

Área del Conocimiento de Agricultura

“DETERMINACIÓN DEL REQUERIMIENTO TÉRMICO PARA LOS SISTEMAS DE CALENTAMIENTO DE TANQUES DE ASFALTO DE LA EMPRESA SOLTEC S.A.”

Trabajo Monográfico para optar al título de
Ingeniero Químico

Elaborado por:

Tutor:

Br. Francisca Lucía Sacasa
Noguera
Carnét: 2016-0909U

MSc. Ing. Ernesto Acevedo Lugo

Noviembre 2025
Managua, Nicaragua

Resumen

La empresa SOLTEC S.A. elabora derivados asfálticos, entre ellos asfalto modificado, el cual es de gran importancia para el desarrollo vial del país. Para la elaboración de asfalto modificado, se requiere de suministro térmico mediante sistemas de calentamiento en los tanques de precalentamiento y producción. El tanque de precalentamiento cuenta con calentamiento por combustión de LPG y el tanque de producción cuenta con un serpentín en su interior que cede calor mediante aceite térmico.

No se cuenta con una evaluación energética de las etapas presentes en el proceso, por lo cual se analizó el proceso y se recolectaron mediciones de temperatura de asfalto virgen y aceite térmico. Se utilizaron tres lotes de 5,000 galones para el desarrollo de este estudio.

Se desarrolló la metodología y los resultados de los requerimientos térmicos mediante balances energéticos para el tanque de precalentamiento y tanque de producción. Se analizaron las diferencias entre lotes y de acuerdo a estas se obtuvieron resultados consecuentes. Se identificó falta de estandarización en el proceso, por lo tanto, diferentes requerimientos térmicos.

Se estimó la eficiencia de los sistemas de calentamiento en los tanques analizando los gases de combustión en el tanque de precalentamiento y realizando balances energéticos para el tanque de producción. La combustión se evaluó mediante un analizador de oxígeno, el cual ayudó a determinar la eficiencia del quemador, pero también se identificó que la combustión es incompleta.

La eficiencia del sistema de calentamiento por serpentín en el tanque de producción fue estimada mediante balances de calor absorbido y cedido, los cuales se relacionaron entre sí para dar respuesta. Se identificó una eficiencia muy baja en este sistema.

Se estimaron las pérdidas a través del aislamiento de los tanques utilizando las ecuaciones del método de resistencias. Se realizaron mediciones de la superficie de los tanques y se registraron mediciones del asfalto en sus diferentes tanques y lotes. Se obtuvo como resultado bajas pérdidas a través del aislamiento de fibra de vidrio y lámina de aluminio.

Contenido

I.	Introducción.....	1
II.	Objetivos.....	3
	2.1 Objetivo general:.....	3
	2.2 Objetivos específicos:	3
III.	Marco teórico.....	4
	3.1 Asfalto	4
	3.1.1 Historia del asfalto.....	4
	3.1.2 Composición química	5
	3.1.3 Propiedades químicas	6
	3.1.4 Propiedades físicas.....	6
	3.1.5 Grado de desempeño (PG).....	6
	3.2 Polímero.....	7
	3.2.1 Definición	7
	3.2.2 Etileno-acrilato de n-butilo	7
	3.3 Asfalto modificado.....	8
	3.3.1 Definición	8
	3.3.2 Propiedades del asfalto modificado	8
	3.3.3 Estructura del asfalto modificado.....	9
	3.4 Polímeros más usados en la elaboración de asfalto modificado	9
	3.5 Normas.....	9
	3.6 Elaboración de asfalto modificado	10
	3.7 Calentamiento en tanques implicados en la elaboración de asfalto modificado	11
	3.7.1 Calentamiento por combustión en quemador.....	11
	3.7.2 Calentamiento a través de serpentín	12
	3.7.3 Eficiencia	13
IV.	Metodología.	24
	4.1 Ubicación del estudio.....	24
	4.2 Descripción del proceso objeto de estudio.	25
	4.3 Determinación de los requisitos energéticos	27
	4.4 Cálculo del requerimiento térmico por calentamiento de tanques de precalentamiento/almacenamiento y producción de asfalto modificado en la empresa SOLTEC S.A.	28

4.4.1 Recopilación de la información	28
4.4.2 Métodos	29
4.5 Determinación del rendimiento térmico de la combustión del quemador en tanques de almacenamiento de la planta de producción de asfalto modificado en la empresa.	29
4.5.1 Recopilación de la Información	29
4.5.2 Métodos	30
4.6 Evaluación de la eficiencia térmica de los equipos de calentamiento implicados en la producción de asfalto modificado en la empresa SOLTEC S.A.	31
4.6.1 Recopilación de Información	31
4.6.2 Métodos	32
4.7 Estimación de pérdidas energéticas a través del aislante de los tanques de precalentamiento/almacenamiento y producción de SOLTEC S.A.....	32
4.7.1 Recopilación de la Información	32
4.7.2 Métodos	33
4.8 Materiales a utilizar	33
V. Análisis y discusión de resultados	35
5.1 Cálculo del requerimiento térmico por calentamiento de tanques de almacenamiento y producción de asfalto modificado en la empresa SOLTEC S.A.	36
5.2 Determinación del rendimiento térmico de la combustión del quemador en tanques de almacenamiento de la planta de producción de asfalto modificado en la empresa.	39
5.3 Evaluación de la eficiencia térmica de los equipos de calentamiento implicados en la producción de asfalto modificado en la empresa SOLTEC S.A.	44
5.4 Estimación de pérdidas energéticas a través del aislamiento de los tanques de almacenamiento y producción de SOLTEC S.A.	47
VI. Conclusiones.....	49
VII. Recomendaciones	51
Nomenclatura.....	52
Referencias	54

Dedicatoria

A mi madre, con todo mi amor y agradecimiento.

Agradecimientos

A mi madre, quien con amor, dedicación y resiliencia hizo de mí la mujer fuerte y determinada que soy.

A mi padre, por todo su amor, apoyo y consejos.

A mi futuro esposo, Vinko, que con su amor y apoyo me motiva a ser mi mejor versión.

A mis hermanos, que han sido mis compañeros y modelos de vida.

A mi tutor, MSc. Ing. Ernesto Acevedo, que ha puesto dedicación y esfuerzo en guiarme desde que fue mi maestro de Transferencia de Calor, hasta ahora que es mi tutor de tesis.

A la empresa SOLTEC S.A., que me abrió sus puertas y me permitió realizar este estudio.

A la Universidad Nacional de Ingeniería, que por medio de la carrera de Ingeniería Química me abrió las puertas de una de mis más grandes pasiones.

A la empresa Puma Energy, quien me brindó herramientas que contribuyeron a este estudio.

Al Ing. José Meza Montenegro por orientarme y apoyarme con sus amplios conocimientos energéticos.

I. Introducción

En Nicaragua, la industria asfáltica en general se encuentra en desarrollo. Actualmente, solo dos empresas se dedican a la producción de derivados asfálticos, entre ellas se encuentra la empresa SOLTEC S.A., dicha empresa es de suma importancia en el sector vial del país. Esta se especializa en la elaboración de asfalto modificado, además de otros derivados del asfalto, desde su fundación en el año 2005 con una capacidad de hasta 10,000 litros por lotes.

El proceso de producción de asfalto modificado está basado en etapas de mezclado, molienda y almacenamiento, sin embargo, en cada una de estas etapas se necesita un suministro energético que mantenga al asfalto a una temperatura de al menos de 180°C, por lo que requiere de mucha atención, puesto que la eficiencia energética del sector industrial es un tema de preocupación a nivel global, ya que garantiza mayor rentabilidad de los procesos productivos y menor huella ambiental.

La empresa SOLTEC S.A. no cuenta con una evaluación de los requerimientos térmicos de las etapas que componen la producción, tanto de emulsiones asfálticas como de asfalto modificado. Por lo tanto, se opera tomando en cuenta las especificaciones térmicas recomendadas por los fabricantes de la materia prima e insumos utilizados. También se utilizan los tiempos de digestión orientados por los fabricantes de aditivos, esto condiciona la producción, así como lo hacen los volúmenes de producto requeridos por los clientes. La falta de evaluación de eficiencia térmica y requerimiento energético de los equipos de calentamiento de la empresa SOLTEC S.A. representan un impedimento en el desarrollo de la misma empresa

En la empresa SOLTEC S.A. tampoco se tiene registros de la eficiencia térmica de los equipos de calentamiento utilizados en la producción de asfalto modificado. A su vez, no se cuenta con registros de evaluación ambiental de emisiones de gases perjudiciales al medio ambiente, ni se cuenta con registros de calor de disipado por los equipos de calentamiento de la empresa SOLTEC S.A.

La determinación del requerimiento energético de la batería de tanques de asfalto de la empresa SOLTEC S.A. y la estimación de su eficiencia energética son necesarios para

optimizar la producción y sentar precedentes en la industria asfáltica de Nicaragua, estableciendo una especie de metodología para la evaluación energética de plantas de producción de asfalto modificado.

Así mismo, el presente estudio, da la pauta para múltiples acciones correctivas que puedan implementarse en la empresa SOLTEC S.A. con el objetivo de mejorar el proceso productivo como tal, reduciendo el deterioro de equipos, aminorando costos energéticos, reduciendo el impacto ambiental, mejorando la calidad del producto terminado y mejorando las condiciones de seguridad de los colaboradores que laboran en dicha empresa.

II. Objetivos

2.1 Objetivo general:

Evaluar el consumo de energía térmica del proceso de calentamiento en los tanques de asfalto modificado de la planta de producción de la empresa SOLTEC S.A.

2.2 Objetivos específicos:

- Calcular el requerimiento térmico por calentamiento de cada uno de los tanques de almacenamiento y producción de asfalto modificado en la empresa SOLTEC S.A.
- Determinar el rendimiento térmico del quemador en tanques de almacenamiento de la planta de producción de asfalto modificado en la empresa.
- Determinar la eficiencia térmica de los equipos de calentamiento implicados en la producción de asfalto modificado en la empresa SOLTEC S.A.
- Estimar pérdidas energéticas a través del aislamiento de los tanques de almacenamiento y producción de SOLTEC S.A.

III. Marco teórico

La industria asfáltica es todo un mundo por conocer, el cual se compone de teoría desarrollada a raíz del descubrimiento y aplicación del asfalto bituminoso por civilizaciones antiguas. Si bien es una industria compleja, también es esencial para el progreso de las sociedades, por lo que requiere de peculiar atención e investigación. Poco a poco se han ido desglosando y acuñando términos necesarios para su entendimiento. Los términos esenciales se encuentran en el siguiente marco teórico.

3.1 Asfalto

El asfalto es, según la definición del American Society for Testing and Materials (ASTM), un material consistente marrón oscuro o negro compuesto por una mezcla de productos bituminosos que se encuentran en la naturaleza o se obtienen en el procesamiento del petróleo.

Otra definición presentada por Martínez (2003), lo conceptualiza como “ligantes hidrocarbonados sólidos o viscosos preparados a partir de hidrocarburos naturales por destilación, oxidación o “cracking”, que contienen baja proporción de volátiles, poseen propiedades aglomerantes características y son esencialmente solubles en sulfuro de carbono”.

3.1.1 Historia del asfalto

El asfalto ha sido utilizado a lo largo de la historia de la humanidad como un material ligante, utilizado para cubrir e impermeabilizar superficies. Se muestra la Tabla 3.1 a manera de resumen del uso del asfalto en la historia:

Tabla 3.1: Usos del asfalto en la historia.

Año	Uso
6000 a. C.	En Sumeria, se utilizaba en la industria de navegación.
3200 – 2600 a. C.	Utilizado por los egipcios para impermeabilizar.
2600 – 540 a. C.	Amplio uso en Mesopotamia y el Valle del Indo como aglomerante para albañilería, construcción de carreteras y para impermeabilización en depósitos de agua.
300 a. C.	Se emplea ampliamente en Egipto para embalsamamientos.
1802 d. C.	En Francia se emplea roca asfáltica para pavimentación de suelos, puentes y aceras.
1838 d. C.	En Filadelfia se emplea roca asfáltica importada en la construcción de aceras.
1870 d. C.	Construcción del primer pavimento asfáltico en Newark, Nueva Jersey.
1876 d. C.	Construcción del primer pavimento de tipo sheet asphalt en Washington D.C.
1902 d. C.	En Estados Unidos se obtienen de la destilación del petróleo aproximadamente 120,000 barriles al año.

Nota. De Asfaltos modificados con polímeros, por Avellán M., (2007).

3.1.2 Composición química

El asfalto es químicamente considerado como una mezcla de hidrocarburos complejos de diferente polaridad, cuya composición química está determinada por las propiedades físicas y químicas del crudo origen y los rendimientos de los procesos de destilación a los que este se ve sometido (Mexicano et al, 2016).

El asfalto en su composición elemental arroja contenidos de aproximadamente 84% carbón, 10% hidrógeno, 1% oxígeno y 5% trazas de elementos como azufre, níquel, vanadio y hierro (Mexicano et al, 2016).

3.1.3 Propiedades químicas

Químicamente el asfalto puede definirse como una mezcla compleja de compuestos hidrocarbonados cuyas características se ven influenciadas por las propiedades físicas y químicas del crudo origen, así como por los rendimientos del proceso mediante el cual fue obtenidos. Dado lo anteriores posible encontrar asfaltos de composición muy diversa y con características de desempeño bastante diferentes (Mexicano et al, 2016).

Está constituido por tres grupos básicos: asfaltenos, resinas y aceites (aromáticos y saturados). (M. Avellán, 2007).

3.1.4 Propiedades físicas

Las propiedades físicas más relevantes son:

- Durabilidad
- Adhesión y cohesión
- Susceptibilidad a la temperatura
- Endurecimiento y envejecimiento
- Pureza

3.1.5 Grado de desempeño (PG)

El grado de desempeño o Grado PG (*Performance Grade*) es el rango de temperaturas, máxima a mínima, entre las que un cemento asfáltico se desempeña satisfactoriamente. El Grado PG permite seleccionar el cemento asfáltico más adecuado para una determinada obra, en función del clima dominante y de la magnitud del tránsito a que estará sujeta durante su vida útil (SCT, 2005).

