante las averías en las bombas. No es viable para los combustibles pesados.

- Incorporación de aditivos

Esta técnica es utilizada para disminuir la viscosidad de los combustibles pesados, principalmente el petróleo crudo en el momento de su extracción. Se utiliza en el mismo porque facilita su manipulación y transporte. El cambio en las propiedades físicas del producto no significa su contaminación, pues por lo general, este se destina a las refinerías donde será procesado para extraer sus componentes, o la incorporación del aditivo también posibilita llevar el grado de viscosidad al nivel requerido para su comercialización como combustible con propiedades físicas determinadas. En Cuba el aditivo más utilizado para la disminución de la viscosidad del petróleo es la nafta solvente.

En el caso del Fuel Oil la incorporación de un aditivo no es factible para aumentar la eficiencia energética en su manipulación, pues al cambiar las propiedades físicas registradas en el certificado de calidad para su comercialización, se incurre en una contaminación del producto. Además, este método resultaría bastante costoso desde el punto de vista económico.

#### **1.4- Conclusiones del Capítulo 1:**

- 1- El desarrollo actual de la humanidad tal y como se conoce hoy requiere una gran cantidad de energía para su funcionalidad, lo que entra en contradicción con la disponibilidad actual de las fuentes tradicionales de energía. Esto obliga a dirigir los esfuerzos por aumentar la eficiencia energética en dos direcciones: el uso más

racional de las fuentes tradicionales de energía y el desarrollo del aprovechamiento de las fuentes de energías renovables y las energías alternativas.

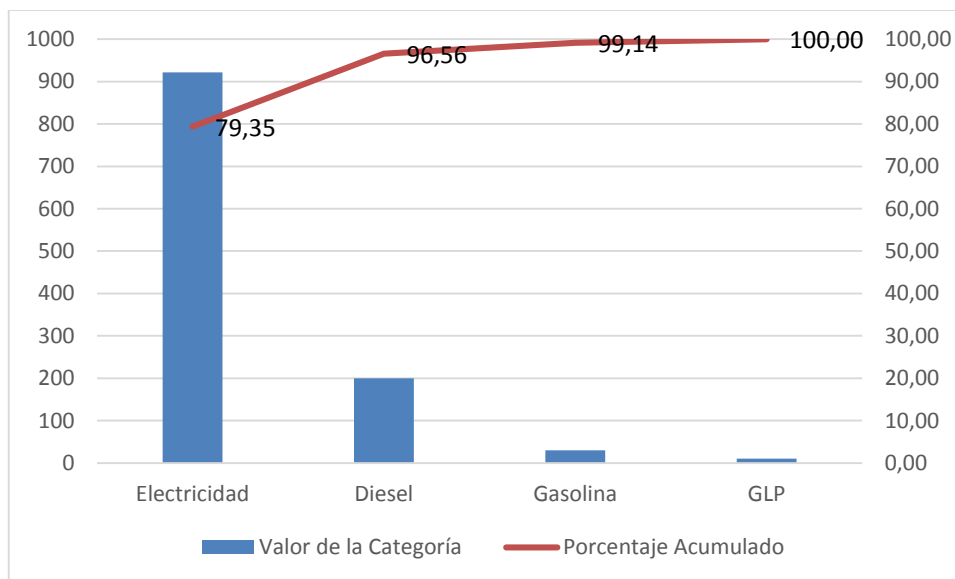
- 2- En los procesos de recepción y almacenamiento de fluidos el elemento principal son las bombas las cuales, independientemente del tipo que sean representan un alto consumo de energía, por lo que constituyen el punto principal del aumento de la eficiencia energética.
- 3- En el caso de los fluidos viscosos el aumento de la eficiencia energética en los procesos de su manipulación implica la disminución de la viscosidad de los mismos, mediante su calentamiento o la incorporación de aditivos reductores.
- 4- En el caso de Cuba la disminución de la viscosidad de los combustibles pesados implica el calentamiento con vapor o con energía eléctrica, lo que si bien implica una disminución de la viscosidad de los mismos mantiene o aumenta el consumo global de portadores energéticos.

## CAPÍTULO 2: Propuesta de soluciones para elevar la eficiencia energética en los sistemas de bombeo del Fuel Oil mediante su calentamiento.

### 2.1- Diagnóstico Energético del Depósito 642 de la Empresa Comercializadora de Combustibles de Holguín

Para conocer el estado de la gestión energética en el depósito 642 de la ECC-H se hizo un diagnóstico del consumo de portadores energéticos utilizados directa e indirectamente en el proceso de comercialización de combustibles. Para ello se consultó el Plan de consumo de energía eléctrica de la empresa y el registro del consumo real durante el segundo semestre del año 2014 y el primer semestre del año 2015. Para el caso de los combustibles Diésel y gasolina se hizo un estudio del registro de consumo de estos en colaboración con el Departamento de Transporte de la entidad. En ese mismo lapso se estudiaron los registros de consumo de GLP según el control de consumo de portadores energéticos del área de la Cocina Comedor. Los resultados obtenidos se exponen en la Figura 3.

*Figura 3: Distribución del consumo de portadores energéticos por su tipo*



En la gráfica presente en la Figura 3 se aprecia que la energía eléctrica es el portador energético que mayor consumo representa en la comercialización de combustibles, con un 79,35 % del consumo total.

Figura 4: Distribución de consumo de energía eléctrica por áreas

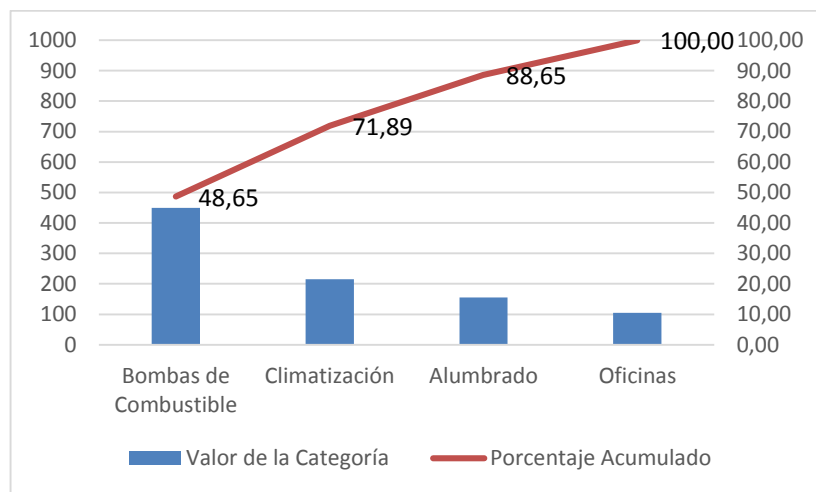
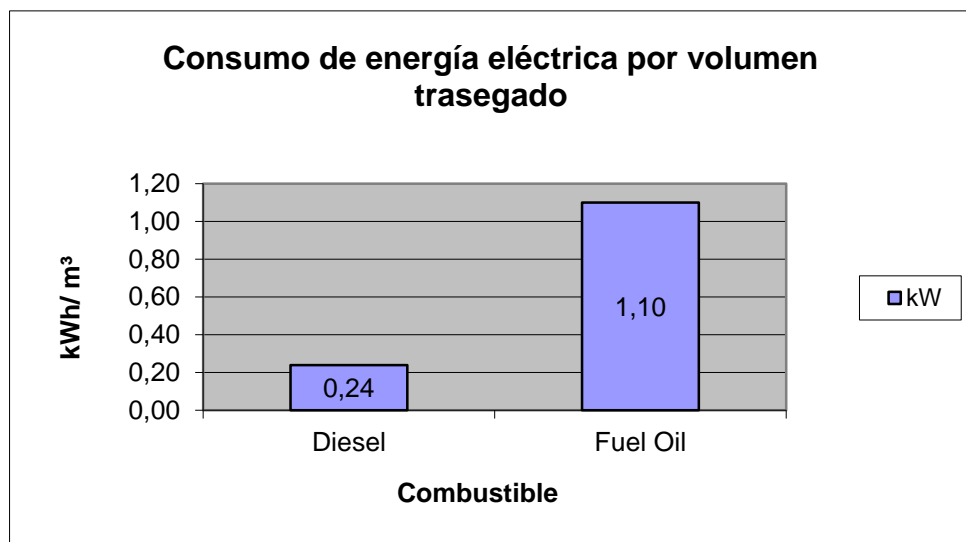


Figura 5: Consumo de energía por volumen trasegado según producto.



