

**EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS PARA OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA
DE SOSTENIMIENTO DE TEMPERATURA DE LOS TANQUES DE FONDOS
DE VACIO K2501/02 DE LA REFINERÍA DE BARRANCABERMEJA**

MARIA FERNANDA CAMACHO FUENTES

JOHAN MAURICIO GARZON ROJAS



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO MECÁNICAS
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE RECURSOS ENERGÉTICOS
BUCARAMANGA**

2013



**EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS PARA OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA
DE SOSTENIMIENTO DE TEMPERATURA DE LOS TANQUES DE FONDOS
DE VACIO K2501/02 DE LA REFINERÍA DE BARRANCABERMEJA**

MARIA FERNANDA CAMACHO FUENTES

JOHAN MAURICIO GARZON ROJAS

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO MECÁNICAS
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE RECURSOS ENERGÉTICOS
BUCARAMANGA**

2013



**EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS PARA OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA
DE SOSTENIMIENTO DE TEMPERATURA DE LOS TANQUES DE FONDOS
DE VACIO K2501/02 DE LA REFINERÍA DE BARRANCABERMEJA**

MARIA FERNANDA CAMACHO FUENTES

COD: U00069346

JOHAN MAURICIO GARZON ROJAS

COD: U00070652

**Monografía de grado para optar al título de Especialista en Gerencia de
recursos energéticos**

Director

LUIS EDUARDO JAIMES REÁTIGA

Ingeniero Químico

Calificador

LEONARDO ESTEBAN PACHECO SANDOVAL

Ingeniero Mecánico

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA

FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO MECÁNICAS

ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE RECURSOS ENERGÉTICOS

BUCARAMANGA

2013

Nota de aceptación

Firma Director

Firma Calificador

Firma Coordinador

Bucaramanga, Febrero 18 de 2013

CONTENIDO

0. RESUMEN	10
0. INTRODUCCIÓN	11
1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACION	13
2. OBJETIVOS	14
3. ALCANCE	15
4. MARCO REFERENCIAL	16
4.1 REFINERÍA DE BARRANCABERMEJA	16
4.2 CONCEPTOS BÁSICOS DE TANQUES	17
4.3 TANQUES CALIENTES DE LA REFINERÍA DE BARRANCABERMEJA ..	23
5. ESQUEMA METODOLÓGICO	26
5.1 DESARROLLO DE UN MODELO DE TRANSFERENCIA DE CALOR GENERAL PARA UN TANQUE DE FONDOS DE VACÍO (K2501/2) MEDIANTE BALANCES DE MASA Y ENERGÍA	26
5.1.1 Balance de masa	27
5.1.2 Balance de energía	27
5.2 APLICACIÓN DEL MODELO DESARROLLADO EN EL NUMERAL 6.1 PARA DETERMINAR EL COMPORTAMIENTO DE LAS TENDENCIAS DE TEMPERATURA Y PÉRDIDAS ENERGÉTICAS EN EL TANQUE K2501/2	29
5.3 IDENTIFICACIÓN DEL ESQUEMA LOGÍSTICO ÓPTIMO DE OPERACIÓN DE LOS TANQUES DE FONDOS DE VACÍO (K2501, K2502, K2806)	31
5.4 ANÁLISIS TÉCNICO DE LAS CONDICIONES DE TEMPERATURA Y DESEMPEÑO ENERGÉTICO DE LOS TANQUES K2501/2 DE FONDOS DE VACÍO CON LOS DIFERENTES TIPOS DE MATERIALES AISLANTES Y ESPESORES CONSIDERADOS PARA LA OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA DEL SISTEMA DE SOSTENIMIENTO DE TEMPERATURA	34
5.5 REVISIÓN TÉCNICA DE REQUERIMIENTOS Y DISPONIBILIDAD DE FUENTES DE CALOR ALTERNAS PARA LA ADICIÓN DE CALOR Y SOSTENIMIENTO DE TEMPERATURA DE LOS TANQUES K2501/2	40
6. EVALUACIÓN ECONÓMICA	42