Un cemento asfáltico clasificado como PG 64-22 tendrá un desempeño satisfactorio cuando trabaje a temperaturas tan altas como sesenta y cuatro (64) grados Celsius y tan bajas como menos veintidós (-22) grados Celsius (SCT, 2005).

3.2 Polímero

3.2.1 Definición

Hector Sarrion (2017), de la Universitat Politècnica de Valencia, define polímero de la siguiente manera: Los polímeros son macromoléculas formadas a partir de la unión mediante enlaces covalentes de una o más unidades llamadas monómeros. Los polímeros forman largas cadenas que se unen entre sí por puentes de hidrógeno, fuerzas de Van der Waals, o interacciones hidrofóbicas.

Existen diferentes tipos de polímeros: naturales y artificiales. También se pueden clasificar según su comportamiento al elevar la temperatura distinguiéndose entre:

- Elastómeros: plásticos que tienen un comportamiento elástico y pueden ser deformados sin modificarse la estructura o romperse sus enlaces
- Termoestables: al calentarlos se descomponen químicamente. Este comportamiento se debe a su estructura con muchos entrecruzamientos, que impide los desplazamientos relativos de las moléculas.
- Termoplásticos: al calentarlos pasan a estado líquido, es decir, fluyen y al enfriarlos se vuelven a endurecer volviendo al estado sólido. Su estructura molecular presenta pocos entrecruzamientos.

Además, los polímeros pueden clasificarse según sus aplicaciones diferenciándose en adhesivos, plásticos, elastómeros, recubrimientos o fibras (Sarrion, 2017).

3.2.2 Etileno-acrilato de n-butilo

El etileno – acrilato de n - butilo es un copolímero resultante de la aleación de etileno, acrilato y butilo. Lopez Villanova (2015), en su tesis doctoral, señala que este es un comonómero polar de gran uso en la industria, destacando por tener una excelente procesabilidad y flexibilidad, así como por su elevada compatibilidad con otros polímeros, aditivos y cargas. Estas propiedades hacen que sean especialmente adecuados para una gran variedad de aplicaciones, como filmes para envasado, retractiles, cubiertas de invernadero, cables, adhesivos termo-fusibles (hot-melt), espumas etc.

3.3 Asfalto modificado

3.3.1 Definición

Los asfaltos modificados son producto de la incorporación en el asfalto de un polímero o de hule molido. Esto se hace con el fin de modificar sus propiedades físicas y reológicas para disminuir su susceptibilidad a la temperatura, humedad y oxidación e incrementar la adherencia con el material pétreo. Aumentar la resistencia de las mezclas asfálticas a la deformación y esfuerzos de tensión repetidos (Avellán, 2007).

En la actualidad el incremento de volúmenes de tráfico y el exceso de carga, así como el incremento en la presión de inflado de las llantas y la variabilidad inesperada de las condiciones climáticas, hacen que utilizar asfaltos convencionales en la construcción de vías no satisfagan algunas expectativas tal como cumplir un determinado periodo de servicio, es decir, menor resistencia al envejecimiento, o la poca durabilidad de las vías reflejándose en deformaciones y deterioros de las carpetas asfálticas (Lozano et al., 2015).

Para obtener una buena mezcla entre asfalto y polímero, dependerá de que el polímero tenga una estructura química que le permita una buena dispersión en el asfalto, de modo de lograr una estructura de malla, la cual a su vez dependerá del grado de productos aromáticos que contenga el asfalto (Lozano et al., 2015).

3.3.2 Propiedades del asfalto modificado

El objetivo que se sigue con la adición de polímeros en el asfalto, es modificar las propiedades físicas y reológicas del ligante, entre las ventajas perseguidas Lozano (2015) enumera:

- Aumentar la viscosidad, que depende de las cantidades y tipos de polímeros.
- Disminuir la penetración.
- Aumentar el punto de ablandamiento del asfalto entre 8 y 12 grados.
- Acrecienta el punto de inflamación.
- Disminuir la susceptibilidad a los cambios de temperatura.
- Incrementa entre uno y dos grados la clasificación PG del asfalto.

- Incrementa la recuperación elástica del asfalto hasta arriba del 30%.
- Eleva la resiliencia por encima de 25.
- Amplia el rango de temperatura en el manejo y almacenamiento.
- Mayor intervalo de plasticidad.
- Mayor cohesión.
- Incrementa la resistencia a la acción del agua.
- Mejor resistencia al envejecimiento.

3.3.3 Estructura del asfalto modificado

Los asfaltos modificados con polímeros se forman por dos fases, una constituida por pequeñas partículas de polímero y otra por asfalto. En las estructuras de baja concentración de polímeros existe una matriz continua de asfalto en la que se encuentra disperso el polímero; pero si se aumenta la proporción de polímero en el asfalto se produce una inversión de fases, estando la fase continua constituida por el polímero y la fase discontinua corresponde al asfalto que se encuentra disperso en ella. Esta micro morfología bifásica y las interacciones existentes entre las moléculas del polímero y los componentes del asfalto al parecer son la causa del cambio de propiedades que experimentan los asfaltos modificados con polímeros (Lozano et al., 2015).

3.4 Polímeros más usados en la elaboración de asfalto modificado

3.4.1 Elastómeros: son polímeros de respuesta elástica (caucho, SBS, SBR, Isopreno). Un elastómero es un polímero con viscoelasticidad y fuerzas inter-moleculares muy débiles, generalmente dando un bajo módulo de Young (módulo de tensión o módulo elástico) y una alta falla a la tensión por deformación comparado con los plásticos.

3.4.2 Plastómeros: rigidizan el asfalto ofreciendo resistencia, como consecuencia no son deformables elásticamente (PVC, EVA).

3.5 Normas

La normativa regional vigente para asfalto y sus derivados es el Reglamento Técnico Centroamericano RTCA 75.01.22:04, PRODUCTOS DE PETROLEO. ASFALTOS.

ESPECIFICACIONES. Este reglamento es una adaptación de las especificaciones que aparecen en las normas ASTM: D 946-82 (Reapproved 1999), D 977-98, D 2026-97, D 2027-97, D 2028—97, D 2397-02, D 3381-92 (Reapproved 1999) y D 6373-99. Respecto a asfalto modificado, las normativas aplicadas a los distintos ensayos, determinantes de la calidad se pueden observar en la Tabla 3.5.1:

Tabla No. 3.5.1: Normas AASHTO y ASTM aplicables a asfaltos modificados

Ensayo	AASHTO	ASTM
Viscosidad cinemática a 135°C	T - 201	D – 2170
Viscosidad dinámica a 60°C	T - 202	D – 2171
Penetración	T - 29	D – 5
Recuperación Elástica por Torsión	*****	*****
Prueba Giratoria de Película Delgada en Horno	T - 240	D – 2872
Viscosidad Rotacional Tipo Haake	*****	D – 2872
Recuperación Elástica por Ductilómetro	*****	D – 6084
Resilencia a 25°	*****	D – 3407
Gravedad Específica	T - 228	D – 70
Punto de Ablandamiento	T - 53	D - 3695

Nota. De Asfaltos modificados con polímeros, por Avellán, (2007).

3.6 Elaboración de asfalto modificado

El proceso de elaboración de asfalto modificado apropiado varía de acuerdo al tipo de polímero utilizado. Las variaciones principalmente consisten en las temperaturas y al incurrimiento de ciertas etapas que son fundamentales para la mezcla de asfalto con ciertos productos, que para otros no. Por ejemplo, existen polímeros que requieren de una etapa de molienda y otros que con una etapa de mezclado basta para su incorporación adecuada.

El proceso estándar cuenta con una etapa de precalentamiento, una etapa de mezclado donde se adiciona el polímero y demás aditivos necesarios en la formulación y la etapa de almacenado.

3.7 Calentamiento en tanques implicados en la elaboración de asfalto modificado

3.7.1 Calentamiento por combustión en quemador

Según el Instituto de la Diversificación y Ahorro de la Energía de España (IDAE, 2010), la combustión es un conjunto de reacciones de oxidación con desprendimiento de calor que se producen entre dos elementos: el combustible, que puede ser sólido (pellets, carbón, madera, etc.), líquido (gasóleo, etc.) o gas (natural, propano, etc.) y el comburente, oxígeno; se distingue de otros procesos de oxidación por obtenerse el mantenimiento de una llama estable.

La combustión puede ser completa o incompleta. La combustión completa está dada por: $C_xH_y + O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O$. Mientras que la combustión incompleta genera subproductos adicionales a los de la combustión completa como monóxido de carbono y carbono, visto de siguiente manera: $C_xH_y + O_2 \rightarrow CO_2 + CO + C + H_2O$.

El equipo más usual para calentamiento por medio de combustión son las calderas (IDAE, 2010). Por definición la Norma Ministerial sobre Condiciones de Higiene y Seguridad para el funcionamiento de los equipos Generadores de Vapor y Calderas que operen en los centros de trabajo, una caldera es un recipiente cerrado en el cual se calienta agua, se genera vapor o se sobrecaliente bajo presión o vacío mediante la aplicación de calor de combustible, electricidad o energía nuclear (La Gaceta No. 115, 2002). En este caso, no es agua el receptor del calor, sino asfalto.

Aunque habitualmente se mencionan únicamente las calderas como los elementos de producción de calor, en realidad el mismo se produce en el conjunto de generación de calor compuesto por: quemadores, calderas y chimeneas. Los quemadores son los equipos donde se realiza la combustión, su función es lograr la mezcla íntima del combustible con el aire y además proporcionar la energía de activación (IDAE, 2010).

Los quemadores se pueden clasificar de acuerdo a su aportación de aire como quemadores mecánicos y atmosféricos, siendo el de tipo mecánico el utilizado por la industria asfáltica con el objetivo de lograr una combustión continua, estable y controlada, con un buen rendimiento.

Las calderas pueden clasificarse dependiendo del estado de agregación del combustible utilizado. En el caso de la elaboración de asfalto, suele utilizarse tipos de calderas de combustible líquido o gaseoso, que generalmente se encuentran diseñadas de manera similar y cumplen indistintamente su función, adaptándose ya sea al combustible líquido o gaseoso.

En Nicaragua, para introducir el uso de una caldera a determinado proceso industrial, es necesario que se cumpla con los Capítulos I al VII del TÍTULO XIII DE LOS PROCEDIMIENTOS PARA LA AUTORIZACIÓN DE FUNCIONAMIENTO DE LOS EQUIPOS GENERADORES DE VAPOR (La Gaceta No. 25, 2007).

3.7.2 Calentamiento a través de serpentín

Los intercambiadores de calor son aparatos que facilitan el intercambio de calor entre dos fluidos que se encuentran a temperaturas diferentes y evitan al mismo tiempo que se mezclen entre sí. En un intercambiador, la transferencia de calor suele comprenderse convección en cada fluido y conducción a través de la pared que los separa (Cengel, 2007).

Cuando se requiere mejorar el desempeño de un intercambiador de calor sin que esto repercuta en un mayor tamaño se recurre a diferentes técnicas para aumentar la transferencia de calor. Una de estas técnicas ampliamente aplicadas en procesos industriales son los tubos curvos, que ofrecen soluciones a las limitaciones de espacio y que simultáneamente proporcionan altas tasas de transferencia de calor acompañadas de una baja caída de presión debido a la reducción de la cantidad de dispositivos intermedios (válvulas, compartimientos de distribución, etc.) (Flórez, s.f.).

El intercambiador de serpentín está constituido por un tubo que está sumergido en un depósito donde se acumula el fluido secundario. Por el interior del tubo circula el fluido primario o calor portador mediante flujo y cediendo el calor al fluido secundario (Barreto, 2015).

El intercambiador térmico de serpentines sumergidos forma parte de la familia de los intercambiadores de tubos, se lo cataloga como de fácil construcción e instalación, está formado por un sistema tubular en forma de U, por donde circula aceite térmico a temperaturas de hasta 240°C, calentando el asfalto contenido en el tanque (Aicamaña, 2016).

3.7.3 Eficiencia

- Combustión

El rendimiento puede definirse de dos maneras diferentes: eficiencia del combustible y rendimiento de caldera. (Gomez, 2021).

La eficiencia de combustible incluye toda la energía absorbida por el fluido de trabajo como salida, pero cuenta solamente como entrada la energía química del combustible (Gomez, 2011). Mientras que el rendimiento de la caldera cuenta a su vez con toda la energía de entrada en los límites del equipo, por ejemplo, el calor sensible de combustible o la energía añadida por un precalentador de aire (Gomez, 2011).

De acuerdo a lo anterior, se estima más conveniente utilizar el término “rendimiento de caldera” en adelante para referirnos a la eficiencia de la misma.

El ASME PTC 4 – 2008 *Fired Steam Generators* (Generadores de Vapor por Calor), establece normas e instrucciones para la realización de pruebas de rendimiento de generadores de vapor (Gómez, 2011). Es de acuerdo a este estándar que se obtendrán resultados para el presente estudio monográfico.