Para determinar en qué área y actividad se presenta el mayor consumo de energía eléctrica se utilizó el estudio del flujo de carga en el sistema de suministro eléctrico de la entidad realizado por la Empresa CEDAI en el año 2014 con vistas a una posible remodelación del sistema eléctrico. Además, se hizo un estudio de las características técnicas de los equipos instalados en la actualidad, pues muchos han sido modificados,

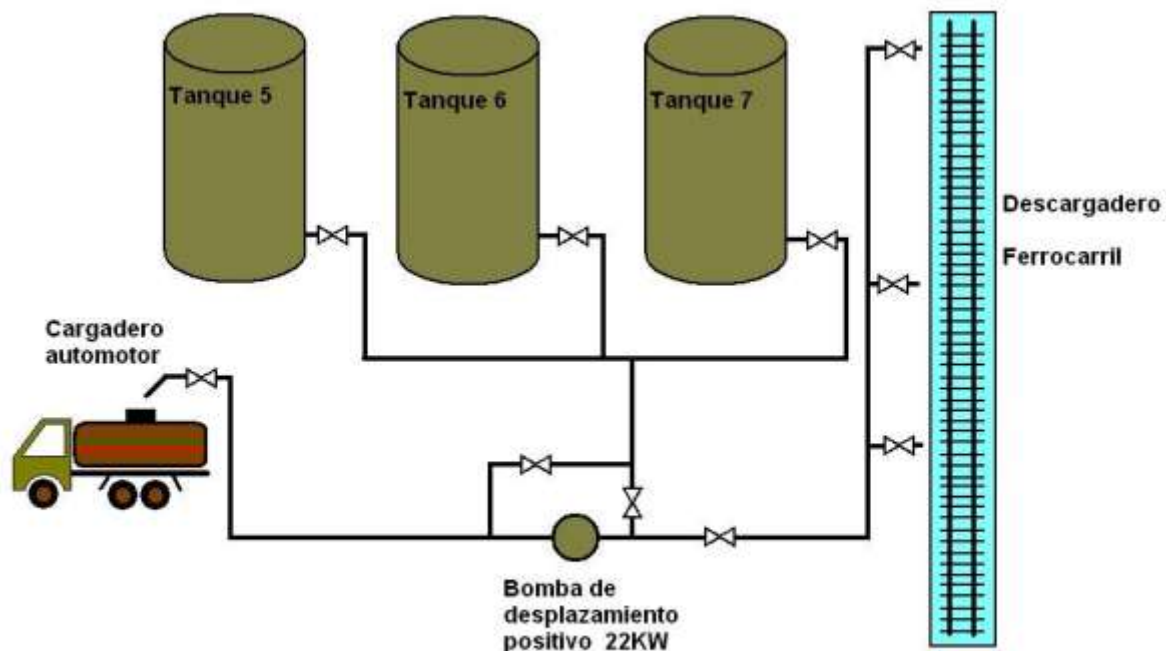
eliminados o sustituidos. Al realizar un desglose del consumo de electricidad por sectores se obtuvieron los resultados que se exponen en la Figura 4.

Dentro de las bombas de combustibles que más se utilizan están la de Diésel y la de Fuel Oil. En la Figura 5 se muestra una comparación de la eficiencia energética de las dos bombas, tomando como referencia la energía eléctrica consumida para bombear 1 m<sup>3</sup> de los respectivos productos.

## 2.2- Descripción del esquema tecnológico del trasiego de Fuel Oil en el Depósito 642 de la ECC-Holguín.

En la Figura 6 se muestra un esquema tecnológico de la instalación.

*Figura 6: Esquema tecnológico del sistema de recepción, almacenamiento y entrega del Fuel Oil*



Este sistema cuenta con tres conductos flexibles (mangueras) de 76 mm para la recepción de combustible por ferrocarril, las cuales están acopladas a un conducto común de 152 mm con una longitud de 24 metros. En su punto medio cuenta con una válvula de cuña de

152 mm que lo conecta con la bomba de combustible. Esta bomba es de fabricación japonesa, cuyos datos y los del motor acoplado, así como una fotografía, se muestran en los Anexos 7 y 8 respectivamente.

Esta bomba cuenta a la salida con un By-Pass acoplado a una válvula de cuña desde la cual parte un conducto de 152 mm con una longitud de 12 metros hacia el tanque de almacenamiento a la entrada del cual se encuentra una válvula de cuña de 152 mm, y otro conducto de 152 mm con una longitud de 32 metros hacia el cargadero automotor, en el cual se encuentra un brazo de carga de 100 mm de diámetro.

### **2.3- Propuesta de solución para aumentar la eficiencia energética en el trasiego del combustible Fuel Oil**

Los principales métodos para el calentamiento de combustibles utilizados en la actualidad son el calentamiento con vapor y con electricidad. Debido a su complejidad el primero es más factible a utilizar en grandes depósitos (con capacidad superior a los 2 000 m<sup>3</sup>) que por lo general quedan ubicados cercanos a grandes industrias con capacidad de generar grandes cantidades de vapor. Ejemplo de ello en la provincia de Holguín lo constituyen los depósitos de petróleo de la CTE Felton y de la Base de Combustibles de la industria niquelífera en Moa.

Para depósitos de pequeñas dimensiones como los presentes en el Depósito 642 de la ECC-Holguín la literatura especializada aconseja emplear el calentamiento con energía eléctrica [30].

Para determinar cómo se comportaría el consumo de energía eléctrica se hará el cálculo siguiente:

Se partirá de la ecuación

$$Q = m \times cp \times \Delta T \quad [31]$$

Donde m es la masa, cp es el calor específico y  $\Delta T$  es la variación de temperatura. Al atender a las características tecnológicas del depósito, se tomó como referencia un tanque de almacenamiento de Fuel Oil con capacidad para 60 000 lts [30], lo que representó una masa de 57 000 kg. Se quiso elevar la temperatura del combustible a 50 °C (Temperatura

suficiente para ofrecer buena fluidez, y a la vez por debajo del punto de inflamación. Véase Anexo 2), desde la temperatura ambiente promedio que es de 27 °C, por lo que  $\Delta T$  es igual a 23 °C. El calor específico del Fuel Oil es 1,7 kJ/kg K [32]. Para determinar la cantidad de calor a suministrar se sustituyen los datos en la ecuación:

$$Q = m \times cp \times \Delta T$$

$$Q = 57000\text{kg} \times 1,7\text{kJ/kgK} \times 23^\circ\text{C}$$

$$Q = 2197236\text{kJ}$$

Para elevar la temperatura de 57 000 kg de Fuel Oil en 23 °C, se necesitaron suministrar una cantidad de calor equivalente a 2 197 236 kJ. Para obtener esta cantidad de calor utilizando la energía eléctrica en las 8 horas como duración promedio de una jornada de trabajo, se obtiene que la potencia necesaria es de 76,9 kW.

A partir de la potencia se puede determinar el consumo del sistema eléctrico en 76,9 kWh, por lo que en 8 horas de trabajo se consumirán 614 kWh. En la introducción se planteó que el consumo de energía eléctrica por volumen trasegado para el Fuel Oil en las condiciones actuales es de 1,10 kWh por metro cúbico. Si se calienta el combustible a 50 °C este valor se reduciría a la mitad, o sea 0,55 kWh. Para determinar el consumo de energía eléctrica en el calentamiento se dividirá el consumo ascendente a 614 kWh entre la capacidad del depósito equivalente a 60 m<sup>3</sup>, lo que da como resultado 10,2 kWh por metro cúbico. Cuando se suma al consumo de la bomba se obtiene el resultado de 10,75 kWh por metro cúbico. En la Figura 7 se muestra una comparación del consumo de energía eléctrica por volumen trasegado entre el combustible a temperatura ambiente y el combustible calentado a 50 °C, donde se puede apreciar el elevado valor del segundo respecto al primero.

Se observa además que aunque disminuía el consumo de energía eléctrica de la bomba por concepto de disminución del tiempo de trabajo, aumentaba el consumo global por la adición del consumo de energía eléctrica en el calentamiento. Para determinar la influencia del aumento de la temperatura en el consumo de la bomba, en el consumo por calentamiento y en el consumo global se hizo una comparación entre estas tres variables, cuyos resultados se muestran en la Figura 8.

Figura 7: Consumo de energía por volumen trasegado con calentamiento del combustible utilizando energía eléctrica

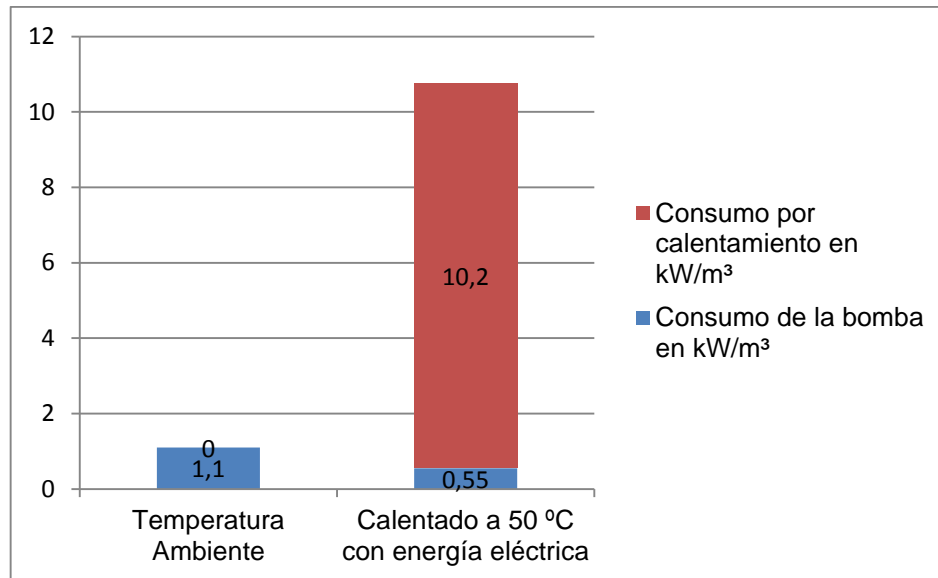
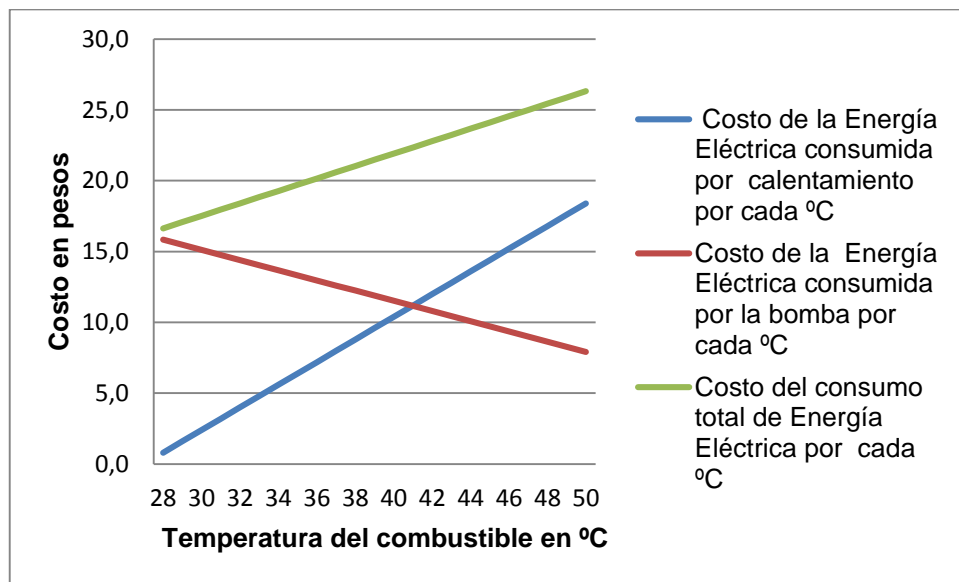