6.1 ESPESOR ÓPTIMO ECONÓMICO SIN CONSIDERAR FACTOR J	44
6.2 ESPESOR OPTIMO ECONÓMICO CONSIDERANDO EL FACTOR J	50
6.3 COMPARATIVO COSTOS DE FUENTES DE CALOR	55
6.4 ANALISIS DE RIESGOS FINANCIEROS Y SENSIBILIZACION	58
7. CONCLUSIONES.....	60
8. BIBLIOGRAFÍA	62
9. ANEXOS.....	64

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Tanques calientes de almacenamiento de productos calientes en la GRB ...	24
Tabla 2. Condición logística óptima para reducción de consumo energético en el almacenamiento de FDV	32
Tabla 3. Condiciones logísticas optimizadas para la operación del tanque K2501/2 ...	34
Tabla 4. Tipos de materiales aislantes considerados	35
Tabla 5. Precios promedios de los materiales aislantes considerados	44
Tabla 6. Análisis sin factor J, Inversión inicial, VPN costo gas combustible, VPN costos mantenimiento, VPN costo total a diferentes espesores	45
Tabla 7. Espesores óptimos de los materiales aislantes sin considerar factor J	50
Tabla 8. Valor presente neto de la operación del tanque para el caso base (actual) ...	51
Tabla 9. Valor presente neto de la operación del tanque para el caso con lana de vidrio con 3" de espesor	51
Tabla 10. Resultados análisis económico Factor J para cada espesor de los materiales aislantes considerados	52
Tabla 11. Espesor óptimo de los materiales aislantes considerando el factor J	55
Tabla 12 Precios hipotéticos requeridos de los materiales para lograr que Factor $J=0$	56
Tabla 13. Análisis de Riesgos.....	57
Tabla 14. Comparativo costos fuentes de calor	58
Tabla 15. Resumen comparativo del análisis económico y de calificación cualitativa de propiedades de los materiales aislantes considerados	59

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Tanque cónico	18
Figura 2. Tanque geodésico	18
Figura 3. Tanque de techo flotante	19
Figura 4. Tanque de techo fijo con membrana interna flotante	20
Figura 5. Tanque caliente	22
Figura 6. Plano con ubicación de los tanques calientes en la GRB	24
Figura 7. K2502 Tanque caliente con fondos de vacío de la GRB	25
Figura 8. Lana de vidrio	36
Figura 9. Lana mineral de roca	37
Figura 10. Aerogel de Silice	37
Figura 11. Perlita expandida	38
Figura 12. Silicato de calcio	39
Figura 13. Fibra de vidrio celular	39
Figura 14. Fotografías estado aislamiento térmico techo K2501	65
Figura 15. Transferencia de calor en pared plana	66

LISTA DE GRAFICAS

Gráfica 1. Consumo de gas combustible en quemadores de tanques calientes	13
Gráfica 2. Curva reológica de los Fondos de Vacío	23
Gráfica 3. Tendencia de Temperatura para el tanque K2501/2	30
Gráfica 4. Tendencia del Gradiente de Temperatura para el tanque K2501/2	30
Gráfica 5. Tendencia de la Pérdida de Calor para el tanque K2501/2	31
Gráfica 6. Temperatura de tanques de FDV con esquema operativo óptimo, 6.7 de 8 quemadores operando	33
Gráfica 7. Temperatura de tanques de FDV con todos los quemadores operando (8/ 8)	33
Gráfica 8. Temperatura de tanques de FDV sin quemadores operando (0 de 8)	34
Gráfica 9. Calor requerido en función del espesor para cada material aislante evaluado	35
Gráfica 10. Fibra de vidrio, Costo total en función del espesor	47
Gráfica 11. Lana mineral de roca, Costo total en función del espesor	47
Gráfica 12. Aerogel de Sílice, Costo total en función del espesor	48
Gráfica 13. Perlita Expandida, Costo total en función del espesor	48
Gráfica 14. Silicato de Calcio, Costo total en función del espesor	49
Gráfica 15. Fibra de vidrio celular, Costo total en función del espesor	49
Gráfica 16. Factor J en función del espesor para cada material aislante con precios actuales	53
Gráfica 17. VPN en función del espesor para cada material aislante	54
Gráfica 18. Costo del gas combustible requerido en función del espesor para cada material aislante	54
Gráfica 19. Factor J en función del espesor para cada material aislante con precios hipotéticos requeridos para $J = 0$	56
Gráfica 20. Tendencia de temperatura del tanque de FDV K2502 a tres flujos R/E diferentes	68