La eficiencia energética de una caldera se calculará mediante el uso de la Ec. 3.1:

$$\eta_{caldera} = \frac{Q_{util}}{E_{total\ entrada}} \quad (\text{Ec. 3.1})$$

La eficiencia de la caldera (η) se define como la relación entre el calor útil obtenido (Q_{util}) y la energía de entrada ($E_{total\ entrada}$) la cual está descrita como la energía de combustible más los créditos (entendiéndose por créditos a las aportaciones de calor como, por ejemplo, el calor sensible del combustible o la energía añadida en el precalentador de aire) (Gómez, 2011). En la Ec. 3.2 se observa el desarrollo del balance de energía de la combustión:

$$E_{total\ entrada} = E_{combustible} + B \quad (\text{Ec. 3.2})$$

La energía de combustible es equivalente al poder calorífico del combustible, por lo tanto:

$$E_{entrada} = PC + B \quad (\text{Ec. 3.3})$$

A su vez, el Q_{util} puede expresarse como se señala en la Ec. 3.4:

$$Q_{util} = PC + B - L \quad (\text{Ec. 3.4})$$

Entonces, el rendimiento de la caldera en ASME se expresa de acuerdo a la Ec. 3.5:

$$\eta_{caldera} = \frac{Q_{util}}{E_{total\ entrada}} = \frac{Q_{util}}{PC+B} = \frac{PC+B-L}{PC+B} = 1 - \frac{L}{PC+B} \quad (\text{Ec 3.5})$$

Donde:

PC: Poder calorífico inferior [BTU/lb]

B: Créditos energéticos [BTU/lb]

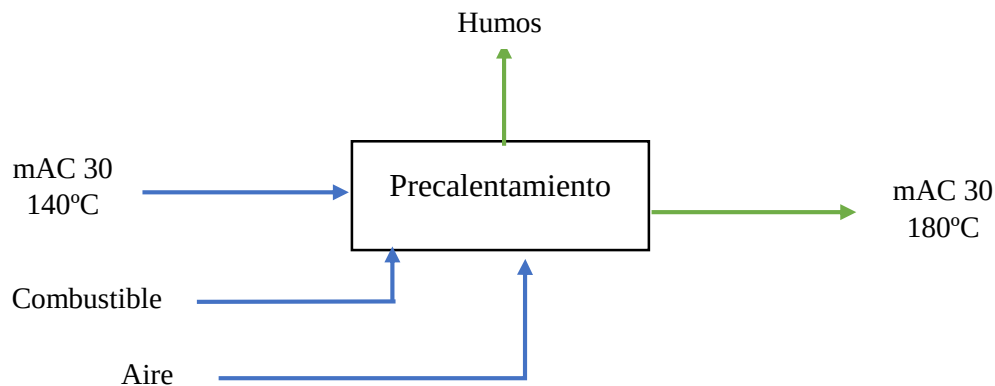
L: Pérdidas [BTU/lb]

Entiéndase por pérdidas (Barrera et al.):

- Pérdidas de calor por radiación: entre las paredes calientes del quemador y el entorno.
- Pérdidas de calor sensible (Q_s): debido a que los productos generados en la combustión y los gases inertes que no reaccionan se evacúan a una temperatura superior (T_{aire}). Representan casi la totalidad de las pérdidas de calor y su valor dependerá de la temperatura y el caudal de los gases de escape generados (m_{humo}), a su vez dependiente del exceso de aire empleado.

$$Q_s = m_{humo} * cp_{humo} * (T_{humo} - T_{aire}) \quad (\text{Ec. 3.6})$$

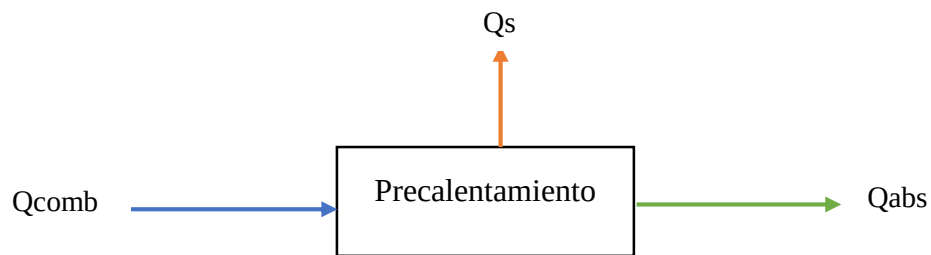
Figura No. 3.1. Balance de Materiales en el precalentamiento y almacenamiento de asfalto virgen.



Dónde:

mAC 30: Masa de asfalto virgen.

Figura No. 3.2. Balance de Energía en el precalentamiento y almacenamiento de asfalto virgen.



Donde:

Q_{comb} : Calor del combustible

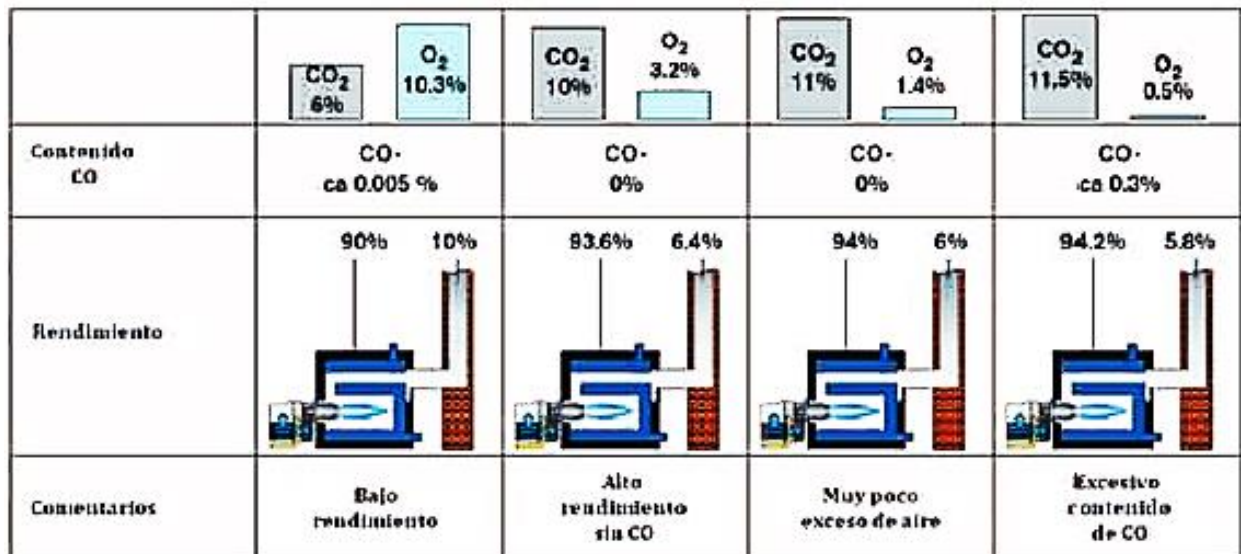
Q_s : Pérdidas de calor

Q_{abs} : Calor absorbido por el asfalto

Para obtener el máximo rendimiento de combustión, ésta debe ajustarse de modo que se logre la combustión completa con el menor exceso de aire posible; además, el gasto de combustible debe ajustarse de modo que se obtengan las temperaturas de humos más bajas posibles, produciendo la potencia necesaria para el servicio (IDAE, 2010).

Existen dos tipos de combustión que pueden darse: completa e incompleta. Una combustión incompleta libera menos energía y, además, produce CO (que es un gas tóxico e inflamable). Para evitarlo, se quema un exceso de aire, pero este exceso de aire, implica a su vez un menor rendimiento de la combustión.

Figura No. 3.3. Relación entre el rendimiento de la combustión, las emisiones contaminantes y el exceso de oxígeno aportado en la combustión.



Nota: De Guía Básica de Calderas Industriales Eficientes, por Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid (s.f.)

De acuerdo a la Figura No. 3.3, se observa que en el primer caso, de izquierda a derecha, se muestra una combustión con un exceso de aire muy alto, por lo que se asume que esta será una combustión muy segura, pero de bajo rendimiento. En el lado opuesto se encuentra una combustión con un exceso de aire extremadamente bajo y, por lo tanto, con un rendimiento muy elevado. El problema se plantea en el excesivo contenido de CO de la misma, con el riesgo que esto conlleva.

Otro método para el cálculo de eficiencia en hornos y calderas está determinado por la Ec. 3.7, la cual es una ecuación empírica de uso común en la industria refinera:

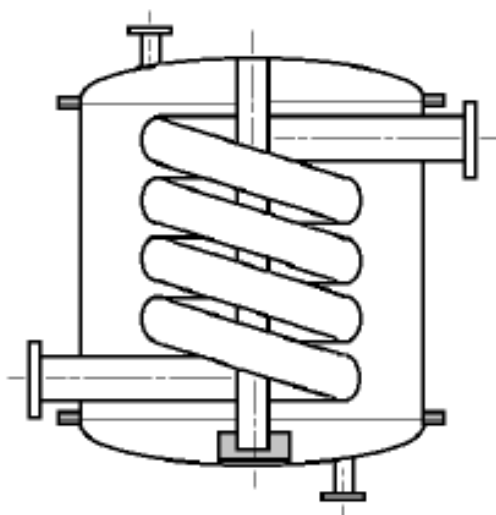
$$E_{LHV} = [100 - (0,04266 + 0,000340 * EA)(T_s - T_a)] \left(\frac{100}{100 + Q_L} \right) \quad (\text{Ec. 3.7})$$

Donde el EA es el exceso de aire, calculado mediante la Ec. 3.8:

$$EA = \frac{91.2 * \%O_2}{20.95 - \%O_2} \quad (\text{Ec. 3.8})$$

- Serpentín

Figura No. 3.4. Representación de un Intercambiador de Calor de Serpentín.



Nota. De Diseño de un intercambiador de calor de serpentín para el enfriamiento de acetona, por Pérez A. (Revista Nexa, 2019.)

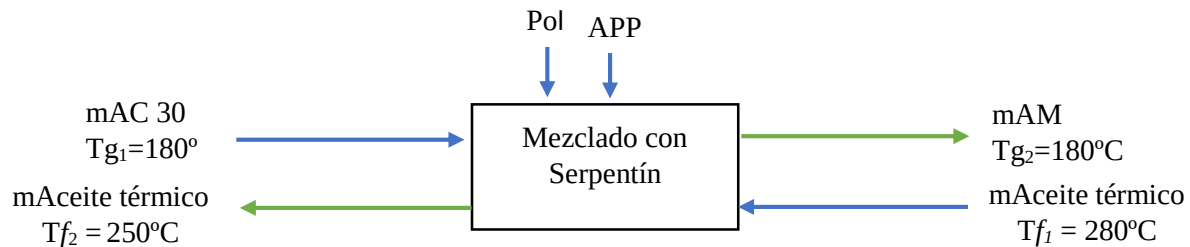
Los serpentines son ventajosos debido a su alto coeficiente de transferencia de calor y compacidad en comparación con tubos rectos. Los desarrollos en la industria de procesos son principalmente impulsados por el costo y la eficiencia de los intercambiadores de calor, que requiere una ecuación precisa y exacta para la estimación de transferencia de calor. El tanque de producción de asfalto modificado de la empresa SOLTEC S.A. cuenta con un sistema de calentamiento de serpentín como el mostrado en la Figura No. 3.4.

Para obtener mejor rendimiento del calentamiento por serpentín, se debe de asegurar el sellado de pérdidas, válvulas, accesorios y juntas; mantener en buen estado el sistema de aislamiento externo; mantener limpias las superficies de transferencia de calor; asegurar que los rangos de temperatura y presión estén dentro de los rangos adecuados para los flujos a usar y los equipos.

Para una mejor comprensión del análisis propuesto al sistema de calentamiento por serpentín, se asumirá una mezcla completa del asfalto circundante al serpentín, esto

fundamentado en que dentro del tanque de producción de asfalto modificado se cuenta con dos mezcladores de paletas.

Figura No. 3.5. Balance de Materiales en la producción de asfalto modificado.



Donde:

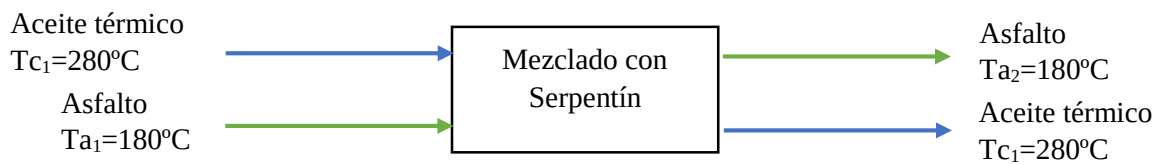
mAC 30: Masa de asfalto virgen

mAM: Masa de asfalto modificado

Pol: Polímero.

APP: Ácido polifosfórico.

Figura No. 3.6. Balance de Energía en la producción de asfalto modificado.



Donde:

Tc1: Temperatura de entrada de aceite térmico (calor cedido)

Tc2: Temperatura de salida de aceite térmico (calor cedido)

Ta1: Temperatura de entrada de asfalto (calor absorbido)

T₂: Temperatura de salida de asfalto (calor absorbido)

El balance de energía para un volumen de control equivalente a la coraza del intercambiador se calcula mediante la ecuación 3.9 (Cengel, 2007):

$$\dot{Q} - \dot{W} = \sum_{salida} \dot{m} \left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right) - \sum_{entrada} \dot{m} \left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right) \quad (\text{Ec. 3.9})$$

$$\Delta h = c_{p,prom}(T_2 - T_1) \quad (\text{Ec. 3.10})$$

Donde:

$\dot{Q}$: Flujo de calor [kJ]

$\dot{W}$: Tasa de trabajo [kJ]

$\dot{m}$: Flujo másico del fluido [kg/s]

h: Entalpía [kJ/kg]

V: Velocidad [m/s]

G: Gravedad [m²/s]

z: Altura [m]

T₂: Temperatura de salida [°C]

T₁: Temperatura de entrada [°C]

El balance de energía para el serpentín del tanque de producción se plantea como el Calor cedido por el asfalto modificado (Q_{ced}) (Cengel, 2007) expresado en la Ec. 3.11:

$$Q_{ced} = m_{AT} * CP_{AT} * \Delta T_{AT} \quad (\text{Ec. 3.11})$$

Donde:

Q_{ced}: Calor cedido por el aceite térmico [kJ]

m_{AT}: Masa del aceite térmico [kg]

CP_{AT}: Calor específico del aceite térmico [Kj/kg*K]

ΔT_{AT}: Diferencia de temperatura de aceite térmico [K]

El siguiente paso es el balance de energía absorbido por el asfalto a ser modificado. El cual consta de la ecuación 3.12 (Cengel, 2007):

$$Q_{abs} = m_{Asfalto} * CP_{Asfalto} * \Delta T_{Asfalto} \quad (\text{Ec. 3.12})$$

Donde:

Q_{abs} : Calor cedido por el aceite térmico [kJ]

$m_{Asfalto}$: Masa del aceite térmico [kg]

$CP_{Asfalto}$: Calor específico del aceite térmico [kJ/kg*K]

$\Delta T_{Asfalto}$: Diferencia de temperatura de aceite térmico [°C]

Finalmente, la eficiencia térmica del tanque de producción se puede calcular mediante la Ec. 3.13:

$$\varepsilon = \frac{Q_{abs}}{Q_{ced}} * 100 \quad (\text{Ec. 3.13})$$

Donde:

ε : Eficiencia térmica [%]

Para considerar la incidencia de pérdidas a través del aislante del tanque con sistema de calentamiento de serpentín, basta con calcular la conducción a través de la pared de dos tubos concéntricos. Basándose en la red de resistencias térmicas puestas en serie. Se considera contacto perfecto entre el fluido y la pared interna del equipo, por lo que este se encuentra a la misma temperatura del fluido.