Figura 8: Comparación entre los costos de la energía eléctrica consumida por calentamiento, por la bomba y consumo global

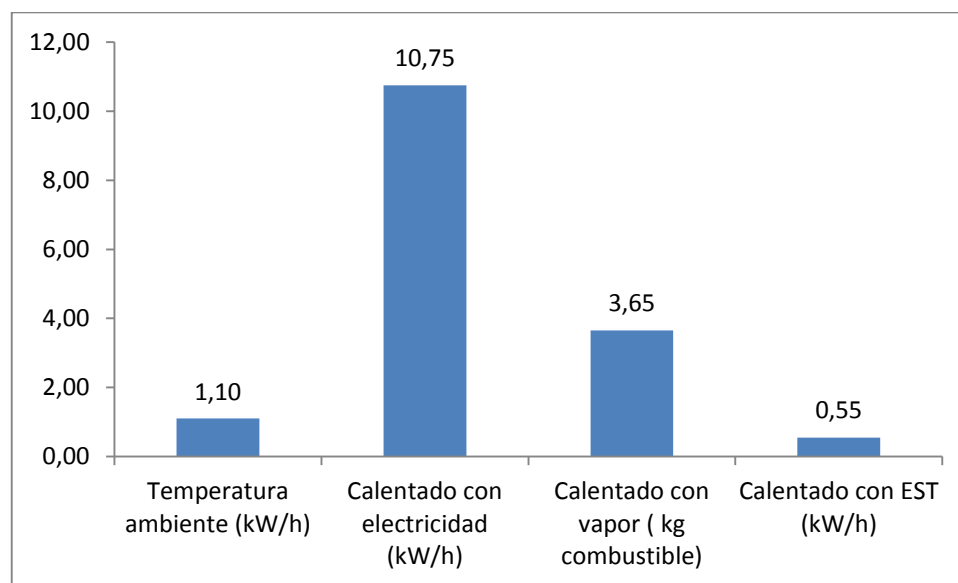


Se puede llegar a la conclusión de que el calentamiento con energía eléctrica no aumenta la eficiencia energética en el trasiego de combustible Fuel Oil, porque, aunque disminuye el consumo de la bomba por concepto de disminución del tiempo de trabajo, aumenta el consumo global por la adición del consumo de energía eléctrica por concepto de

calentamiento. Otro modo que se emplea para el calentamiento de los combustibles oscuros es el calentamiento con vapor, para lo cual se utilizan calderas que consumen combustible Diésel o Fuel Oil, en dependencia de la tecnología. Para determinar la cantidad de combustible que se necesitaría para elevar la temperatura del Fuel Oil a 50 °C, se tomará como referencia que 1 kWh equivale a 340 gramos de combustible, por tanto, según cálculos anteriores harían falta 217 L de combustible.

En la Figura 9 se muestra una comparación del consumo de energía eléctrica y combustible fósil por volumen trasegado entre el combustible a temperatura ambiente y el combustible calentado a 50 °C con energía eléctrica, con combustible fósil y con Energía Solar Térmica respectivamente, donde se puede apreciar con cual método se logra mayor eficiencia energética.

*Figura 9: Consumo de energía según portador energético empleado para calentar el combustible*



Previamente se determinó que la cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de 60 m<sup>3</sup> de Fuel Oil hasta los 50 °C equivale a 2 197 236 kJ, así como que para realizar este trabajo aprovechando las 8 horas de incidencia efectiva de la radiación solar la potencia necesaria será de 76,9 kW. Al analizar este tiempo se debe tener en cuenta que el Fuel Oil tiene la propiedad de mantener su temperatura por bastante tiempo, aún sin utilizar aislamiento térmico [19]

Para determinar el área necesaria para lograr captar la Energía Solar Térmica suficiente para calentar el combustible se tomó en cuenta que el promedio de energía solar recibida en Cuba es de 5 kW/m<sup>2</sup> [6]. Se tomó además como norma que los calentadores solares tienen como promedio una eficiencia de un 20 %, lo que permite aprovechar 1 kW/m<sup>2</sup>, [25]. Se determinó que para obtener 2 197 236 kJ en las 8 horas en que es más factible aprovechar la radiación solar incidente, se necesitaría una potencia de 76,9 kW, lo que dividido entre la potencia que se puede obtener por cada metro cuadrado permite obtener el resultado de que es necesaria un área de 76,9 m<sup>2</sup>.

Al realizar un análisis de las instalaciones de la entidad se determinó que se puede contar para la instalación de colectores solares con un área idónea de 100 m<sup>2</sup> [30], suficientes según cálculos anteriores para elevar la temperatura del Fuel Oil a 50 °C.

Antes de proponer un diseño de un captador solar se debe tener en cuenta que generalmente un sistema de Energía Solar Térmica, está constituido por varios subsistemas conectados entre sí. Sin embargo, hay ocasiones en que un mismo elemento físicamente independiente realiza varias funciones dentro del sistema solar. Estos distintos subsistemas son:

- El sistema de captación: Los colectores solares que se encargan de captar la energía radiante del sol y transmitirla al agua aumentando su temperatura.
- El sistema de acumulación: Es un depósito para acumular el agua caliente generada para su uso posterior.
- El sistema hidráulico: Bombas y tuberías por donde circula el fluido de trabajo.
- El sistema de intercambio: En caso de que el fluido que circula por los paneles solares no sea el mismo que el que utiliza el usuario en su aprovechamiento.
- El sistema de energía auxiliar: Hay ocasiones que la viabilidad económica de la instalación solar exige que no se pueda satisfacer la demanda energética en todo momento, máxime cuando la energía producida por la instalación depende de las condiciones climatológicas o se consume más cantidad de agua caliente de la prevista, es por esto que en ocasiones se dispone en la misma instalación de un sistema de

producción de energía auxiliar que puede ser a través de electricidad o Gas Licuado de Petróleo.

El sistema de control: Depende de la forma de circulación del agua entre colector y tanque, existen dos sistemas:

- **Sistemas Termosifónico:** El agua circula de forma natural entre el colector y el tanque debido a la diferencia de densidades entre el agua fría y la caliente.

Este hecho hace que en un circuito cerrado el agua fría que se encuentre en la parte alta del mismo tienda a ser sustituida por otra más caliente que se encuentre en la parte baja.

- **Sistema Forzado:** La circulación del agua entre el colector y el tanque se ejecuta mediante bombas utilizándose un dispositivo de mayores dimensiones para varios colectores. Se utiliza para servicio de aguas calientes múltiples en los que se requieran grandes volúmenes de agua [4].

Aunque los sistemas para el aprovechamiento de la energía solar difieren en sus equipos componentes, hay un elemento integrante básico, el llamado colector solar, que es común a todas las instalaciones y es el elemento encargado de recibir radiación y transformarla en energía térmica.

Para la construcción del sistema que se propone se decidió optar por la variante de colectores de tubo vacío ya que se encuentran entre los tipos de colectores solares más eficientes y económicamente asequibles. Poseen un absorbedor para capturar la radiación del Sol que está sellada al vacío dentro de un tubo. Las pérdidas térmicas de estos sistemas son muy bajas incluso en climas fríos [4].

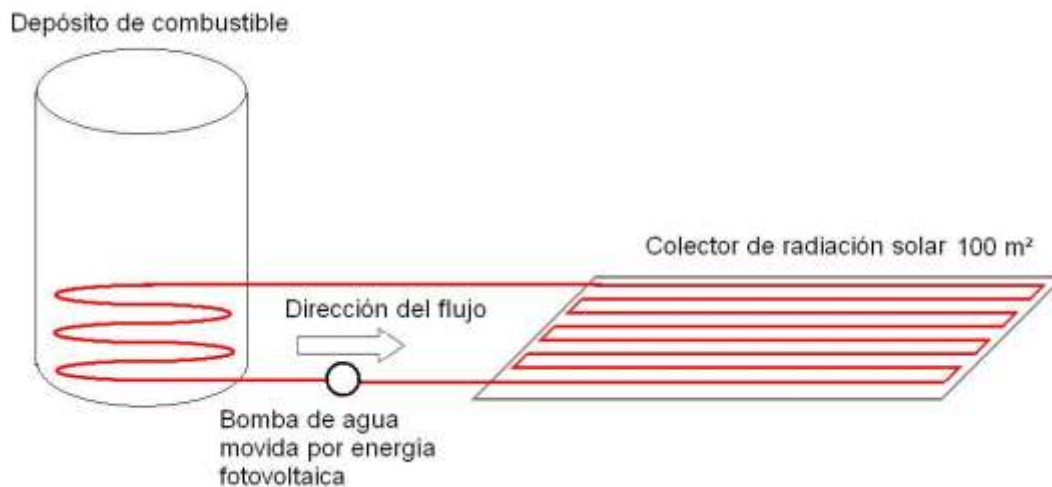
Para el diseño del colector solar se tuvieron en cuenta los elementos siguientes:

- El depósito en el que se encuentra el líquido a calentar se debe encontrar a nivel del suelo y su volumen es variable en función de la comercialización, por lo que no es factible construir un calentador con termosifón [7].