Gráfica 21. Tendencia de temperatura del tanque de FDV K2502 a diferentes capacidades	68
Gráfica 22. Tendencia de temperatura del tanque de FDV K2502 a tres diferentes temperaturas de ingreso de FDV	69
Gráfica 23. Tendencia de temperatura del tanque de FDV K2502 a tres diferentes temperaturas iniciales	69
Gráfica 24. Tendencia de temperatura del tanque de FDV K2502 a tres diferentes flujos de calor externo	70

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Tendencia del incremento de gas combustible hacia tanques de almacenamiento de productos calientes de la refinería de Barrancabermeja y deterioro del aislamiento térmico	55
Anexo B. Estimación del Coeficiente global de transferencia de calor U.....	56
Anexo C. Tendencia de la temperatura para diferentes condiciones de operación caso ejemplo tanque K2502 FDV de acuerdo al modelo desarrollado. Cambia la variable a la que se hace referencia, las demás variables se mantienen constantes e iguales a los valores del caso base.....	58

RESUMEN

En el presente trabajo se realiza un estudio para evaluar técnica y económicamente diferentes aislantes térmicos industriales para la reducción de las pérdidas energéticas en los tanques K2501/2 que almacenan Hidrocarburos pesados (fondos de vacío) en la refinería de Barrancabermeja.

Términos o Palabras claves para recuperación de trabajo:

Refinería de Barrancabermeja

Aislantes térmicos industriales

Tanques calientes

Fondos de vacío

Valor Presente Neto

INTRODUCCIÓN

En cualquier tipo de industria el almacenamiento juega un papel fundamental en la cadena productiva; este brinda facilidades a la operación cuando se tienen diferentes etapas de procesamiento, diferentes capacidades de producción en unidades o equipos y cuando se tienen tiempos y/o períodos de operación distintos.

Existen también exigencias externas como las condiciones del mercado, oferta, demanda, precios, las necesidades de los clientes, de los proveedores, condiciones ambientales, políticas, sociales o incluso requerimientos especiales adicionales entre otros que pueden ser satisfechos cuando se dispone de una adecuada logística e infraestructura para almacenamiento de productos, insumos y/o materias primas. En la industria del petróleo, en cualquier eslabón de su cadena productiva (exploración, producción, transporte, refinación, comercialización), los sistemas de almacenamiento, ya sean de crudo o de productos refinados y petroquímicos, son primordiales para la continuidad del negocio y la rentabilidad y flexibilidad de cualquier organización.

Por la naturaleza de ciertos productos su almacenamiento, ya sea intermedio o al final del proceso productivo, debe realizarse en condiciones especiales por lo que en ocasiones se requieren instalaciones específicas y operaciones no convencionales; en estos casos el almacenamiento pasa a ser una fase más del proceso de producción y/o de la operación. Por ejemplo en la industria farmacéutica se requieren sistemas de homogenización continua para mantener suspendidos compuestos de mayor tamaño en medios de suspensión o para asegurar la mezcla de sustancias inmiscibles para posteriores procesamientos, igualmente en la industria alimenticia muchos productos se guardan en almacenamientos atemperados que favorecen su conservación. En otros casos –como el considerado en este estudio - el producto en cuestión, fondos de vacío del proceso de refinación del crudo, requiere que la temperatura de almacenamiento sea superior a la ambiental para evitar inconvenientes de fluidización y transporte del producto siendo entonces necesario contar con sistemas que aseguren el sostenimiento de temperatura del producto y que se reduzcan las pérdidas de energía hacia el exterior.