Se determinan las áreas de las superficies expuestas a convección y se procede a calcular las resistencias mediante las siguientes ecuaciones (Cengel, 2007):

$$R_1 = R_{tubo} = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi k_1 L} \quad (\text{Ec. 3.14})$$

$$R_2 = R_{aislamiento} = \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi k_2 L} \quad (\text{Ec. 3.15})$$

$$R_{total} = R_i + R_1 \quad (\text{Ec. 3.16})$$

$$\dot{Q}_a = \frac{T_{\infty 1} - T_{\infty 2}}{R_{total}} \quad (\text{Ec. 3.17})$$

Donde:

$\dot{Q}_a$: Calor disipado a través del aislante [J/s]

R: Resistencia [W/°C]

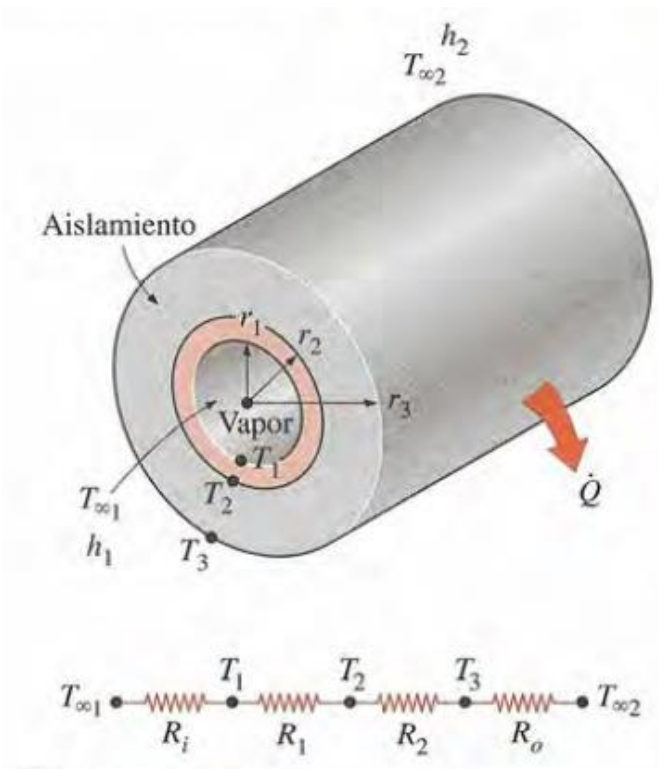
r_1 : Radio interior [m]

r_2 : Radio externo [m]

K: Coeficiente de conductividad [W/m*°C]

L: Longitud de tubería [m]

Figura No. 3.7. Esquema de red de resistencias de una tubería aislada.



Nota. De Transferencia de Calor y Masa, por Cengel Y, (2007).

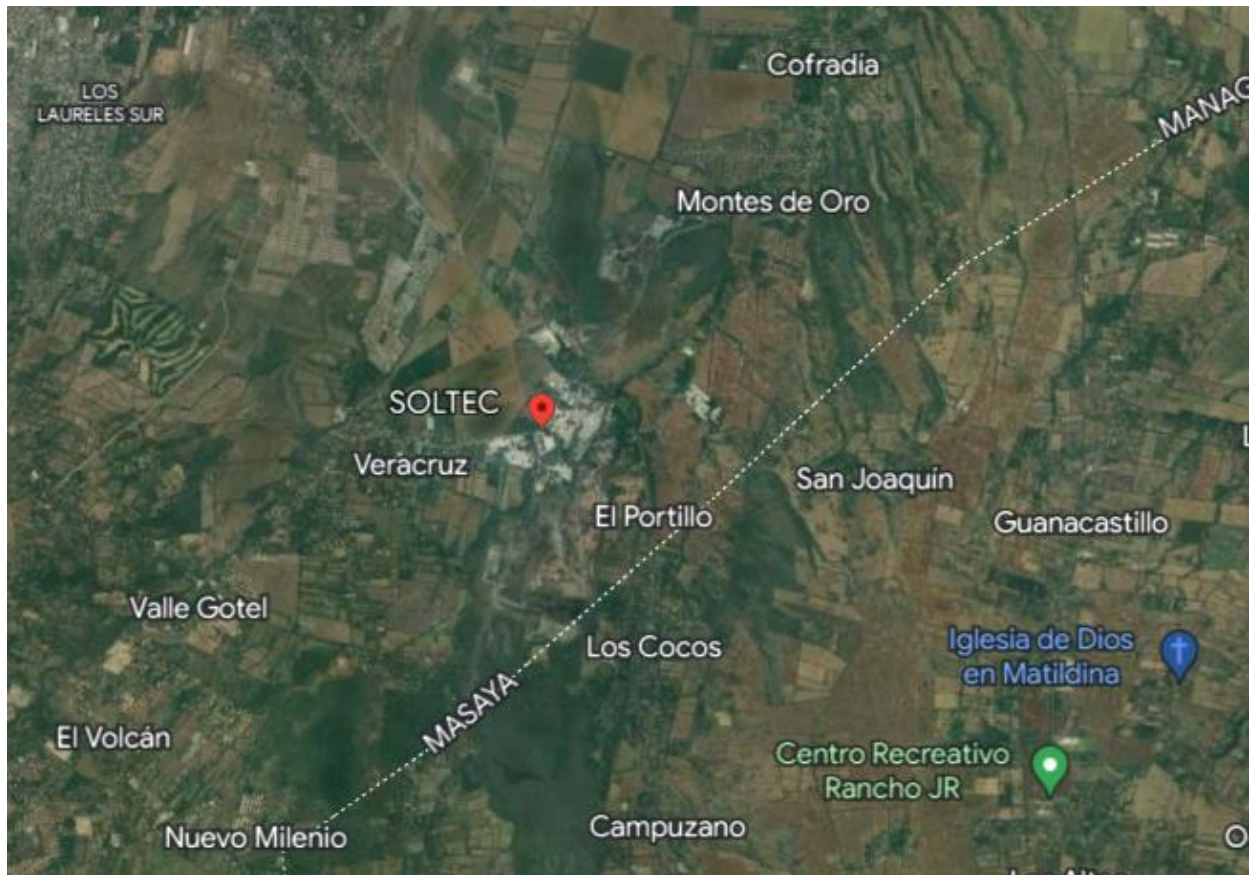
Estas fórmulas son necesarias para determinar el calor perdido por aislantes en los tanques de almacenamiento y precalentamiento, siguiendo el esquema expresado por la Figura No. 3.7.

IV. Metodología.

4.1 Ubicación del estudio

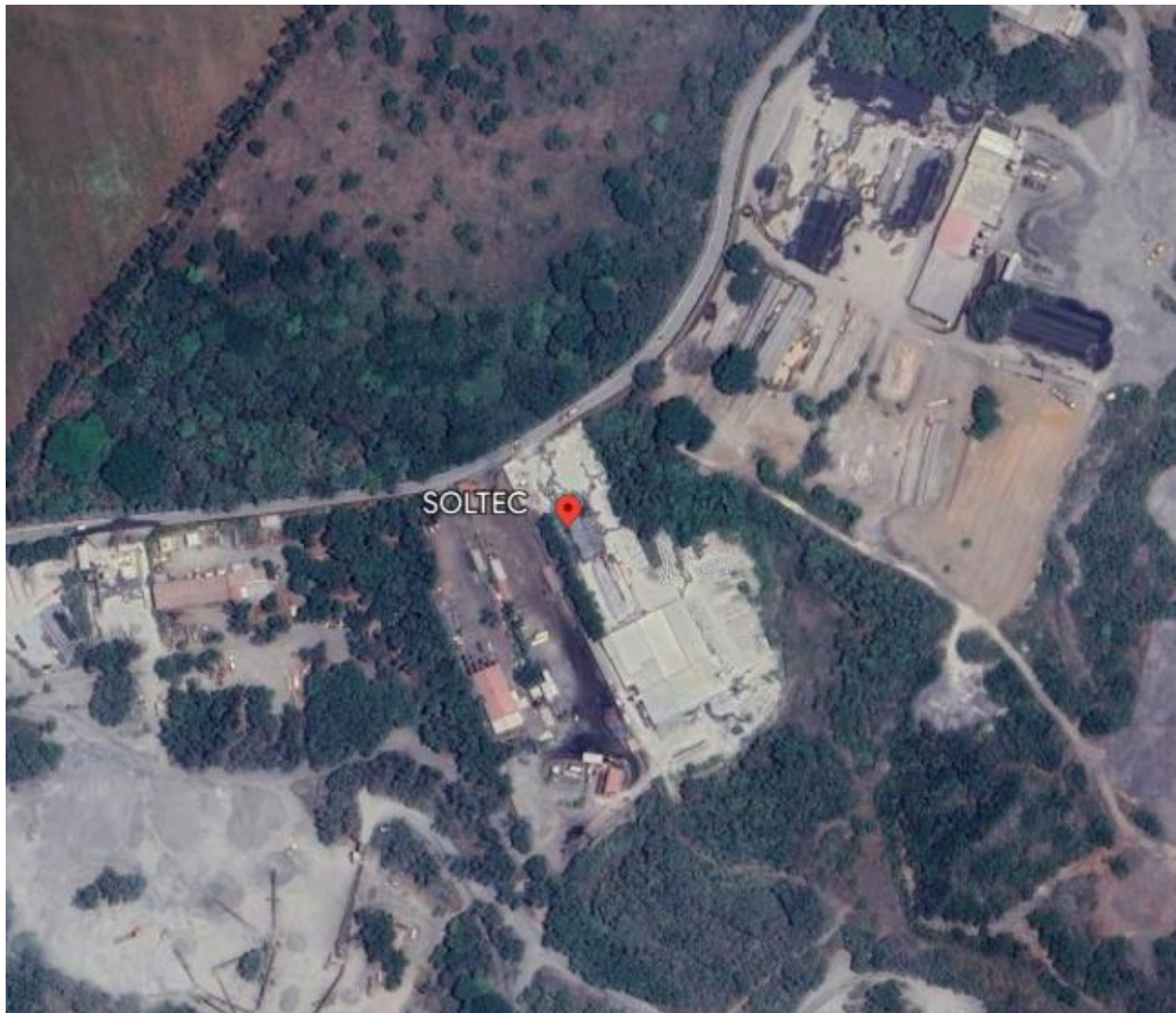
La recolección de datos para cálculos energéticos se realizó en la empresa SOLTEC S.A., ubicada en Veracruz, Km 14 carretera a Masaya 8,5 Km al este, con coordenadas geográficas 12°05'18.8"N 86°08'54.2"W.

Figura No. 4.1: Macrolocalización de la planta SOLTEC S.A.



Nota. De Google Earth.

Figura No. 4.2: Microlocalización de la planta SOLTEC S.A.



Nota. De Google Maps

4.2 Descripción del proceso objeto de estudio.

La elaboración de asfalto modificado por la empresa SOLTEC S.A., se inicia con el proceso de precalentamiento, que consiste en llevar el asfalto virgen hasta una temperatura de 180°C , lo que permite su transferencia hacia al tanque de producción. El tanque de precalentamiento cuenta con un quemador que suministra energía al interior del tanque mediante la combustión de LPG, el inyector de aire y la energía de activación mediante una chispa de piloto.

El siguiente proceso es el mezclado en el tanque de producción, el cual consta de dos mezcladores incorporados y un sistema de calentamiento por serpentín interno para mantener el asfalto a una temperatura de 180°C. A través del serpentín fluye aceite térmico a 280°C. En este tanque se agrega un polímero de tipo EnBA (Elvaloy AS) para modificar las propiedades físicas y reológicas del asfalto. Esta mezcla pasa por un proceso de molienda y reflujo durante un periodo de tres horas, que es el tiempo para la digestión del polímero.

Posterior a la digestión del polímero, se adiciona a la mezcla ácido polifosfórico (APP) y se continua durante una hora con el mezclado, periodo considerado como tiempo de digestión del APP en la mezcla.

De esta manera se finaliza el proceso de elaboración del asfalto modificado y se procede a almacenarse en un tanque, el cual cuenta con sistema de calentamiento por quemador igual que el tanque de precalentamiento que permite calentar el asfalto modificado hasta una temperatura de 180°C para entregar el producto al cliente; sin embargo, se puede dar el caso en que el asfalto modificado se descargue directamente del tanque de producción a una cisterna para su entrega inmediata al cliente.

El proceso de elaboración se da en jornadas de aproximadamente 8 horas, en las que se alcanzan a producir un promedio de dos lotes. La capacidad de producción en la empresa SOLTEC S.A., declarado por la gerencia técnica, es de 10,000 galones por lote.

A partir de esta capacidad (conforme solicitudes de los clientes) los lotes procesados con mayor frecuencia son de 5,000 y 7,000 galones.

En el presente trabajo, los lotes que fueron evaluados son los de 5,000 galones, siendo esta la base de cálculos del presente estudio.

Precalentamiento: Objetivo calentar asfalto virgen hasta 180°C mediante combustión de LPG.