- El líquido a calentar, en este caso el combustible Fuel Oil es muy viscoso, lo que dificulta su paso por los conductos de poco diámetro presentes en la placa colectora [26].

Por tanto, se decidió diseñar un sistema indirecto con intercambiador integrado en el tanque de almacenamiento (véase Anexo 3). Este sistema consiste en que por el captador solar circulará otro líquido en vez del combustible [33]. En este caso se utilizó agua, al tener en cuenta sus características termodinámicas. El diseño que se propone es el que se presenta en la Figura 10.

*Figura 10: Propuesta de diseño del colector solar.*



El principio de funcionamiento es que la bomba de agua que se alimenta con energía eléctrica provista por paneles fotovoltaicos cumple doble objetivo al no utilizar energía generada con combustibles fósiles y trabajar sólo cuando exista incidencia de la radiación solar para evitar enfriamiento accidental del combustible que impulsa el agua con un gasto de  $0,0005 \text{ m}^3/\text{seg}$ , por un serpentín adosado a la placa metálica del colector solar de forma que adquiera una elevada cantidad de calor que será transferida al combustible mediante intercambiador integrado en el tanque de almacenamiento [31]. La temperatura del agua al salir del colector será la suma de su temperatura inicial más la variación de temperatura que está dada por la ecuación siguiente [9]:

$$\Delta T = \frac{Q}{m \times cp}$$

$$\Delta T = \frac{5,02kJ}{0,5kg \times 4,19kJ/kgK}$$

$$\Delta T = 2,4^\circ C$$

El resultado se aplica para 1m<sup>2</sup>, luego si el colector tiene una dimensión de 100 m<sup>2</sup> el resultado se multiplica por 100 y se obtiene una  $T$  de 240 °C. Al suponer que el colector a construir tenga una eficiencia de solo un 30 % [25], esta temperatura tendría el valor de 80 °C, que sumado a la temperatura inicial del agua de 27 °C, se obtendría una temperatura final del agua a la salida del colector de 107 °C.

Para calcular la cantidad de calor que le transferirá el agua calentada al combustible se realizará de la forma siguiente:

Se utilizó la fórmula,

$$Q = m \times cp \times \Delta T ,$$

Se tomó como  $\Delta T$ , la diferencia entre la temperatura del Fuel Oil y la temperatura del agua calentada. Por tanto:

$$Q = m \times cp \times \Delta T$$

$$Q = 0,05kg \times 4,19kJ/kgK \times 80^\circ C$$

$$Q = 167kJ$$

Este dato es para un segundo, al tener en cuenta que se calcula el gasto del sistema de circulación de agua a 0,5 L/s. Se toma entonces el tiempo para el cual se calcula la utilización de la Energía Solar Térmica, que es de 28 800 seg, y se multiplica por la cantidad de calor aportada en un segundo que es de 167 kJ, y se obtiene que en ocho horas de empleo de trabajo del calentador solar se aportarán a una masa de 57 000 kg de Fuel Oil un total de 4 826 880 kJ. Al calcular la variación de temperatura obtenida con esta cantidad de calor se obtuvo:

$$\Delta T = \frac{Q}{m \times cp}$$

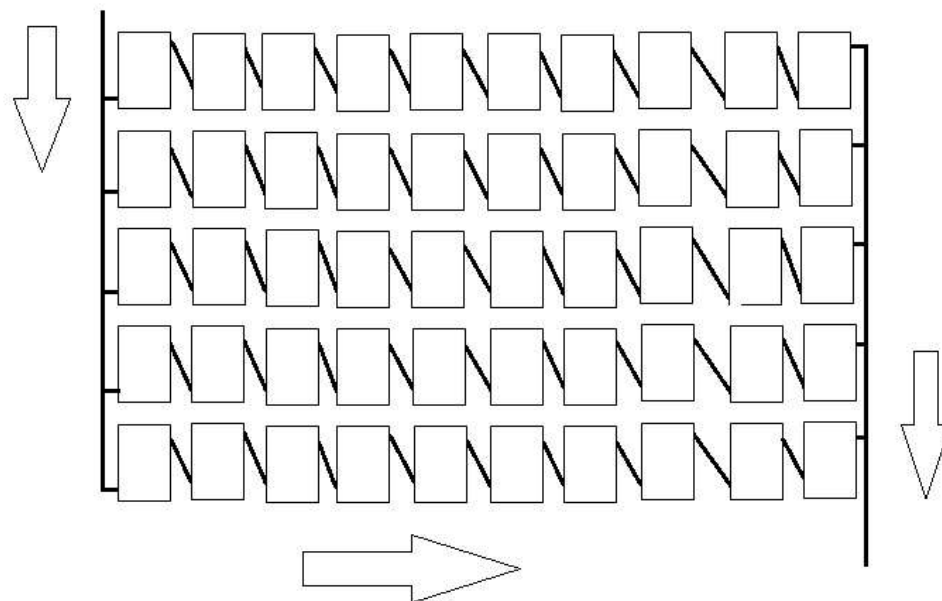
$$\Delta T = \frac{4826880kJ}{57000kg \times 1,7kJ/kgK}$$

$$\Delta T = 50^{\circ}C$$

Se suma la variación de temperatura igual a 50 °C, a la temperatura ambiente de 27 °C, a la que se calcula esté el combustible y se obtiene una temperatura de 77 °C, por encima de la temperatura idónea para la manipulación del Fuel Oil.

Para lograr una menor complejidad en el montaje y mantenimiento se propone que, en vez de construir un único captador de 100 m<sup>2</sup> se construyan 50 unidades de 2 m<sup>2</sup>, conectándolos en serie y en paralelo para lograr una transferencia de calor más eficaz. Esto se debe a que se corre el riesgo de que si se instalan todos los captadores solares en series llegará el momento en que la temperatura del agua sea igual al del captador. De esta forma, al no existir gradiente de temperatura no ocurrirá transferencia de calor, por lo que disminuirá la eficiencia del sistema [9]. Se propone que las conexiones sean de 5 bloques en paralelo, y cada bloque consista en 10 unidades en serie, como se muestra en la Figura 11. Las flechas indican la dirección de circulación de agua.

*Figura 11: Propuesta de distribución de los captadores.*



Otro aspecto a tener en cuenta en este diseño es la eficiencia de la transferencia de calor entre el serpentín y el combustible. La transmisión de calor del serpentín hacia todo el contenido de Fuel Oil del tanque se realizará mediante la convección. La transferencia de calor por convección, además de su dependencia de las propiedades térmicas del fluido (conductividad térmica, calor específico, densidad), tendrá cierta dependencia de la viscosidad del fluido y de otras características del sistema. Esto se debe a que la viscosidad influye el perfil de velocidad y, de manera correspondiente, la rapidez de transferencia de energía. De esta manera la rapidez de transferencia de calor está relacionada con la diferencia de temperatura total entre la pared y el fluido, y el área superficial. A la cantidad  $h$  se le llama el coeficiente de transferencia de calor por convección, y la siguiente ecuación que se conoce con el nombre de Ley de Enfriamiento de Newton quien la define

$$q = hA(T_w - T_\omega) [9].$$

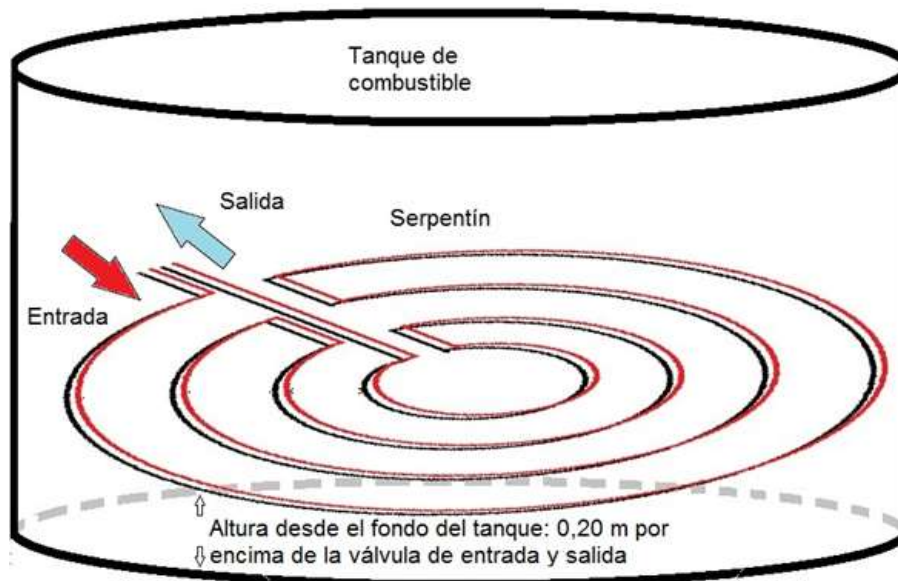
Se entiende entonces que para optimizar la transferencia de calor del serpentín al líquido aumentar la superficie de transferencia. En este caso se propone disminuir el diámetro del serpentín y a su vez aumentar su longitud para lograr que el líquido que fluye por dentro de este le pueda transferir la mayor cantidad de calor posible.