En la refinería de Barrancabermeja uno de los productos que requieren mayor temperatura de almacenamiento son los fondos de vacío que se producen como residuo principal del proceso de refinación del crudo en las torres de destilación atmosférica y al vacío en las unidades topping. Este producto corresponde a cerca del 20 al 25% en volumen del crudo cargado. La temperatura recomendada de almacenamiento es mínimo 400F para asegurar que el producto se mantenga fluido y con una viscosidad aceptable: en el caso de presentarse temperaturas menores se incurre en requerimientos adicionales

de energía por la mayor potencia demanda en los motores de las bombas para su transferencia/transporte o en casos extremos de pérdidas considerables de temperatura pueden presentarse taponamientos de las facilidades o de líneas por solidificación del producto y alterar la operación entera de la refinería.

El almacenamiento de los fondos de vacío es un almacenamiento intermedio y temporal que depende de la estrategia y logística que se tenga en la operación global de la refinería. En Barrancabermeja se dispone de tres tanques para los fondos de vacío: K2501, K2502 y ocasionalmente el K2806. Para conservar la temperatura ideal de almacenamiento estos tanques “calientes” cuentan con un aislamiento térmico a base de fibra de vidrio en todo el casco y el techo de los mismos, con esto se busca disminuir las pérdidas de calor al ambiente por efectos de radiación y convección. Adicionalmente para reducir la pérdida de temperatura se adiciona calor a través de quemadores inmersos que por combustión de gas combustible transfieren calor al producto.

De acuerdo al reporte más actualizado del estado de estos tanques su recubrimiento presenta un deterioro elevado debido a que no existe un plan preventivo de reposición del aislamiento en falla y a que el mantenimiento general de estos tipos de tanques típicamente tiene una frecuencia de 10 años. En la actualidad estos tanques cuentan con casi dos periodos vencidos sin mantenimiento general.

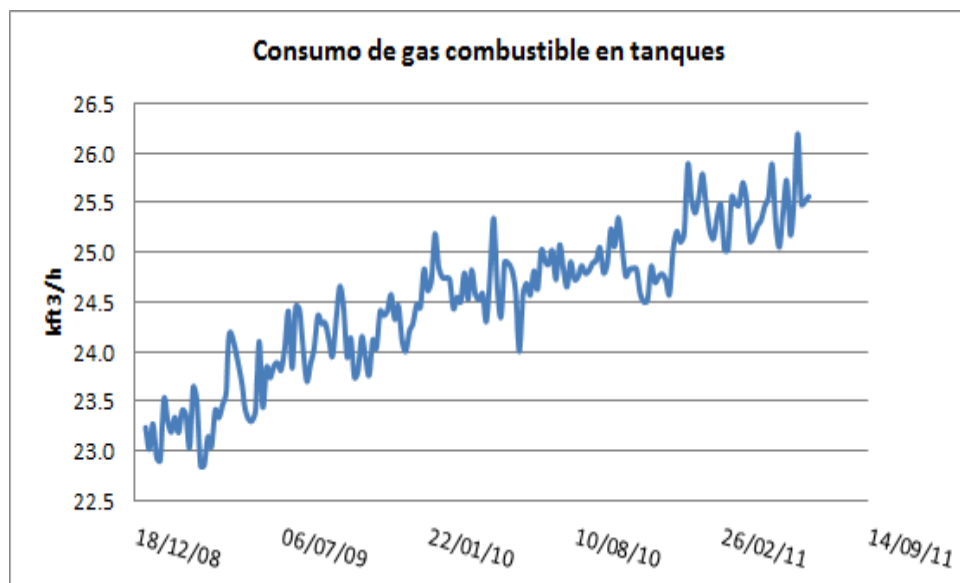
Por otro lado la tendencia del consumo de gas combustible destinado a los quemadores de los tanques calientes en los últimos tres años exhibe una tendencia al incremento que se traduce en mayores costos operativos. Hay que mencionar que la medición de este consumo de gas no solo cubre los tanques de fondos de vacío sino también los tanques de los demás productos calientes de la refinería.