Mezclado: Objetivo mezclar asfalto virgen con polímeros manteniendo la temperatura en 180°C mediante intercambio de calor con aceite térmico.

Almacenamiento: Objetivo calentar asfalto virgen hasta 180°C mediante combustión de LPG, en caso de sufrir

Humos

Qcomb

Qabsorbido
Asfalto modificado
T = 180 C

Qcedido
Aceite térmico
Te = 280 C

Asfalto modificado
T = 180 C

Terminó el tiempo de digestión

ALMACENAMIENTO

Humos

Qcomb

Asfalto modificado
T = 180 C

Fin

Aceite térmico
Ts = ?

4.3 Determinación de los requisitos energéticos

Se tomaron valores de temperatura en líneas de tuberías entrante a los tanques en áreas con el menor recubrimiento de aislante posible, utilizando un termómetro infrarrojo.

4.4 Cálculo del requerimiento térmico por calentamiento de tanques de precalentamiento/almacenamiento y producción de asfalto modificado en la empresa SOLTEC S.A.

4.4.1 Recopilación de la información

Para la determinación de requerimiento energético en tanques de precalentamiento y almacenamiento de la empresa SOLTEC S.A. se utilizaron las temperaturas de inicio y final de proceso de precalentamiento y producción; a su vez se estipuló una carga de asfalto de 5,000 galones como en el resto de cálculos realizados. Se utilizaron los datos expresado en la Tabla No. 4.1.

Tabla No 4.1: Datos recolectados e instrumentos de recolección en tanques de mezclado de la empresa SOLTEC S.A para la determinación de requerimiento energético de estos.

Indicadores	Instrumentos
Gastos máxicos de asfalto	Balanza
Temperatura de salida de asfalto	Termómetro infrarrojo. Marca Fluke, Model 59 MAX+
Temperatura de salida de aceite térmico	Termómetro infrarrojo. Marca Fluke, Model 59 MAX+
Temperatura de entrada de asfalto	Termómetro infrarrojo. Marca Fluke, Model 59 MAX+
Temperatura de entrada de aceite térmico	Termómetro infrarrojo. Marca Fluke, Model 59 MAX+

Para calcular el requerimiento térmico del tanque de precalentamiento, se utilizó la ecuación 3.12, donde la temperatura inicial del asfalto es 140°C y la final 180°C.

Para calcular el requerimiento térmico del tanque de producción, se utilizó la ecuación 3.12. Se realizó una serie de 15 mediciones, pertenecientes a 3 lotes de producción y tomadas continuamente cada 30 minutos, para obtener resultados más acertados. Instrumentos utilizados se muestran en la Figura No 4.4. y Figura No. 4.5.

Figura No. 4.4. Termómetro Fluke.



Figura No. 4.5. Termómetro fijo en tanques.



4.4.2 Métodos

Debido a que en la empresa SOLTEC S.A. no se mide el consumo de combustible, el requerimiento energético de los tanques de precalentamiento/almacenamiento y producción de la empresa SOLTEC S.A. se determinó realizando un balance energético mediante la ecuación 3.12, utilizando temperaturas inicial y final deseadas de asfalto modificado.

$$Q_{abs} = m_{Asfalto} * CP_{Asfalto} * \Delta T_{Asfalto} \quad (\text{Ec. 3.12})$$

4.5 Determinación del rendimiento térmico de la combustión del quemador en tanques de almacenamiento de la planta de producción de asfalto modificado en la empresa.

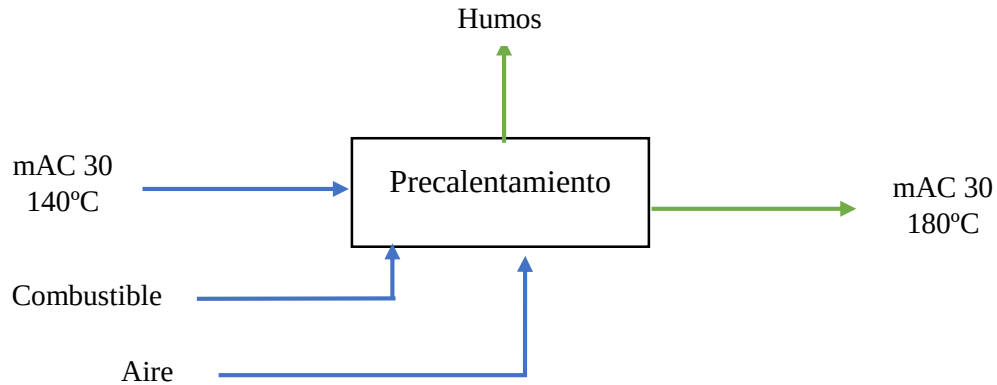
4.5.1 Recopilación de la Información

Con la colaboración de Puma Energy se realizó monitoreo de gases de chimenea de tanque de almacenamiento de la empresa SOLTEC S.A., para dar respuesta al segundo objetivo, el cual persigue determinar el rendimiento térmico de la combustión presentada en los tanques de precalentamiento y almacenamiento de la empresa SOLTEC S.A. Este análisis es sumamente importante, ya que la combustión es el mecanismo de calentamiento de dichos tanques.

4.5.2 Métodos

Se realizó un balance energético. Se ilustran entradas y salidas a sistema mediante la Figura No.4.6 y la Figura No. 4.7:

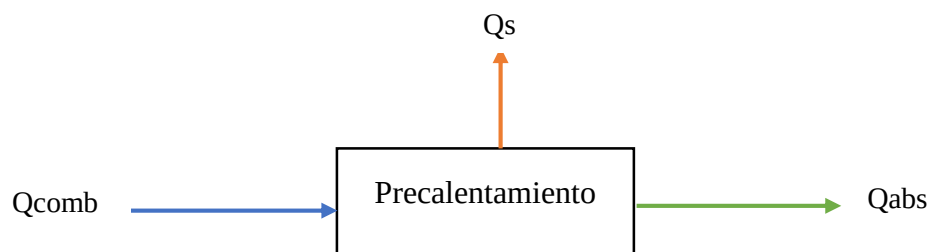
Figura No. 4.6. Balance de Materiales en el precalentamiento y almacenamiento de asfalto virgen.



Dónde:

mAC 30: Masa de asfalto virgen.

Figura No. 4.7. Balance de Energía en el precalentamiento y almacenamiento de asfalto virgen.



Donde:

Q_{comb} : Calor del combustible

Q_s : Pérdidas de calor

Q_{abs} : Calor absorbido por el asfalto

Se realizaron mediciones de gases de chimenea del tanque de precalentamiento y almacenamiento. Se utilizó un analizador de gases de combustión Testo 300 Longlife (O₂, CO, CO₂, sensor de NO y NO_x). Con la composición de gases de combustión y temperatura de chimenea se estimó el rendimiento térmico de los tanques de precalentamiento y almacenamiento. Se utilizaron las ecuaciones 3.7 y 3.8.

$$E_{LHV} = [100 - (0,04266 + 0,000340 * EA)(T_s - T_a)] \left(\frac{100}{100 + Q_L} \right) \quad (\text{Ec. 3.7})$$

$$EA = \frac{91.2 * \%O_2}{20.95 - \%O_2} \quad (\text{Ec. 3.8})$$

4.6 Evaluación de la eficiencia térmica de los equipos de calentamiento implicados en la producción de asfalto modificado en la empresa SOLTEC S.A.

4.6.1 Recopilación de Información

Se desarrollaron balances de energía para el cálculo de la eficiencia térmica del serpentín utilizado en el tanque de producción de asfalto modificado. Las ecuaciones utilizadas fueron:

$$Q_{ced} = m_{AT} * CP_{AT} * \Delta T_{AT} \quad (\text{Ec. 3.11})$$

$$Q_{abs} = m_{Asfalto} * CP_{Asfalto} * \Delta T_{Asfalto} \quad (\text{Ec. 3.12})$$

$$\varepsilon = \frac{Q_{abs}}{Q_{ced}} * 100 \quad (\text{Ec. 3.13})$$

Para esto fueron necesarios los parámetros recopilados en la Tabla No. 4.2:

Tabla No. 4.2: Datos requeridos e instrumentos utilizados en tanque de mezclado de la empresa SOLTEC S.A. para la determinación del rendimiento térmico de dicho tanque.

Indicadores	Instrumentos / Fuente
Calor específico de aceite térmico	Bibliografía
Masa de aceite térmico	Consulta a la empresa SOLTEC S.A.
Temperatura de entrada del asfalto	Termómetro infrarrojo. Marca Fluke, Model 59 MAX+
Temperatura de entrada del aceite térmico	Termómetro infrarrojo. Marca Fluke, Model 59 MAX+
Temperatura de salida del asfalto	Termómetro infrarrojo. Marca Fluke, Model 59 MAX+
Temperatura de salida del aceite térmico	Termómetro infrarrojo. Marca Fluke, Model 59 MAX+
Calor específico del asfalto	Bibliografía

4.6.2 Métodos

La eficiencia del tanque de mezclado se determinó mediante datos de calor específico del aceite térmico, masa de aceite térmico recirculada, temperatura inicial y final del aceite térmico, masa de asfalto a calentar, calor específico del asfalto y temperatura final e inicial del mismo. Se utilizaron balances de energía mediante las ecuaciones 3.9, 3.10 y 3.11.

4.7 Estimación de pérdidas energéticas a través del aislante de los tanques de precalentamiento/almacenamiento y producción de SOLTEC S.A.

4.7.1 Recopilación de la Información

Para dar respuesta al cuarto objetivo específico de esta investigación, se recopilaron los datos expresados en la Tabla No. 4.3 en los tanques de almacenamiento y producción de asfalto modificado en la empresa SOLTEC S.A.

Tabla No. 4.3: Datos a recolectar e instrumentos de recolección en tanques de la empresa SOLTEC S.A. para la estimación de las pérdidas energéticas.

Indicadores	Instrumentos
Temperatura interna de tanque de almacenamiento	Dial thermometer
Temperatura externa de tanque de almacenamiento	Termómetro infrarrojo. Marca Fluke, Model 59 MAX+
Temperatura interna de tanque de producción	Dial thermometer
Temperatura externa de tanque de producción	Termómetro infrarrojo. Marca Fluke, Model 59 MAX+

4.7.2 Métodos

Las pérdidas a través del aislante se determinaron tanto para el tanque de almacenamiento, como para el tanque de producción; así mismo se utilizaron las ec. (3.14) – (3.17). Se asumió contacto perfecto entre el asfalto dentro de los tanques con la pared interna de estos equipos.

$$R_1 = R_{tubo} = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi k_1 L} \quad (\text{Ec. 3.14})$$

$$R_2 = R_{aislamiento} = \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi k_2 L} \quad (\text{Ec. 3.15})$$

$$R_{total} = R_i + R_1 \quad (\text{Ec. 3.16})$$

$$\dot{Q}_a = \frac{T_{\infty 1} - T_{\infty 2}}{R_{total}} \quad (\text{Ec. 3.17})$$

4.8 Materiales a utilizar

En la Tabla No. 4.4 se presenta un resumen de los equipos y materiales utilizados para dar respuestas a los objetivos planteados en este estudio.

Tabla No. 4.4: Resumen de equipos y materiales utilizados en la recolección de datos del presente estudio.

Equipos y materiales
Balanza
Termómetro infrarrojo. Marca Fluke, Model 59 MAX+
Dial thermometer (ubicado en cada tanque).
Testo 300 Longlife (O ₂ , CO, CO ₂ , sensor de NO y NOX)
Cronómetro

V. Análisis y discusión de resultados

En esta sección se presentarán y analizarán los resultados de las mediciones y cálculos realizados.

Objetos de análisis:

Se seleccionaron tres lotes de 5,000 galones de asfalto virgen a ser modificado. Cada lote presentó condiciones de inicio diferentes, ya que no se cuenta con una operación estandarizada en la empresa SOLTEC S.A. Los tiempos de precalentamiento y producción varían de acuerdo a las condiciones iniciales. A continuación, se detallan dichas condiciones en la Tabla No. 5.1:

Tabla No. 5.1: Descripción de lotes de precalentamiento y producción de asfalto modificado donde se observan las principales diferencias entre lotes.

Número de lote	Condiciones iniciales de lote	Descripción de proceso al que fue sometido
Lote 1	Temperatura Inicial: 154 °C Volumen: 5,000 gal	Sometido a precalentamiento para luego pasar al proceso de producción.
Lote 2	Temperatura inicial: 181 °C Volumen: 5,000 gal	Sometido a proceso de producción, ya se encontraba a temperatura óptima cuando se inició el proceso.
Lote 3	Temperatura inicial: 157 °C Volumen: 5,000 gal	Sometido a precalentamiento y producción en el mismo tanque.

Los lotes 1 y 3 cumplieron con la etapa de precalentamiento y producción, sin embargo, el lote 3 se precalentó en el mismo tanque de producción (sistema de calentamiento por serpentín) en el que luego se incorporó el EnB-A; mientras que el lote 1 se precalentó en el tanque de precalentamiento (sistema de calentamiento por quemador) y alcanzada su temperatura deseada se transfirió al tanque de producción.

El lote 2 no requirió de una etapa de precalentamiento debido a que ya se encontraba a temperatura óptima para el inicio de la producción.

5.1 Cálculo del requerimiento térmico por calentamiento de tanques de almacenamiento y producción de asfalto modificado en la empresa SOLTEC S.A.

Para el cálculo de requerimiento energético se utilizaron los siguientes valores de referencia obtenidos del Apéndice 1 de Transferencia de Calor y Masa (Cengel, 2007):

- m_{asfalto} : Masa de asfalto. Esta se estimó de acuerdo a densidad del asfalto referida por Cengel (2007), $\rho = 2,115 \text{ kg/m}^3$ y al volumen conocido por lote de asfalto ($5,000 \text{ gal} \approx 18.9271 \text{ m}^3$), de manera que se obtuvo una masa de asfalto de $40,026.50 \text{ kg}$ por despeje.
- $C_{p\text{asfalto}}$: Calor específico del asfalto. Se utilizó el propuesto por Cengel (2007), $0.920 \text{ KJ/kg}\cdot\text{K}$.
- Las temperaturas de inicio y fin de etapa de precalentamiento utilizados para los cálculos de requerimiento energético fueron 140°C y 180°C , respectivamente. Esto por lo antes mencionado de variabilidad de condiciones de iniciales, por lo que se consideró la aproximación más severa muestreada (180°C).
- Las temperaturas de inicio y fin de etapa de producción se recolectaron mediante mediciones de temperatura de termómetro de caratula de tanque de producción.