Para hacer un cálculo orientativo se tomará como ejemplo un tramo de serpentín de 1 m de longitud y 12,7 mm de diámetro. El volumen contenido dentro del mismo equivale a 0,126 L. Se podría entonces utilizar para aumentar la superficie de transferencia dos secciones de 9,0 mm de diámetro. Para un metro de longitud se obtendría una superficie total de 0,5 m<sup>2</sup>, mientras que para una sección de 1 m de longitud y 12,7 mm se obtendría una superficie de transferencia de 0,3 m<sup>2</sup>. Por tanto, utilizar dos secciones de menor diámetro que para una longitud de 1 m tenga el mismo volumen interior que una sección de 12,7 mm ofrece una superficie de transferencia de calor superior en un 60%.

Teniendo en cuenta el principio anteriormente planteado, así como las dimensiones del tanque y la ubicación de sus principales elementos, se propone la instalación de un serpentín compuesto por dos conductos de cobre de 10 mm de diámetros. En este caso se seleccionó el cobre por tener un coeficiente de conductividad térmica de 300 W/(mK)

[20], bastante elevado en relación con los demás materiales disponibles. El objetivo de los dos conductos es el de aumentar la superficie de transferencia, tal como se planteó en el párrafo anterior. El diseño que se propone para el serpentín es el que se muestra en la Figura 12:

Figura 12: Serpentín en el que se realiza el intercambio térmico en el tanque de combustible.



En la figura se resaltan en colores negro y rojo los dos conductos paralelos por los que circula el agua caliente, pues como se expuso anteriormente, para un volumen dado de líquido, se logra más superficie de contacto mediante la instalación de dos conductos paralelos de menor diámetro manteniendo el mismo volumen por unidad de longitud, que el utilizado en la variante de conducto único.

Para calcular la cantidad de calor transferida del serpentín al combustible se determinará primero el flujo de calor según la siguiente ecuación [20]:

$$q = \frac{2\pi k(t_i - t_o)}{2,3 \log(D_o / D_i)}$$

Donde  $k$  es el coeficiente de conductividad térmica del material de construcción del serpentín, en este caso cobre cuyo valor es de  $300 \text{ W}/(\text{K}\cdot\text{m})$ ,  $t_i$  es la temperatura de la

superficie interna del serpentín, que en este caso será la temperatura del agua calentada en el colector solar, que según cálculos anteriores alcanza los 107 °C, mientras  $t_o$  es la temperatura de la superficie externa del serpentín, que en este caso será la del combustible, o sea 27 °C.  $D_o$  es el diámetro exterior de 10 mm y  $D_i$  el diámetro interior del serpentín, en este caso 9 mm. Se sustituyen los valores en la ecuación:

$$q = \frac{2\pi \cdot 300 \cdot (107 - 27)}{2,3 \log \frac{0,01}{0,009}}$$

$$q = \frac{150720}{0,11}$$

$$q = 1370 \text{ kJ}/(\text{h}\cdot\text{m})$$

Entonces se obtiene que en una hora de trabajo por cada metro lineal de longitud del serpentín se logra un flujo de calor equivalente a 0,38 kW. Según cálculos anteriores se determinó que la cantidad de calor a transferir al combustible para elevar su temperatura equivale a 2 197 236 kJ y el tiempo de trabajo se determinó previamente que eran ocho horas. Se necesita entonces que en cada hora se transfiera una cantidad de calor equivalente a 274 654 kJ, para lo cual será necesario que el serpentín tenga una longitud mínima de 200 metros.

## **2.4- Valoración económica y ambiental de la solución propuesta.**

### **2.4.1- Determinación del ahorro por concepto de disminución de consumo de energía eléctrica.**

Para realizar el análisis del beneficio económico para la empresa del uso de la energía solar se tomaron como referencia los datos siguientes:

- Consumo nominal de la bomba de combustible Fuel Oil: 22 kWh.
- Tiempo de trabajo de la bomba para bombear 60 000 Litros de Fuel Oil a temperatura ambiente: 3 hrs.
- Tiempo estimado de trabajo de la bomba para bombear 60 000 Litros de Fuel Oil a 50°C: 1,5 hrs.

- Costo del kWh: 0.24 CUC.

Se confeccionó la Tabla 1, con los volúmenes de Fuel Oil vendidos por meses en el año 2014, se calculó el consumo de la bomba de Fuel Oil, el costo de la energía consumida al mes en CUC, es el mostrado, así como la cantidad de combustible necesaria para generar la energía eléctrica consumida asumiendo que para generar un kWh se necesitan 360 g de combustible [18]. Se obtuvieron los siguientes resultados que se muestran en la Tabla 2.1

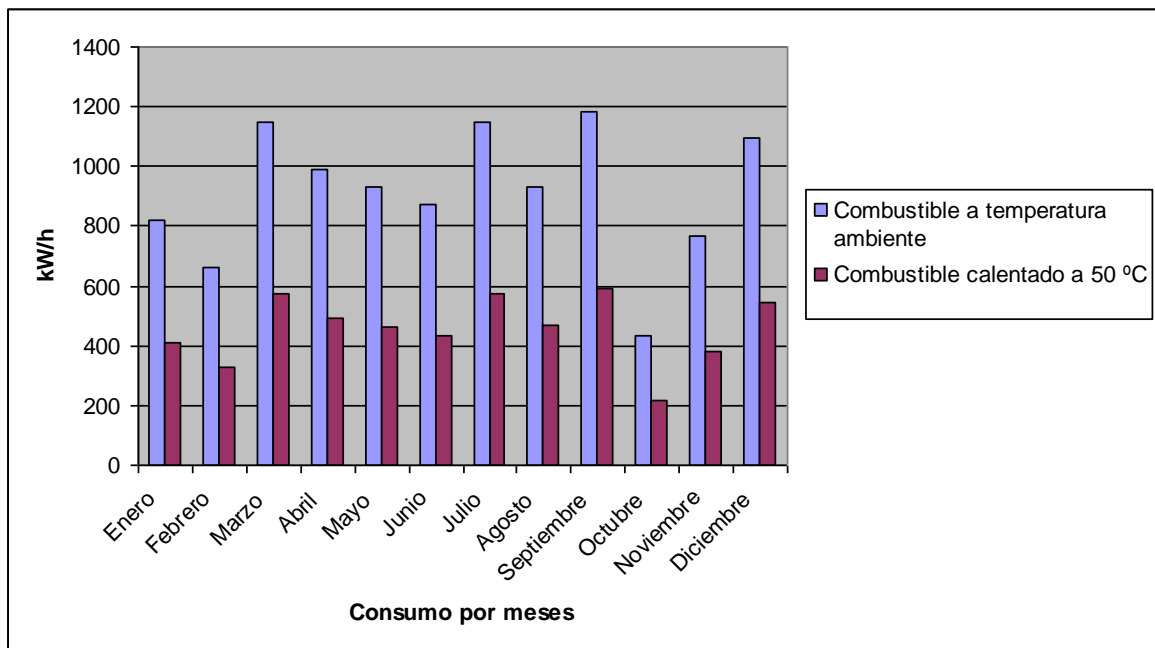
*Tabla 2.1 Volúmenes de Fuel Oil vendidos por meses en el año 2014.*

<b>Mes</b>	<b>Volumen (Lts)</b>	<b>Consumo (kWh)</b>	<b>Costo (CUC)</b>	<b>Combustible (kg)</b>
<b>Enero</b>	913618	822	197	296
<b>Febrero</b>	732545	659	158	237
<b>Marzo</b>	1276870	1149	276	414
<b>Abril</b>	1099691	990	238	356
<b>Mayo</b>	1034256	931	223	335
<b>Junio</b>	969660	873	209	314
<b>Julio</b>	1278656	1151	276	414
<b>Agosto</b>	1034985	931	224	335
<b>Septiembre</b>	1317539	1186	285	427
<b>Octubre</b>	483173	435	104	157
<b>Noviembre</b>	851598	766	184	276
<b>Diciembre</b>	1214895	1093	262	394
<b>Total Anual</b>	<b>12207486</b>	<b>10987</b>	<b>2637</b>	<b>3955</b>

Como se puede observar, en un mes como promedio, para bombear el combustible a temperatura ambiente se consumen 916 kWh, con un costo ascendente a 220 CUC. Si el combustible es calentado a una temperatura igual o superior a 50 °C disminuiría su viscosidad en un 50% o más. Por la ley de Poiseuille, el gasto sería el doble lo que implica que la bomba tendrá que trabajar la mitad del tiempo [14]. Entonces el consumo de energía eléctrica consumida se reduciría a la mitad y como consecuencia se reduciría a la

mitad el importe monetario de la misma, lo que se traduce que al año se ahorrarían \$ 1 318,00. En la Figura 13 se muestra una comparación entre el consumo de energía cuando el combustible se encuentra a temperatura ambiente y cuando está calentado a 50 °C.

*Figura 13: Comparación entre el consumo de energía cuando el combustible se encuentra a temperatura ambiente y cuando está calentado a 50 °C.*



Obsérvese que el consumo de energía eléctrica disminuye sensiblemente en dependencia de la temperatura del combustible. Se demuestra así el beneficio económico para la empresa.