1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACION

En la refinería de Barrancabermeja el sostenimiento de la temperatura de los tanques calientes que almacenan hidrocarburos a temperatura superior a la ambiente como los producidos en los procesos de refinación del fondo del barril (fondos de vacío (FDV), fondos demex (FDX), aceite demetalizado (DMO), aceite demetalizado hidrogenado (DMOH) y crudo reducido cusiana (CRC)) se realiza mediante un sistema de calentamiento con quemadores inmersos de gas combustible y aislamiento térmico a base de lana de vidrio. En los últimos años, se ha registrado un incremento significativo en el consumo de gas que podría estar asociado al deterioro del sistema de aislamiento. (ver Anexo No.1).

El consumo de gas combustible del sistema de sostenimiento de temperatura de los tanques calientes en la GRB muestra el siguiente comportamiento:

Gráfica 1. Consumo de gas combustible en quemadores de tanques calientes



Se evidencia un incremento de cerca de 2.5kft³/h a lo largo de tres años para los 10 tanques calientes de la refinería. Con un precio actual de 3,5USD/MMBTU y un poder calorífico aproximado de 1000BTU/ft³ este aumento en el consumo corresponde a un incremento en los costos operativos de 76650 USD/año.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Plantear y evaluar alternativas de optimización del sistema de sostenimiento de temperatura de los tanques calientes K2501/2 que almacenan fondos de vacío (FDV) para reducir pérdidas energéticas y disminuir costos operativos y de mantenimiento.

2.2 Objetivos específicos

Obtener un modelo matemático a partir del balance de masa y de energía del desempeño energético de un tanque de almacenamiento para identificar variables y su forma de correlación.

Con el modelo obtenido identificar el espesor óptimo para cada caso de material aislante considerado en el estudio.

Realizar el análisis económico para cada caso de material aislante a diferentes espesores con el factor J.

Identificar el material aislante y espesor que represente el mayor beneficio económico para el sostenimiento de temperatura de los tanques de fondos de vacío.

3. ALCANCE DE LA MONOGRAFÍA

Evaluar seis diferentes materiales aislantes térmicos tanto energética como económicamente para identificar el material y espesor que represente el mejor beneficio desde el punto de vista de reducción de costos (mayor rentabilidad) de la operación de los tanques calientes K2501/2 de la refinería de Barrancabermeja. El análisis se restringe solo al almacenamiento del producto fondos de vacío por las condiciones de temperatura que requiere estos hidrocarburos, y solo a los tanques K2501/2 por ser idénticos y por ser los tanques principales de este producto, el tanque K2806 varía su servicio para el almacenamiento de fondos Demex (residuo pesado del proceso de extracción Liq-Liq con GLP) con frecuencia por lo que no se tuvo en cuenta en el análisis. Adicionalmente efectuar un comparativo de los costos de otras fuentes de energía disponible para la adición de calor externo en reemplazo de los quemadores de gas combustible.

4. MARCO REFERENCIAL

4.1. Refinería de Barrancabermeja

La Refinería de Barrancabermeja tiene una capacidad de refinación de crudo de 250000bls/d, es una refinería de conversión media: aproximadamente el 75% del crudo cargado se convierte en productos blancos (GLP Y Gasolina), medios (Turbo combustible JET A1 y Diesel), y productos petroquímicos (solventes alifáticos y aromáticos, parafinas y polietileno) y el restante 25% se convierte en combustóleo (Fuel Oil No.1 y No.4).

El proceso de refinación de crudo en Barrancabermeja inicia con el recibo, cuantificación y almacenamiento del crudo en el departamento de Materias Primas Y Productos Terminados. Acá se efectúa un mezclado de crudos (Blending) donde se preparan las dietas carga a las cinco unidades de destilación primaria (Topping) que por fraccionamiento separan los gases, nafta virgen, JET, ACPM y gasóleo atmosférico de un residuo conocido como crudo reducido, este último es procesado en las torres de destilación al vacío para extraer el gasóleo remanente de los fondos de vacío.