Se realizaron balances energéticos con los datos anteriormente mencionados, mostrados a continuación:

$$Q_{abs} = m_{\text{Asfalto}} * C_{P\text{Asfalto}} * \Delta T_{\text{Asfalto}} \quad (\text{Ec. 3.10})$$

Para el tanque de precalentamiento se realizó el siguiente desarrollo de la ecuación 3.10:

$$Q_{abs} = 40,026.5 \text{ kg} * (0.920 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} * \text{K}) * (40 \text{ K})$$
$$Q_{abs} = 1,472,975 \text{ kJ} = 1,473 \text{ MJ}$$

Para el desarrollo del cálculo de requerimiento térmico del tanque de producción se recolectaron 15 mediciones de temperatura del asfalto modificándose en los tres lotes analizados. El resumen de los datos de temperatura de asfalto modificado obtenidos se presenta en la Tabla No. 5.2:

Tabla No. 5.2: Temperaturas iniciales y finales en tanque de producción durante la elaboración de asfalto modificado.

	Lote 1	Lote 2	Lote 3
Temperatura inicial (°C)	178	181	157
Temperatura final (°C)	187	184	188

Se calculó el requerimiento térmico en el tanque de producción mediante la ecuación 3.10. Se muestra a continuación el desarrollo de esta para obtención de resultados.

Lote 1

$$Q_{abs} = m_{Asfalto} * CP_{Asfalto} * \Delta T_{Asfalto}$$

$$Q_{abs} = 40,026.50 \text{ kg} * 0.920 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * \text{K}} * 9 \text{ K}$$

$$Q_{abs} = 331,419 \text{ kJ} = 331 \text{ MJ}$$

Lote 2

$$Q_{abs} = 40,026.50 \text{ kg} * 0.920 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * \text{K}} * 3 \text{ K}$$

$$Q_{abs} = 110,473 \text{ kJ} = 110 \text{ MJ}$$

Lote 3

$$Q_{abs} = 40,026.50 \text{ kg} * 0.920 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * \text{K}} * 31 \text{ K}$$

$$Q_{abs} = 1,141,556 \text{ kJ} = 1,142 \text{ MJ}$$

Tabla No. 5.3: Requerimientos energéticos de tanque de producción de asfalto modificado.

Producción				
Unidades		Lote 1	Lote 2	Lote 3
MJ		331	110	1,142
Observaciones		La temperatura inicial de esta etapa fue de 178°C.	La temperatura inicial de esta etapa fue de 181°C.	La temperatura inicial de esta etapa fue de 157°C.
		La temperatura final de esta etapa fue de 187°C.	La temperatura final de esta etapa fue de 184°C.	La temperatura final de esta etapa fue de 188°C.

A partir de estos resultados expresado en la Tabla No.5.3, se observó el impacto energético de la falta de estandarización del proceso. Observándose un notable incremento en el Lote 3, el cual se precalentó y produjo en el mismo tanque (tanque de producción) con una temperatura de inicio de 154°C. También es notable el bajo requerimiento energético del segundo lote, el cual ingresó a la planta con una temperatura inicial de 181°C y se produjo posterior a la culminación del Lote 1, encontrando el tanque producción con mayor temperatura que en los Lotes 1 y 3.

Estos valores son de mucha ayuda para dar visibilidad a la necesidad de estandarizar los tiempos y ruta de producción a seguir. Se observó que es más eficiente producir lotes consecutivos en un mismo día (caso del Lote 1 y Lote 2) que realizar solo uno por día. Y se identificó a su vez que el precalentar el asfalto virgen en el mismo tanque en el que se llevará a cabo la producción, si bien se estima como el requerimiento más alto presentado por los lotes evaluados, es una estimación para ambas etapas (precalentamiento y producción) menor a la suma de las dos etapas de los otros lotes considerados.

5.2 Determinación del rendimiento térmico de la combustión del quemador en tanques de almacenamiento de la planta de producción de asfalto modificado en la empresa.

Se procedió como se indicó en la metodología por lo que se utilizó un analizador de gases de chimenea (Testo 340) y con esta medición se calculó el rendimiento térmico en base a exceso de O₂ y temperatura de chimenea.

Figura No. 5.1. Medición de composición de gases de combustión.



Figura No. 5.2: Analizador de gases de combustión Testo 340.



En la Figura No. 5.1 se observa el análisis de gases de combustión realizado por el Ing. José Meza, Ingeniero de Conservación Energética de la empresa Puma Energy. El equipo utilizado se muestra en la Figura No. 5.2, se trata de un analizador de gases de combustión en base seca capaz de medir O₂, CO, NOx en los gases de combustión.

Se utilizó la ecuación 3.7, la cual relaciona el exceso de oxígeno, la temperatura de chimenea y la temperatura ambiente. Esta se muestra a continuación:

$$E_{LHV} = [100 - (0,04266 + 0,000340 * EA)(T_s - T_a)] \left(\frac{100}{100 + Q_L} \right)$$

(Ec. 3.7)

Donde el EA es el exceso de aire, calculado de la siguiente manera:

$$EA = \frac{91.2 * \%O_2}{20.95 - \%O_2} \quad (\text{Ec. 3.8})$$

El factor Q_L utilizado en la Ec. 3.7 está relacionado con el Q_{abs} por el asfalto mediante la siguiente relación:

$Q_L = 1$ si $Q_{abs} > 100$ MBTU/hr.

$Q_L = 2$ si $15 \text{ MBTU/hr} > Q_{abs} < 100 \text{ MBTU/hr}$.

$Q_L = 3$ si $Q_{abs} < 15 \text{ MBTU/hr}$.

Se realizaron 3 mediciones de $\%O_2$ en la chimenea, de las cuales se obtuvo un promedio de 1.3%. El exceso de oxígeno objetivo es particular para cada equipo de combustión, por esta razón es necesario realizar una prueba de mínimo oxígeno (llevar el equipo a una condición controlada cerca del ahogo) y compararlo a lo obtenido con el Testo 340.

Mediante el dato de exceso de oxígeno se obtuvo un factor de exceso de aire (EA) de 6%. Se utilizaron las temperaturas de chimenea y de ambiente también medidas por el analizador de gases Testo, cuyos promedios fueron 316 °C y 33 °C, respectivamente.

Sustituyendo en la Ec. 3.7 se desarrolló:

$$E_{LHV} = [100 - (0,04266 + 0,000340 * 6\%)(316^{\circ}C - 33^{\circ}C)] \left(\frac{100}{100 + 3} \right)$$

Finalmente, se obtuvo un resultado de rendimiento aproximado de combustión del tanque de precalentamiento de:

$$\text{Rendimiento} = 85.4\%$$

El resultado es un dato de magnitud alta, si lo comparamos con el rendimiento típico para calderas y hornos que combustionan gas, el cual es de 79% - 85% para propano (que es el componente mayoritario del LPG), determinado por el indicador de Eficiencia por Consumo de Combustible Anual o AFUE por sus siglas en inglés (Annual Fuel Utilization Efficiency) (American Standard Heating and Air Conditioning, 2004).

Esto está sujeto a interpretación ya que se midieron otros componentes de gases de chimenea e indicaron hasta 60,000 ppm de CO, lo que significa que existe una combustión incompleta y poco satisfactoria, tomando como referencia que el valor máximo típico de CO debería de ser 50 ppmvd (ASME PTC 4, 2008). Estas altas concentraciones medidas no solamente implican un mal rendimiento energético, sino que pone en riesgo a los operadores de la planta.

La ecuación utilizada para el cálculo de rendimiento es muy precisa cuando se tiene una buena combustión en los equipos (utilizada como parte del Global Energy Management System de la industria petrolera), cabe mencionar que por los pocos datos con los que se cuenta, esta ecuación resulta bastante favorecedora. Pero basado en el valor obtenido de CO en los gases de combustión podemos dimensionar que el equipo presenta mala combustión y el rendimiento obtenido no es consecuente con las condiciones observadas. Por lo que se requiere un estudio a profundidad tanto de diseño de este equipo como de las condiciones requeridas por el proceso para garantizar eficiencia y seguridad.

Mediante los datos obtenidos del primer y segundo objetivo específico, se desarrolló un balance de energía para conocer el calor suministrado para el proceso de combustión de tanque de precalentamiento. Se relacionó el rendimiento de 85.4% de la combustión del quemador, con los 1,472.9 MJ requeridos para precalentar el asfalto virgen de 140°C a 180°C. Asumiendo un 10% de pérdidas en la combustión, se calcula mediante proporcionalidad de magnitudes que estas son equivalentes a 163.7 MJ.

Por lo tanto, el 85.4% del rendimiento equivale a un calor neto de 1636.6 MJ. Por proporcionalidad de magnitudes se estima que el calor suministrado por el combustible si este se quemara completamente sería de 1916.4 MJ.

Esto se puede observar mejor mediante la siguiente expresión:

$$Q_{combustión} = Q_{absorbido} + Q_{pérdidas} = 1472.9MJ + 163.7MJ$$

$$Q_{combustión} = 1636.7MJ$$

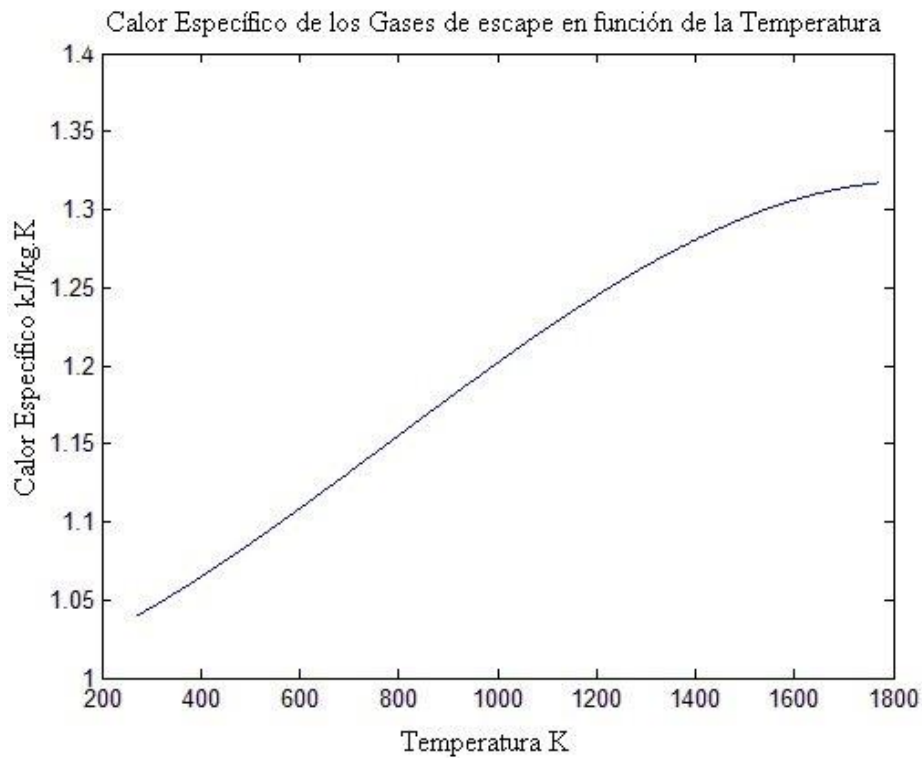
$$Q_{combustible} = 1,916.4 MJ$$

Mediante la estimación de calor perdido a través de los humos (gases de combustión), se realizó un balance directo de masa a través de la ecuación 3.6:

$$Q_S = m_{humo} * cp_{humo} * (T_{humo} - T_{aire}) \quad (Ec. 3.6)$$

Se cuenta con el calor de pérdidas y la diferencia de temperaturas de los gases de combustión y temperatura ambiente. Se utilizó el calor específico del aire gases de escape para una temperatura de 600 K a partir de la Figura No. 5.3. Esta temperatura se determinó por la conversión de los 316°C de temperatura promedio detectada por el Analizador de Oxígeno Testo. La conversión de esta temperatura es 589.15 K.

Figura No. 5.3: Calor específico de los gases de combustión en función de la temperatura.



Nota. De *Análisis energético, exergético y económico de un sistema de cogeneración: Caso para una planta azucarera de San Pablo*, por Llerena, O, (Revista INGENIUS, 2018).

El calor específico para gases de combustión es de 1.1 KJ/kg*K. Por despeje de la ecuación 3.6 se calcula la masa de humos:

$$m_{humos} = \frac{Q_s}{cp_{humo} * (T_{humo} - T_{aire})}$$

$$m_{humos} = \frac{163,663.9 \text{ kJ}}{1.1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * \text{K}} * (589.15 \text{ K} - 308.15 \text{ K})}$$

$$m_{humos} = 529.48 \text{ kg}$$

A partir del dato de requerimiento energético de la combustión en el proceso de precalentamiento y del poder calorífico promedio del LPG expresado por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico del Gobierno de España, se determinó la masa de combustible consumida.

$$Q_{combustible} = m_{LPG} * PCI$$

$$m_{LPG} = \frac{Q_{neto}}{PCI} = \frac{1,916,439 \text{ kJ}}{46.37 \text{ kJ/kg}}$$

$$m_{LPG} = 41,329.3 \text{ kg}$$

El total de combustible consumido en masa para el proceso de combustión (utilizando calor estimado total suministrado) es de 41,329.3 kg.

5.3 Evaluación de la eficiencia térmica de los equipos de calentamiento implicados en la producción de asfalto modificado en la empresa SOLTEC S.A.