#### **2.4.2- Determinación de la Rentabilidad Financiera**

Para determinar la rentabilidad financiera de la propuesta de aumentar la eficiencia energética en el trasiego de Fuel Oil mediante su calentamiento con Energía Solar Térmica se aplicarán los métodos de Periodo Simple de Recuperación, Valor Presente Neto y el de Tasa Interna de Retorno.

##### **-Periodo Simple de Recuperación**

Este método consiste en determinar el tiempo simple (meses, años, etc.) que tarda un inversionista para recuperar el capital invertido, ya sea por los ingresos que produce el

proyecto o por los beneficios resultantes de aplicar alguna medida de ahorro de energía (ahorros en la facturación eléctrica). El número de meses o años en que se amortiza la inversión que requiere la aplicación de la medida recibe el nombre de período simple de recuperación.

Se consideran todos los costos en términos nominales y no se considera el valor del dinero en el tiempo. El criterio de aceptación del proyecto lo establece el inversionista definiendo el período máximo en que debe de recuperarse la inversión. El período simple de recuperación se calcula como:

$$\text{Periodo de Recuperación} = \frac{\text{Inversión}}{\text{Ahorros Anuales}}$$

Para determinar el valor de la inversión se tendrán en cuenta los siguientes datos que se muestran en la Tabla 2.2:

*Tabla 2.2 Desglose de los costos del proyecto. (Fuente: elaborada por el autor)*

Componente	Costo unitario	Costo total
Colector solar de tubos al vacío	\$ 28,00 x m <sup>2</sup> [5]	\$ 2 800,00 (para 100 m <sup>2</sup> )
Bomba de agua	\$ 50,00	\$ 50,00
Módulo fotovoltaico	\$ 4,12 x Wp [34]	\$ 1 452,00 (para la alimentación de la bomba de agua)
Conductos	\$ 1,10 x m	\$ 165,00 (para la interconexión del sistema)
Tuberías de cobre 10 mm	\$ 0,45 x m	\$ 90,00 (para la construcción del serpentín)
Elementos para la estructura		\$ 1 800, 00 (precio general estimado)
Mano de obra	\$ 500,00 salario promedio por trabajador	\$ 2 500,00 (para 5 trabajadores: soldador, pailero, plomero, ayudante general y jefe de obra)
Costo total		\$ 9 087,00 (se determinarán \$ 10 000,00 para dejar un

	margen para gastos adicionales
--	--------------------------------

Tomando la ecuación:

$$\text{Periodo de Recuperación} = \frac{\text{Inversión}}{\text{Ahorros Anuales}}$$

$$\text{Periodo de Recuperación} = \frac{\$10\,000,00}{1\,318,00}$$

$$\text{Periodo de Recuperación} = 7,5 \text{ años}$$

### **-Valor Presente Neto (VPN)**

Consiste en traer a valor presente todos los componentes del flujo de efectivo, mediante una tasa de interés, durante el período de análisis de un proyecto dado; la tasa de actualización debe ser superior al costo de capital, a fin de satisfacer el interés del inversionista.

El VPN representa la magnitud absoluta en que los ingresos equivalentes de un flujo de efectivo superan o son superados por los egresos equivalentes de dicho flujo. Es decir, si el valor presente neto del flujo de efectivo es positivo, significa que los ingresos son mayores que los costos y que el rendimiento que se espera obtener del proyecto que demandó la inversión es mayor que el rendimiento mínimo establecido por la empresa o el inversionista. En tal caso el proyecto es factible de llevarse a cabo.

Para usar esta técnica en la evaluación, los ingresos o beneficios deben definirse como flujos positivos de dinero y los egresos o desembolsos como flujos negativos.

$$VPN = \sum_{i=0}^n \frac{\text{Valores}_i}{(1 + \text{tasa})^i}$$

$$VPN = VP_{\text{beneficios}} - VP_{\text{egresos}}$$

Donde:

$n$ : número de intervalos de tiempo sobre los cuales se analiza la inversión. Su valor puede estar definido por el tiempo de vida del equipo (vida útil).

Valores : representan los flujos de efectivo.

tasa : tasa de actualización establecida por el inversionista.

Para este caso se definió que el número de intervalo de tiempo sobre los cuales se analiza la inversión va a estar definido por el tiempo vida útil del equipo, que en este caso será de 20 años. Anteriormente se determinó que con la solución propuesta al año se ahorran \$ 1 318,00, por tanto se determinó que los beneficios ascenderán durante el tiempo en que se analiza la inversión a \$ 26 360,00. Sustituimos los valores en la ecuación de cálculo del VPN:

$$VPN = VP_{beneficios} - VP_{egresos}$$

$$VPN = \$26360,00 - \$10000,00$$

$$VPN = \$16360,00$$

Como se puede apreciar, el VPN de la utilización de la Energía Solar Térmica para aumentar la eficiencia energética en el trasiego de Fuel Oil es positivo, por lo que el proyecto es factible de llevarse a cabo

### **-Tasa Interna de Retorno (TIR)**

La tasa interna de retorno (TIR) es un índice de rentabilidad ampliamente aceptado. Se define como la tasa de interés “ $i$ ” que reduce a cero el valor presente del flujo de efectivo, es decir, de una serie de ingresos y egresos.

Por lo general, este cálculo se hace por un método de aproximaciones. Se suponen dos o tres tasas de interés, se calculan los valores presentes o flujos de efectivo anuales uniformes equivalentes y se encuentra la tasa de rendimiento por interpolación. Se hace necesario aclarar que la TIR no se puede calcular si se tiene un proyecto de inversión con

un flujo de efectivo formado en su totalidad por costos, o bien, por ingresos, por lo que no es aplicable a la solución propuesta, pues esta está compuesta totalmente por costos

### 2.4.3- Evaluación de los costos exergo-económicos

- Estimación del flujo de Fuel. (Recurso externo invertido)

Se tomará como referencia el valor de la radiación solar incidente equivalente a 5 kW.

-Estimación de las irreversibilidades totales. (L + D)

Para estimar las irreversibilidades totales se calculará la capacidad máxima de convertir el calor de radiación  $Q_R$  en trabajo útil, en este caso en calor cedido al agua contenida en el sistema. Se tomará como referencia un calentador solar, con un volumen de agua de 200 Lts y un captador de radiación solar de 2 m<sup>2</sup> que calienta el volumen de agua a una temperatura de 100 °C en 8 horas de trabajo [12].

Para calcular el calor cedido al agua utilizamos la siguiente ecuación [31]:

$$Q = m \times cp \times \Delta T$$

$$Q = 200kg \times 4,19kJ / kgK \times 63^\circ C$$

$$Q = 52794kJ$$

Dividimos la cantidad de calor entre el tiempo de trabajo (8 h = 28800 s) y se obtiene una potencia o capacidad de trabajo útil de 2,2 kW.

Luego

$$(L + D) = F - P$$

$$(L + D) = 10 \text{ kW} - 2,2 \text{ kW} \text{ (El producto es el trabajo útil transferido al líquido)}$$

$$(L + D) = 7,8 \text{ kW}$$

-Estimación de la Eficiencia exergética.

$$\eta_b = P/F.$$

$$\eta_b = 2,2 \text{ kW} / 10 \text{ kW}$$

$$\eta_b = 0,22$$

$$D_b = 22\%$$

-Estimación del costo exergetico unitario.

$$K_b = 1 / D_b$$

$$K_b = 1 / 0,22.$$

$$K_b = 4,5$$

-Interpretación del resultado.

Quiere decir que se requieren 4,5 unidades de exergía en el Fuel para producir una unidad en el Producto o lo que es lo mismo, que el producto es exergeticamente hablando, 4,5 veces más caro que el Fuel.

Para determinar el costo económico se tomarán los siguientes supuestos que el colector solar solo tendrá el costo de fabricación. Aunque el portador energético, en este caso la radiación solar incidente es completamente gratuita y se puede contar con un suministro disponible todo el año considerándose prácticamente inagotable [29], en los colectores solares solo es aprovechable como promedio un 30% (25) de la misma por las pérdidas en su interacción con el medio. Por tanto se hace necesario realizar el análisis exergoeconómico para determinar la factibilidad económica de la implementación de estos sistemas en comparación con otros sistemas de calentamiento de combustibles mediante el empleo de portadores energéticos convencionales. Por las características de estos sistemas su mantenimiento no comprende mucho más que la limpieza del mismo. La energía térmica solar es completamente gratuita, libre de costos. Solo estará en dependencia de las condiciones climáticas. Por tanto se puede calcular lo siguiente:

$$\text{Costo del kW} = \frac{\text{Costo del colector solar}}{\text{kW entregados en un año}}$$

$$\text{Costo del kW} = \frac{\$10000.00}{438000 \text{ kW}}$$

$$\text{Costo del kW} = 0.023\$/\text{kw}$$

En un sistema de calentamiento de combustibles convencional que utiliza la energía eléctrica el costo del kW para el sector estatal es de 0,24 CUC, (sin tener en cuenta el costo inicial del equipo), por tanto con el análisis exergoeconómico del uso de la energía solar para el calentamiento del combustible Fuel Oil se llega a la conclusión de que es 10 veces menos costoso que la energía eléctrica.

**2.4.4- Determinación de los beneficios ambientales.**

Para analizar el impacto ambiental se tomó en cuenta la cantidad de dióxido de carbono emitido a la atmósfera al quemarse la cantidad de combustible necesaria para generar la energía eléctrica utilizada en un año para bombear el Fuel Oil. La comparación se hizo entre el consumo de electricidad para bombear el combustible a temperatura ambiente y calentado a 50 °C, se tomó como norma que por cada kg de combustible utilizado para generar electricidad se emiten a la atmósfera 0,74 kg de dióxido de carbono [22]. Los datos obtenidos se muestran en la Tabla 2.3

*Tabla 2.3 Monóxido de carbono emitido a la atmósfera al quemarse la cantidad de combustible necesaria. (Fuente: Elaborado por el autor)*

Temperatura del combustible	Electricidad consumida en un año en kWh	Cantidad de combustible utilizado en kg	Monóxido de carbono emitido a la atmósfera en kg
Temperatura ambiente	10 987	3 955	2 966
Calentado a 50 °C	5 493	1 978	1 483

## **CONCLUSIONES:**

- 1- La matriz energética actual basada en los combustibles fósiles está limitada en función del agotamiento de estos recursos, en contradicción con la creciente demanda de energía que implica el desarrollo tecnológico actual, por lo que deben ser estudiadas, explotadas y desarrolladas las fuentes renovables de energía y las fuentes alternativas.
- 2- Uno de los procesos que más energía demanda es el de trasiego de fluidos, pues dependen principalmente de bombas hidráulicas las que por su principio de funcionamiento presentan un importante consumo energético.
- 3- En Cuba se utilizan varios métodos para disminuir la viscosidad de los combustibles pesados y elevar la eficiencia energética en el trasiego de los mismos.
- 4- Para pequeños depósitos de combustibles pesados como el Fuel Oil el método con el que se logra mayor eficiencia energética es con la utilización de la Energía Solar Térmica.
- 5- La utilización de la Energía Solar Térmica en la empresa trae beneficios económicos y ambientales.

## **RECOMENDACIONES**

- Estudiar la posibilidad de utilizar la Energía Solar Térmica para calentar el combustible Fuel Oil en depósitos de mayores dimensiones y en los depósitos de las calderas de las diferentes entidades estatales.

**BIBLIOGRAFÍA:**

- 1- Aller, José. Metodología para la implantación de un Sistema Integral de Gestión de la Energía. Salazar, Luisa y Peña, Milagros. Universidad Simón Bolívar, Caracas 2012
- 2- Base Material de Estudio de Mecánica de los Fluidos. Centro Politécnico del Petróleo. Matanzas, 2012
- 3- Beñat Salbidegoitia, Ibon. (2008) Energía Solar. Revista DYNA No. 9 2008.
- 4- Bermúdez Rojas, Carmen R. (2009). "Los Calentadores solares como una forma de fuente renovable de energía alternativa". Citado por: García Cuba, J. y Julio César, Pino Tarragó. Ciencias Holguín, 2009.
- 5- Berriz Pérez, Luis. (2012) Calentadores solares en viviendas. [www.cubasolar.cu](http://www.cubasolar.cu)
- 6- Berriz Pérez, Luis. (2008) Manual para el cálculo y diseño de calentadores solares. Álvarez Gonzáles, Manuel. Editorial Cubasolar. [www.cubasolar.cu](http://www.cubasolar.cu)
- 7- Berriz Pérez, Luis. (2010). "Influencia del ángulo de inclinación de una superficie captadora solar sobre la radiación incidente". [www.energiasolar.dervis.ar](http://www.energiasolar.dervis.ar).
- 8- Bombas de desplazamiento positivo y compresores libres de aceite para aplicaciones de gas licuado. Blackmer Part of Pump Solutions Group. Michigan 2012. [www.blackmer.com](http://www.blackmer.com)
- 9- Castellanos Álvarez, Juan. (2007) Métodos fundamentales de análisis de los procesos de transmisión de calor. Montesino Pérez, Milagros. Universidad de Cienfuegos. 2007
- 10- Curso Energía y Cambio Climático Parte 2. Tabloide Universidad para Todos. Editorial Academia. La Habana 2010
- 11- Chow Pangtay, Susana. (1998) Petroquímica y sociedad. Fondo de Cultura Económica. México

- 12-Echevarría López, César A. (2011) Diseño de un colector cilindro parabólico compuesto con aplicación para el calentamiento de agua. Universidad de Piura. Perú
- 13-García Véliz, Frank. Eficiencia Energética en sistemas de Bombeo. Jara Noriega, Anderson y Serván Sócola, Jorge. Universidad de Piura. 2010
- 14-González Arias, A. Mecánica de fluidos, Dpto. Física Aplicada, UHOL.
- 15-González Francés, José P. (2005) La energía en el mundo, ¿cuál es su futuro?
- 16-Guía de ahorro energético en estaciones de servicio. Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid. Madrid, 2008. [www.fenercom.com](http://www.fenercom.com)
- 17-Guía técnica para la selección de equipos de transporte de fluidos. Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. Madrid. 2012
- 18-Guzmán China, Jesús M. (2007) Control de la combustión y determinación de la eficiencia de la caldera por método práctico. Universidad de Cienfuegos.
- 19-Hontañón, Esther. (2003) Simulación numérica del enfriamiento del fuel-oil en los tanques del Prestige. CIEMAT. España
- 20-Kern, Donald. (1969) Procesos de transferencia de calor. Instituto Cubano del Libro
- 21-La aplicación de la Energía Solar Térmica en la industria. [www.sitiosolar.com](http://www.sitiosolar.com)
- 22-Landa García, J. (2003). "Evaluación de un sistema de trasiego de miel de afinación de una refinería de caña de azúcar". Revista Avanzada Científica Vol. 6 No. 2 CIGET Matanzas, 2003.
- 23-Lineamientos de la Política Económica y Social del Partido y la Revolución. Comité Central Partido Comunista de Cuba. 2011
- 24- Manual de Eficiencia Energética para mediana y pequeñas empresas. Unidad de capacitación y asistencia técnica en Eficiencia Energética. El Salvador. 2012

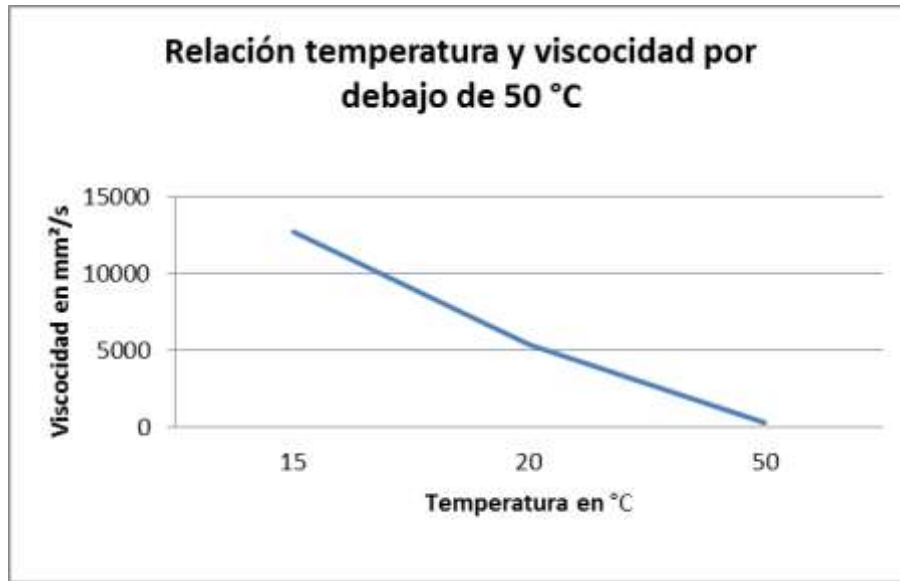
- 25-Massipe Hernández. Juan R. (2007) Métodos de ensayos del comportamiento térmico del colector solar integral "COMPACSOL" Despaigne Willson, Husseyn y Torres Ten. Revista Tecnología Química No. 1, 2007
- 26-Méndez Bustabad, Ofelia (2010) Modelos matemáticos para calcular la viscosidad efectiva y su aplicación en el diseño y evaluación de redes de tuberías. Riera González, Guido. Tecnología Química No. 2, 2010.
- 27-Monteagudo Yanes, José (2002) Ahorro de energía en sistemas de bombeo. Borroto Nordelo, Aníbal. Centro de estudios de Energía y Medio Ambiente. Universidad de Cienfuegos.
- 28-Moreno Coronado, Tanya. (2013) Entre crisis y acciones. Recomendaciones al sector energético cubano. Hugo Ventura, Víctor y Fariñas Wong, Ernesto. Energía y tú No. 63, 2013.
- 29-Otaola, Javier A. (1993) El sol y la tierra, una relación tormentosa. Mendoza, Blanca y Pérez, Román. Fondo de Cultura Económica. México
- 30-Pérez Pérez, Frank (2015) Uso de la Energía Térmica Solar en la comercialización del combustible Fuel Oil. González Segura, Frankling. IV Taller Internacional la Matemática, la Informática y la Física en el siglo XXI. Cuba
- 31-Pons Hernández, Antonio. (1987) Termodinámica técnica para ingenieros. Editorial Pueblo y Educación.
- 32-Propiedades termofísicas del fuel-oil. Centro de Investigación Le Cedre (2002) Francia. [www.le-cedre.fr](http://www.le-cedre.fr)
- 33-Rojas, E. Energía Solar Térmica. Programa de capacitación en energías renovables. ONUDI 2013.
- 34-Stolick, Daniel. (2010) Costos fotovoltaicos."renovable.cu" NO. 7 2010. [www.cubaenergía.cu](http://www.cubaenergía.cu)
- 35-Teoría del pico de Hubbert. Wikipedia, la enciclopedia libre (Versión portable) fundación Wikimedia. 2013

- 36-Tonda, Juan. (1993) El oro solar y otras fuentes de energía. Fondo de Cultura Económica, México
- 37-Vega Peña, Luis E. (2009) "Alternativa metodológica para el cálculo térmico de oleoductos". Citado por: Batista Mateo, Reydel. Ciencias Holguín, 2009.