En la Tabla No. 5.4 se encuentran los valores utilizados para la evaluación de la eficiencia térmica en los equipos de producción y almacenamiento de la empresa SOLTEC S.A.

Tabla No. 5.4: Datos de propiedades físicas del AC30.

Indicador	Valor
Calor específico [KJ/kg*K]	0.920
Densidad [kg/m3]	2,110
Masa de asfalto [kg]	39,936

Se utilizó el calor específico del aceite térmico del Apéndice A del libro de Transferencia de Calor y Masa de (Cengel Y., 2007), el cual es 2.441 KJ/kg*K. A su vez, mediante investigación del modelo de la bomba, se determinó que el flujo volumétrico promedio de aceite térmico es de 40 m³/h. El flujo másico se obtuvo por despeje utilizando la gravedad específica del aceite térmico (proporcionado por SOLTEC) para encontrar la densidad del aceite térmico. En la tabla 5.5 se puede observar el resumen de lo antes descrito:

Tabla No. 5.5: Datos de propiedades físicas del Aceite térmico

Indicador	Valor
Calor específico [kJ/kg*K]	2.441
Gravedad específica	0.8103
Densidad [kg/m ³]	810.3
Flujo asumido [m ³ /h]	40
Flujo másico [kg/h]	32,412
Tiempo de producción lote [h]	4
Masa/lote [kg]	129,648

Mediante balances de energía se estimó que el Q_{ced} por el aceite térmico (Ec. 3.11). A su vez, por los indicadores energéticos ya conocidos del asfalto (C_p , m) y las mediciones de variaciones de temperatura se calculó el Q_{abs} (Ec. 3.12).

Lote 1

$$Q_{ced} = m_{AT} * C_{P_{AT}} * \Delta T_{AT}$$

$$Q_{ced} = 129,648 kg * 2.441 \frac{kJ}{kg * K} * (553.15 K - 523.15)$$

$$Q_{ced} = 9,494,123.0 kJ = 9,494.1 MJ$$

$$Q_{abs} = m_{Asfalto} * C_{P_{Asfalto}} * \Delta T_{Asfalto}$$

$$Q_{abs} = 40,026.50 kg * 0.920 \frac{kJ}{kg * K} * 9 K$$

$$Q_{abs} = 331,419 kJ = 331 MJ$$

Lote 2

$$Q_{ced} = m_{AT} * C_{P_{AT}} * \Delta T_{AT}$$

$$Q_{ced} = 129,648 kg * 2.441 \frac{kJ}{kg * K} * (553.15 K - 530.15)$$

$$Q_{ced} = 7,278,827.7 kJ = 7,278.8 MJ$$

$$Q_{abs} = 40,026.50 kg * 0.920 \frac{kJ}{kg * K} * 3 K$$

$$Q_{abs} = 110,473 kJ = 110 MJ$$

Lote 3

$$Q_{ced} = m_{AT} * CP_{AT} * \Delta T_{AT}$$
$$Q_{ced} = 129,648 kg * 2.441 \frac{kJ}{kg * K} * (553.15 K - 528.15)$$

$$Q_{ced} = 11,867,653.8 kJ = 11,867.65 MJ$$

$$Q_{abs} = 40,026.50 kg * 0.920 \frac{kJ}{kg * K} * 31 K$$

$$Q_{abs} = 1,141,556 kJ = 1,142 MJ$$

Relacionando Q_{abs} con Q_{ced} , se obtuvo la eficiencia de cada lote (Ec. 3.13). Se muestran en la Tabla No. 5.6 los resultados.

Lote 1

$$\varepsilon = \frac{Q_{abs}}{Q_{ced}} * 100 = \frac{9,494.1 MJ}{331.4 MJ}$$

$$\varepsilon = 3.49\%$$

Lote 2

$$\varepsilon = \frac{Q_{abs}}{Q_{ced}} * 100 = \frac{7,278.8 MJ}{110,5 MJ}$$

$$\varepsilon = 1.52\%$$

Lote 3

$$\varepsilon = \frac{Q_{abs}}{Q_{ced}} * 100 = \frac{11,867.7 MJ}{1,141.6 MJ}$$

$$\varepsilon = 9.62\%$$

Tabla No. 5.6: Rendimiento térmico de tanque de producción de la empresa SOLTEC S.A.

	Lote 1	Lote 2	Lote 3
Qced (MJ)	9,494.12	7,278.83	11,867.65
Qabs (MJ)	331.42	110.47	1,067.91
Rendimiento térmico	3.49%	1.52%	9.00%

Como se observa en la Tabla No.5.6, estos son valores muy bajos de eficiencia (comparado a 80-90% de eficiencia en calentadores determinado por el indicador de Eficiencia por Consumo de Combustible Anual o AFUE por sus siglas en inglés), aunque se debe recordar que estos cálculos se hicieron con estimados de flujo másico de aceite térmico, así como de su calor específico. Se requieren indicadores de flujo y chequeo de una muestra de aceite térmico para determinar su calor específico (cp) real.

La baja eficiencia térmica calculada del calentamiento en tanques de producción es consecuente con las condiciones observadas en la planta de producción. La baja eficiencia se ve influenciada por la falta de estandarización del proceso, la falta de información del medio dador de calor (aceite caliente) y la falta de medición de flujos son determinantes en los resultados obtenidos. Si bien los datos obtenidos son una aproximación, nos dan una idea de lo que puede ser mejorado a fin de mejorar eficiencia disminuyendo consumo de combustible y de costos.

El calentador de aceite térmico que cede calor a través del sistema de serpentín al asfalto modificado, está fuera de alcance esta metodología.

5.4 Estimación de pérdidas energéticas a través del aislamiento de los tanques de almacenamiento y producción de SOLTEC S.A.

Para la estimación de pérdidas energéticas a través del aislamiento de los tanques de almacenamiento y producción se requirió del desarrollo de serie de resistencias, como se muestra en Fig. No. 3.5. El material planteado para los tanques es Carbon Steel 0.5% cédula 40 de una pulgada de espesor. A continuación, se encuentran tres pulgadas de fibra de vidrio y finalmente una lámina de aluminio de una pulgada por encima del aislante.

$$R_1 = R_{tubo} = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi k_1 L} \quad (\text{Ec. 3.14})$$

$$R_2 = R_{aislamiento} = \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi k_2 L} \quad (\text{Ec. 3.15})$$

$$R_{total} = R_i + R_1 \quad (\text{Ec. 3.16})$$

$$\dot{Q}_a = \frac{T_{\infty 1} - T_{\infty 2}}{R_{total}} \quad (\text{Ec. 3.17})$$

Los resultados obtenidos fueron los mostrados en la Tabla No.5.7 y Tabla No.5.8:

Tabla No. 5.7: Pérdidas energéticas a través de aislante en tanques de precalentamiento y almacenamiento de la empresa SOLTEC S.A.

Calentamiento	Lote 1		
Unidades	Total	Conducción	Radiación
kJ	819.16	816.22	2.94

Tabla No. 5.8: Pérdidas energéticas a través de aislante en tanque de producción de la empresa SOLTEC S.A.

Producción			
Unidades	Lote 1	Lote 2	Lote 3
Total kJ	900.94	869.05	1,305.47
Conducción	831.24	812.60	1,167.90
Radiación	69.70	137.57	137.57

Para el cálculo de estos resultados no se consideró la transferencia de calor por convección del viento sobre la superficie de los tanques por la similitud entre la temperatura de la antes mencionada y la temperatura ambiente. Se consideraron pérdidas por radiación mediante la ecuación de Ley de Stefan-Boltzmann. Teniendo en cuenta estos factores y constando que la temperatura máxima de superficies fue de 49.7°C cuando el producto dentro del tanque se encontraba a una temperatura de 188°C, se concluye en que estos tanques cuentan con buen aislamiento que no representa una pérdida energética significativa y tampoco sobrepasa los 140°F de temperatura de superficie establecida por la UNE (Asociación Española de Normalización) de como medida de seguridad ocupacional (IEC 61010-1,2010).

VI. Conclusiones

1. Se calcularon los requerimientos térmicos de tanques de precalentamiento y producción. Siendo el requerimiento de tanque de precalentamiento 1,473 MJ y los requerimientos según lotes de producción varían entre 110 MJ y 1,142, siendo evidente una falta de estandarización en el proceso. Los requerimientos dependen de las condiciones iniciales tanto para la etapa de precalentamiento como para la de producción.
2. Existe una combustión incompleta y poco satisfactoria en el quemador del tanque de precalentamiento de asfalto modificado, tomando como referencia que el valor máximo típico de CO debería de ser 50 ppmvd (ASME PTC 4, 2008) y comparándolo con los 60,000 ppmvd de CO registradas por el Testo 340. Estas altas concentraciones censadas no solamente implican un mal rendimiento energético, sino que pone en riesgo a los operadores de la planta.
3. El rendimiento térmico de serpentín de tanque de producción dio como resultado valores menores a 10%, muy bajos comparados a 80-90% de eficiencia en calentadores determinado por el indicador de Eficiencia por Consumo de Combustible Anual o AFUE por sus siglas en inglés. Aunque se debe recordar que estos cálculos se hicieron con estimados de flujo másico de aceite térmico. El bajo rendimiento se ve influenciado por la falta de estandarización del proceso, la falta de información del medio dador de calor (aceite caliente) y la falta de medición de flujos son determinantes en los resultados obtenidos. Si bien los datos obtenidos son una aproximación, nos dan una idea de lo que puede ser mejorado a fin de mejorar eficiencia disminuyendo consumo de combustible y de costos.
4. El sistema de aislamiento en los tanques de la empresa SOLTEC S.A., se encuentra en óptimas condiciones de acuerdo a los cálculos de pérdidas energéticas realizados y de acuerdo a estándares plasmados por la UNE en la IEC 61010-1 referente a protección personal de los trabajadores.

5. Durante el desarrollo de este trabajo monográfico, se encontraron puntos de mejora a mencionarse en el siguiente acápite, en los que se deberá trabajar para optimizar la producción y con ello mejorar el margen resultante; así como también puntos de mejora desde el punto de vista de seguridad industrial, esenciales para garantizar el desarrollo seguro de la operación.

Mejoras energéticas y operativas del proceso.

1. Estandarizar los procesos.
2. Establecer los controles de procesos para un mejor manejo de la planta y los recursos.
3. Mejorar la combustión del quemador de tanque de precalentamiento para seguridad de personal y equipo.
4. Recopilar información faltante de aceite térmico y asfalto virgen para realizar análisis térmicos con menos incertidumbre en tanque de producción.

VII. Recomendaciones

- Se recomienda instalar Analizador de O₂ en línea (base húmeda) en Tanque de precalentamiento/almacenamiento, para poder determinar el porcentaje de oxígeno presente en este equipo y optimizar su combustión. **Ver modelo sugerido en Anexo 1.**
- Se recomienda realizar prueba de Mínimo Oxígeno en tanques de SOLTEC S.A. a fin de operarlos en base a su requerimiento. **Ver procedimiento en Anexo 2.**
- Instalar instrumentos de medición de flujo de combustible en tanques de precalentamiento/almacenamiento. A su vez, llevar un mejor control de la combustión de este tanque, ya que su operación resulta peligrosa de la manera en la que se encuentra. **Ver Anexo 3 para modelo sugerido de medidor de flujo de combustible y Anexo 4 para formato de control de combustible consumido.**
- Instalar medidor de CO en el ambiente, ya que se realizó una medición de gases en el ambiente con el Testo 340 y este indicó 300 ppm de CO en el aire de la planta de producción.
- Se recomienda llevar control de combustible consumido por cada lote de Asfalto Modificado producido a fin de fijar objetivos de consumo promedio. **Ver formato de combustible consumido en Anexo 4.**
- Instalar medidor de flujo de carga de aceite térmico recirculada al tanque de producción. **Ver modelo sugerido en Anexo 5.**
- Obtener con el proveedor de aceite térmico los valores reales de propiedades térmicas del producto ofertado por ellos. O realizar análisis de propiedades físicas como calor específico y densidad.
- Mejorar aislamiento de tuberías de aceite caliente al tanque de producción. **Ver material aislante y espesor sugerido en Anexo 6.**
- Realizar plot de las instalaciones de SOLTEC S.A., así como planos mecánicos de cada equipo.
- Instalar manómetro en Tanque de producción, por seguridad de personal.
- Brindar al equipo de producción equipos de protección personal (EPP) para sus labores diarias. Cascos, detectores de gases tóxicos, botas de seguridad, mascarillas de partículas y mascarillas de gases y vapores.