## ANEXOS

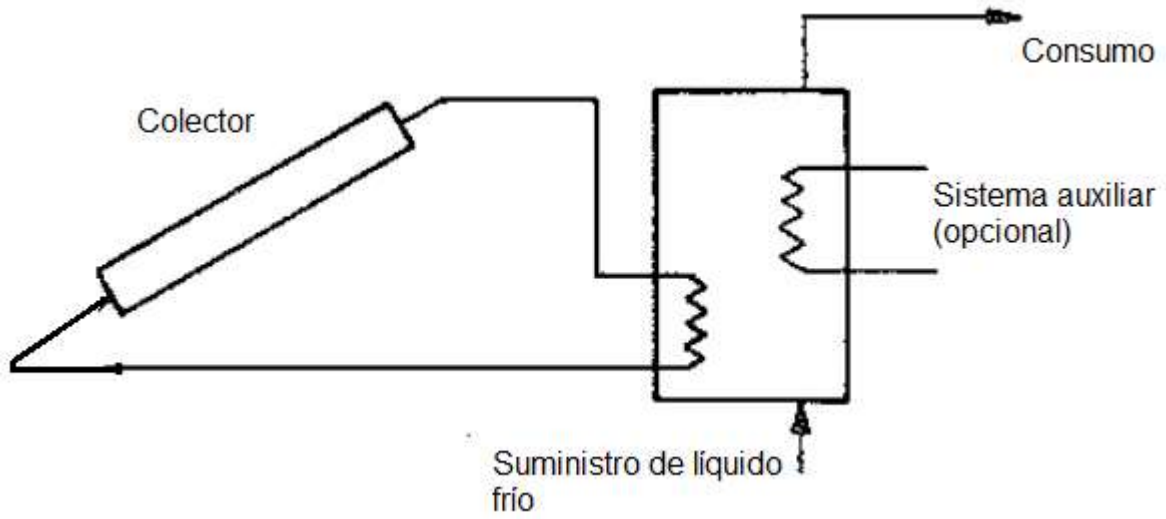
Anexo 1: Viscosidad del combustible Fuel Oil por debajo de los 50 °C



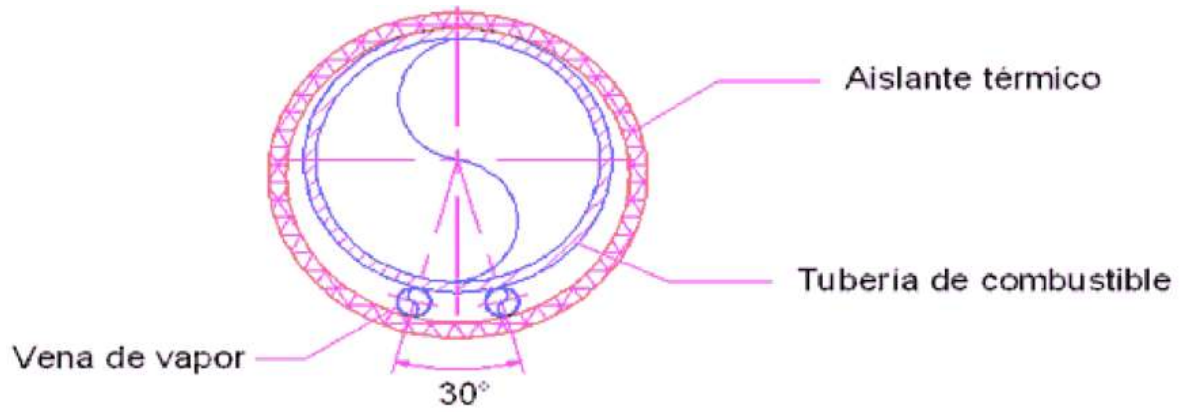
## Anexo 2: Certificado de calidad del Fuel Oil.

<b>Producto:</b>	PETROLEO COMBUSTIBLE MEDIANO BAJO VANADIO			
<b>Procedencia:</b>	TQ-24			
<b>Nº de Registro de la Muestra:</b>	18045			
<b>Nº de la Declaración:</b>	53-10			
<b>Fecha de Aprobación:</b>	24/10/2014			
<b>Fecha de Emisión:</b>	24/10/2014			
<b>Índices de Calidad</b>	<b>U/M</b>	<b>Método de ensayo</b>	<b>Valor Especificado</b>	<b>Resultados</b>
Viscosidad a 50 °C	mm. <sup>2</sup> / s	ASTM D-445	181 - 400	324,4
Azufre Total	% m/m	ASTM D-129/2622/1552	3,0 máx.	1,8
Temperatura de Inflamación CC , PM	°C	NC ASTM D-93	62 mín.	90,0
Temperatura de Fluides	°C	ASTM D-97	+16 máx.	+6
Contenido de Cenizas	% m/m	ASTM D-482	0,10 máx.	0,044
Carbón Conradson	% m/m	ASTM D-189	15,0 máx.	12,42
Valor Calórico Neto	Kcal/kg	ASTM D-240/4868	9500 mín.	9701,94
Densidad a 15 °C	g/cm <sup>3</sup>	ASTM D-1298	0,9959 máx.	0,9614
Gravedad a 15 °C	°API	ASTM D-1298/287	10,5 mín.	15,6
Agua x destilación	% v/v	NC ASTM D-95	1,5 máx.	0,30
Sedimentos por Extracción	% m/m	ASTM D-473	0,10 máx.	0,03
Contenido de Vanadio	ppm	ASTM D-1548/5863	180 máx.	110,0
Contenido de Sodio	ppm	ASTM D-1318/5863	60 máx.	25,00
Contenido de Asfalteno	% m/m	IP 143	10,0 máx.	8,50
Contenido de Aluminio + Silicio	ppm	ISO 10478	80 máx.	8,0
Sedimento Total Envejecido	% m/m	ISO10307-2		0,0097

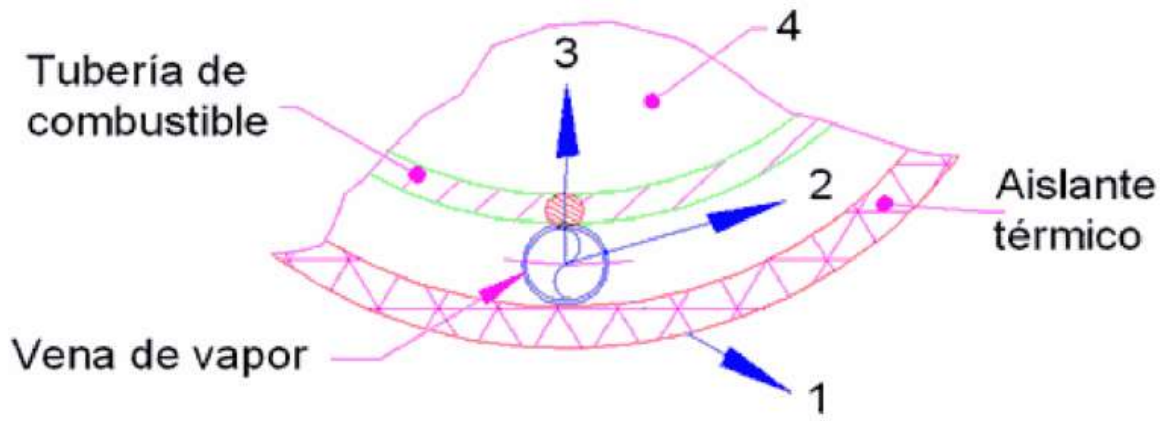
Anexo 3: Sistema indirecto con intercambiador térmico insertado en el depósito.



Anexo 4: Estructura interior del sistema de calentamiento con vapor de una tubería de combustible.



Anexo 5: Detalle del proceso de intercambio térmico.



## Anexo 6: Propiedades físicas de los combustibles.

Combustible	Densidad g/cm <sup>3</sup>	Viscosidad mm <sup>2</sup> /s	Punto de Inflamación °C	Apariencia visual
Gasolina	0.7329	-	35	Claro y brillante
Kerosina	0.8110	1.3	38	Claro y brillante
Diésel	0.8456	3.0	45	Oscuro aceitoso
Fuel Oil	0.9479	300	62	Marrón oscuro
Aceite motor recuperado	0.9065	134	170	Negro brillante

## Anexo 7: Chapa de datos de la bomba de Fuel Oil.

Gear Pump	
Tipo KSR – 35 - 160	
Bore S=4	D=4 P
Cap 200 GPM	Press 4.1 kg/cm <sup>2</sup>
Speed: 1500 RPM	Power 22 kW
Nº S60 0441	MFD 1986
DAITO KOGYO Co. LTD	
Tokyo Japan	

## Anexo 8: Chapa de datos del motor acoplado a la bomba de Fuel Oil

MOTOR ASINCRÓNICO			
Tipo AO2-62-6 T2			NS 29981
3~	60 Hz	22kW	cos $\varphi$ : 0.88
1160 RPM		□□□	220/440 V
$\lambda$ : 87%	166 kg	1980	41/22 A
□oct 166-77		Clase de aislamiento: 90 °C	
HECHO EN LA URSS			

Anexo 9: Fotografía de la bomba de Fuel Oil



Anexo 10: Fotografía de la bomba de Diésel.