Nomenclatura

Letras romanas	
A: Área	[m ²]
AC 30: Asfalto virgen	N/A
APP: Ácido polifosfórico	N/A
Asf mod: Asfalto modificado	N/A
C: Caudal	[m ³ / s]
cp: Calor específico	[J / kgK]
dT / de: Gradiente de temperatura	[K / m]
e: Espesor del material	[m]
h: Coeficiente	[W / m ²]
k: Conductividad térmica	[W / mK]
L: Pérdidas de chimenea	[kJ]
m: Flujo másico	[kg / s]
PC: Poder calorífico	[kcal / s]
Pol: Polímero	N/A
Q̇: Calor	[J / s]
Q: Energía	[J]
T: Temperatura	[K]
U: Coeficiente global de transferencia de calor	[W/m ² °C]
x: Distancia a lo largo del tubo	[m]
R : Resistencia	[W ⁻¹]
Letras griegas	
β: Parámetro	[-]
ε: Eficiencia	[%]
ε: Emisividad	[-]
η: Eficiencia de combustión	[%]
λ: Parámetro	[-]
σ: Constante de Stefan – Boltzman	[W/ m ² K ⁴]

Subíndices

A: Activación

a: Aislante

C: Combustión

comb: Combustible

f: Fluido

g: Asfalto

i: Inferior

o: Exterior

s: Pérdidas

Referencias

- Aicamaña, E. (2016). Diagnóstico del Proceso de Calentamiento en Distribuidores de Asfalto Modelo Rosco y su relación con la Eficiencia Térmica durante el año 2015. Propuesta de un Sistema de Intercambio Térmico para el Calentamiento de Asfalto (tesis magistral). Universidad Técnica de Cotopaxi, Latacunga, Ecuador.
- ASME PTC 4. (2008). Fired Steam Generators, Performance Test Codes.
- Avellán, M. (2007). Asfaltos modificados con polímeros (tesis de pregrado). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
- Barreto, W. (2015). Diseño, construcción y pruebas de un intercambiador de serpentín y coraza para un banco de trampas de vapor (tesis de pregrado). Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa, Perú.
- Cengel, Y. (2007). *Transferencia de Calor. Un enfoque práctico*. México D.F., México. McGraw-Hill Interamericana.
- IEC 61010-1. (2010). Requisitos de seguridad de equipos eléctricos de medida, control y uso en laboratorio. Parte 1: Requisitos generales. UNE.
- Flórez, D., Arias, W. y Velásquez, H. (s.f.). Simulación del intercambio de calor en un serpentín helicoidal y validación de forma experimental. Universidad Nacional de Colombia.
- Figueroa, A., Reyes, F., Hernández, D., Jiménez, C. y Bohórquez, N. (2007). Análisis de un asfalto modificado con icopor y su incidencia en una mezcla asfáltica densa en caliente. *Ingeniería e Investigación*, 27(3), 5-15.
- Fonda, A. (s.f.). AFUE. <https://www.americanstandardair.com/resources/glossary/afue/>
- Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid. (s.f.). Guía Básica de Calderas Industriales Eficientes. Comunidad de Madrid, Ministerio de Industria, Energía y Turismo e Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía (IDAE).
- García, L. (s.f.). Mediciones para la Evaluación de la Eficiencia de Combustión en Equipos Generadores de Vapor. Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas.

- Gobierno de España. (s.f.). Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. <https://www.miteco.gob.es/es/energia/hidrocarburos-nuevos-combustibles/glp.html>.
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía (IDEA). (2010). Guía técnica de centrales de calor eficientes. Gobierno de España.
- Llerena, O. (2018). Análisis energético, exergético y económico de un sistema de cogeneración: Caso para una planta azucarera de San Pablo. *Revista Ingenius*.
- López, L. (2015). Funcionalización de copolímeros de etileno acrilato de butilo (EBA) para aplicaciones específicas de interés medioambiental (tesis de doctorado). Universidad Autónoma de Madrid, Madrid, España.
- Lozano, M., Zambrano, H. y Ruiz, J. (2015). Estudio de la incidencia del Elvaloy en las propiedades reológicas del concreto asfáltico y del asfalto de la planta de Barrancabermeja (tesis de pregrado). Universidad Católica de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Martínez, A., Martín, N., Gómez, A. y Páez, A. (2003). Betunes asfálticos: materiales muy utilizados y poco conocidos químicamente. *Anales de la Real Sociedad Española de Química*, 43-52.
- Mexicano, J., Hernández, G., Gutiérrez, P. y Rangel, A. (s.f.). Efecto de la composición química del asfalto en el proceso de modificación con elastómeros SBS.
- Mexpolímeros. (s.f.). Grupo acrilatos. Recuperado de: <https://www.mexpolimeros.com/acrilatos.html>
- Perez, A. (2019). Diseño de un intercambiador de calor de serpentín para el enfriamiento de acetona. *Nexo Revista científica*, vol 32.
- Salamanca, G. (2007) Influencia de la contaminación salina en el envejecimiento prematuro de mezclas y tratamientos asfálticos (tesis de pregrado). Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Sarrión, H. (2017). Propiedades y aplicaciones de los polímeros sintéticos en la construcción (tesis de pregrado). Universitat Politècnica de Valencia, Valencia, España.

- Secretaria de Comunicaciones y Transporte (SCT). (2005). *CMT: Características de los materiales*. Ciudad de México, México.

- Wijeyesundera, N., Ho, J. & Rajasekar, S. (1996). The effectiveness of a Spiral Coil Heat Exchanger. *Elsevier Science Ltd*, 23(5), 623-631.

Anexo 1

YOKOGAWA

Co-Innovating tomorrow

América del Sur

Noticias y eventos Quiénes somos Carreras Profesionales Portal del Cliente Global

Industrias Soluciones Productos y servicios Biblioteca Temas destacados Ayuda Contáctenos

Buscar

Analizador de gases in situ TDLS8000

Detalles

Recursos

Descargas

Solicitar una cotización



Analizador que obtiene información en tiempo real y añade valor a los usuarios mediante un uso activo, como el control de procesos y el control de seguridad.

- La eficiencia energética de los hornos, etc., y la seguridad y estabilidad del funcionamiento contribuyen a mejorar el OPEX y reducir el impacto medioambiental.
- Retroalimentación rápida del resultado del proceso al programa de control, esencial para un funcionamiento óptimo.
- Liberación de engorrosos dispositivos de muestreo y componentes de accionamiento del mantenimiento.
- Realización de mediciones directas en condiciones de proceso severas, como alta temperatura y corrosividad.

El TDLS8000 es un analizador que puede resolver estos problemas.

Descarga del software FileConverter

Descarga del software PC-HMI

Folleto

Especificaciones Generales

eBooks / Libro electrónico

Soporte Técnico

Anexo 2

Test para determinación de mínima capacidad de O₂ en hornos.

Alcance

Esta práctica aplica a todos los hornos que posean analizador de oxígeno en línea.

Objetivos

- Establecer un nuevo objetivo de O₂ basados en el mínimo nivel de O₂ llevado a cabo en el test y en la variación histórica del O₂.
- Cuantificar incentivos por llevar a cabo el nuevo objetivo.
- Cuantificar incentivos por facilidades adicionales.
- Confirmar que el analizador se encuentra en la posición correcta y que no está influenciado en exceso por infiltraciones de aire o mala distribución de flujo.

Guía operativa del test

Importante: el test debe ser realizado por un especialista con experiencia en la materia, prever los procedimientos que se deben emplear en el caso de ahogo del horno.

1. Confirmar las siguientes condiciones:
 - Quemadores en buenas condiciones mecánicas y de limpieza.
 - Correcto funcionamiento de instrumentos asociados al test.
 - Condiciones de proceso estable (temperatura de entrada, temperatura de salida, flujo de alimentación).
 - Combustión estable.
 - Nivel "típico" de O₂ estable.
 - Operación de quemadores balanceada.
2. Comenzar a bajar el porcentaje de exceso de O₂ en el analizador fijo en intervalos de 0.5%, esperar entre 15-30 minutos la estabilización del horno. Tomar nota de los datos y las mediciones de emisiones y realizar una inspección visual del estado de la combustión en el horno. Tener presente las características de cada combustible para definir el exceso de aire mínimo.
3. Repetir el paso anterior disminuyendo el O₂ en escalones más pequeños hasta llegar a la aparición de llamas erráticas, inestables o tamaños inaceptables en quemadores. Si la combustión y las llamas son aceptables y no hay combustibles en los gases de chimenea, repetir los pasos anteriores hasta obtener llamas erráticas.

4. Al llegar al punto de llamas erráticas, aumentar el O₂ en 0.5%. Continuar monitoreando la combustión mediante el analizador portátil e inspección visual para verificar que no se produzca “ruptura de la combustión” y llamas inestables.
5. Luego de 30 minutos sobre esta condición, documentar todas las condiciones incluyendo la lectura del analizador portátil. Esto establece la mínima capacidad de O₂.

Nota: Se llama “llamas erráticas” o “breakthrough” al rápido incremento del contenido de combustible no quemados en los gases de combustión, para quemado de gas aproximadamente sobre las 150 ppmv y para quemado de combustible líquido aproximadamente sobre los 500 ppmv.

Anexo 03



F L E X

Caudalímetro Vortex Proline Prowirl R 200

Caudalímetro con la mejor precisión, a pesar de la reducción de la tubería

[Mostrar el resumen de especificaciones](#) ^

Error de medición máx.

Caudal volumétrico (líquido): $\pm 0,75\%$
Caudal volumétrico (vapor, gas): $\pm 1,00\%$
Caudal másico (vapor saturado): $\pm 1,7\%$ (temperatura compensada); $\pm 1,5\%$ (temperatura/presión compensada)
Caudal másico (vapor sobrecalentado, gas): $\pm 1,5\%$ (temperatura/presión compensada); $\pm 1,7\%$ (temperatura compensada + compensación externa de la presión)
Caudal másico (líquido): $\pm 0,85\%$

Rango de medición

Líquido: 0,1 a 540 m³/h (0,061 a 320 ft³/min)
en función del producto: agua con 1 bar a, 20 °C (14,5 psi a, 68 °F)
Vapor, gas: 0,52 a 7.300 m³/h (0,31 a 4.300 ft³/min)
en función del producto: vapor con 180 °C, 10 bar a (356 °F, 145 psi a); aire con 25 °C, 4,4 bar a (77 °F, 63,8 psi a)

Rango de temperatura del medio

Estándar: -40 a +260 °C (-40 a +500 °F)
Temperatura alta/baja (opcional): -200 a +400 °C (-328 a +752 °F)
Temperatura alta/baja (bajo petición): -200 a +450 °C (-328 a +842 °F)

Máx. presión de proceso

PN 40, Clase 300, 20 K

Materiales húmedos

Tubo de medición: 1.4408 (CF3M)
Sensor DSC: 1.4404/F316/F316L
Conexión a proceso: 1.4404/F316/F316L

Anexo 04

Fecha	Lectura inicial	Lectura final	Batch	Producto	Comentarios

SMARTFLOW® Medidores de flujo de aceite caliente 1/2" y 1"

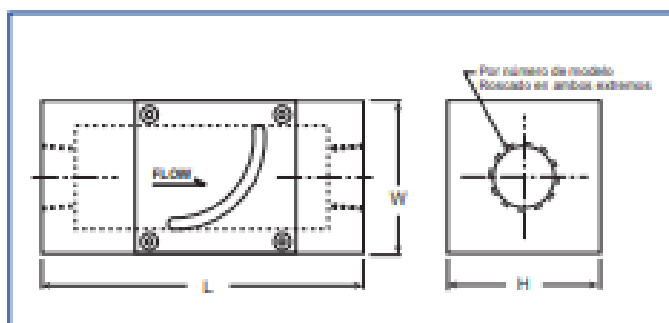


Descripción general

Los medidores de flujo de aceite caliente Smartflow son dispositivos duraderos operados por paletas que proporcionan una indicación visual del flujo en galones o litros por minuto. La bola indicadora está separada del proceso por una empaquetadura de alta temperatura y una placa de acero inoxidable. Una ventana de vidrio retiene la bola indicadora. Este medidor de flujo está diseñado específicamente para circuitos de circulación de alta temperatura en procesos industriales.

Características y beneficios

- El tamaño compacto funciona bien en ubicaciones de espacio restringido.
- La construcción robusta permite años de servicio confiable.
- El medidor de temperatura opcional proporciona una función agregada.
- El índice de temperatura de 550°F (288°C) permite su instalación en una amplia variedad de aplicaciones.
- El índice de presión de 150psi (10,3bar) satisface la mayoría de los requisitos de presión para enfriamiento usando aceite caliente.
- Económico para uso en muchos lugares en toda la planta.
- Línea montada para una fácil instalación sin soportes o herramientas adicionales.



Números de modelo

Modelo HF4

Cuerpo de acero inoxidable con conexión NPT o BSPT de 1/2", escala de 2 a 6 gpm o 5 a 22 lpm.

Número de modelo	Temp. medidor	Tamaño de entrada	Rango de flujo
HF4-A-60	no	1/2"NPT	2-6 gpm
HF4B-A-220	no	1/2"BSPP	5-22 lpm
HF4-B-60	sí	1/2"NPT	2-6 gpm
HF4B-B-220	sí	1/2"BSPP	5-22 lpm

L = 3,75" (95,3mm)

W = 1,5" (38,1mm)

H = 1,5" (38,1mm)

Modelo HF8

Cuerpo de acero al carbono (acabado de óxido negro) con conexión de 1" NPT, escala de 5 a 40 gpm o 20 a 150 lpm.

Número de modelo	Temp. medidor	Tamaño de entrada	Rango de flujo
HF8-A-40	no	1"NPT	5-40 gpm
HF8-A-1500	no		20-150 lpm
HF4-B-40	sí		5-40 gpm
HF8-B-1500	sí		20-150 lpm

L = 4,75" (120,8mm)

W = 2,25" (57,2mm)

H = 2,25" (57,2mm)

Partes y materiales húmedos

Ventana de visualización.....Vidrio
Paleta.....Acero inoxidable
Resorte.....Acero inoxidable
Pasador.....Acero inoxidable
Empaquetadura.....Fibra sin amianto
Imán.....Alnico Sinterizado 8HE

Especificaciones

Temp. máx de funcionamiento.....550°F (288°C)
Presión máx. operativa.....150 psi (10.3 bar)
Precisión de flujo.....±10%

El diseño y las especificaciones están sujetas a cambios sin previo aviso.

Anexo 06

Personnel Protection Report

Item ID:	SOLTEC		
Item Description:	Tuberias		
System Application:	Pipe - Horizontal		
Dimensional Standard:	ASTM C 585 Rigid		
Calculation Type:	Personnel Protection		
Process Temp:	536		°F
Ambient Temp:	90		°F
Wind Speed:	0.0		mph
Max Surface Temp:	140.0		°F

Open Audit File...

Quantity (ft or ft²):

Variable Insulation Thickness	Surface Temp (°F)	Heat Loss (BTU/hr/ft)	Efficiency (%)
Bare	535.2	952.10	
0.5	201.2	208.10	78.15
1.0	147.7	126.10	86.76
1.5	129.5	99.36	89.56
2.0	115.6	78.35	91.77
2.5	110.8	70.81	92.56
3.0	107.5	65.29	93.14
3.5	105.0	61.05	93.59
4.0	102.9	57.27	93.98