En el tren de refinación de fondos el primer proceso es en la unidad Demex donde por extracción liquido-liquido se recupera un aceite demetalizado (DMO) que posteriormente es hidrotariado para remoción de azufre y metales pesados en la unidad Unibon, el producto es el aceite demetalizado hidrogenado (DMOH). La corriente de fondos Demex (FDX) es craqueada térmicamente en la unidad Viscorreductora II, su producto, brea, es componente para la preparación de combustóleo.

La refinería de Barrancabermeja cuenta con cuatro unidades de ruptura catalítica de lecho fluidizado (FFC) para la transformación de los gasóleos, DMO, DMOH y Crudo reducido Cusiana en Nafta craqueada (gasolina de alto octanaje), Gas Licuado de Petróleo (GLP), Diluyente (Aceite Liviano de Ciclo, ALC) y un residuo conocido como Slurry.

Los productos petroquímicos son el resultado del procesamiento de corrientes intermedios como nafta virgen, butanos, etileno y destilados parafínicos procesados en las unidades de Aromáticos, Polietileno, Parafinas.

La Gasolina Regular y Premium, el Diesel Regular y Extra, el JET A1 y el Combustóleo se preparan mediante matrices de mezclado (blending) para obtener la mayor rentabilidad de los componentes.

En la refinería casi todas las corrientes (crudos, corrientes intermedias y productos finales) disponen de sistemas de almacenamiento, existen cerca de 400 tanques de muy variadas dimensiones los cuales suman una capacidad

total de almacenamiento en la refinería de 9.2 millones de barriles; se almacenan aproximadamente 100 productos distintos entre crudos de diferentes características y API, naftas y gasolinas de varios octanajes, ACPM y diesel de alto y bajo contenido de Azufre, gasóleos livianos y pesados, etano/etileno, aromáticos, alquilatos, ácido sulfúrico, sodas y asfaltos entre muchos otros.

4.2. Conceptos básicos de Tanques de almacenamiento

Los tanques generalmente son recipientes cilíndricos que pueden ser de varias relaciones diámetro/altura, son atmosféricos porque la presión dentro del tanque es muy cercana a la atmosférica: la mayoría de los tanques se diseñan para presión de 1,5 in de H₂O y para vacío de 1,0 in de H₂O, aunque hay tanques que por requerimientos especiales resisten mayores presiones de hasta 15 psig (geodésicos). El material usado en la fabricación depende de la sustancia que se vaya a almacenar y de las condiciones de temperatura y ambientales, generalmente se usa acero al carbón 316L para la mayoría de las sustancias, tanto para el casco (área perimetral) como para el techo, el fondo y las columnas soportes. Los cimientos se hacen a base de concreto y hormigón.

4.2.1. Clasificación de acuerdo al tipo de techo:

- Tanques abiertos: se usan para almacenar productos líquidos no peligrosos que no se afecten por condiciones ambientales, ejemplo: agua.
- Tanques de techo cónico: se usan para el almacenamiento de productos con punto de inflamación mayor a 150°F, ejemplo: almacenamiento de Diesel.



Figura No. 1 Tanque cónico

- Tanques de techo geodésico (Domo): empleados para productos sometidos a bajas presiones de hasta 15psig, ejemplo naftas vírgenes o craqueadas de alto RVP (presión de vapor Reid).



Figura No.2 Tanque geodésico

- Tanque de techo flotante: estos tanques se usan para el almacenamiento de productos con puntos de inflamación menores a 150°F y alto RVP, su utilización es indispensable cuando se desea disminuir a un mínimo las pérdidas por evaporación. Existen tres tipos básicos de tanques de techo flotante: de cubierta sencilla, de pontón anular y de doble cubierta, su selección depende del uso, presupuesto y seguridad.

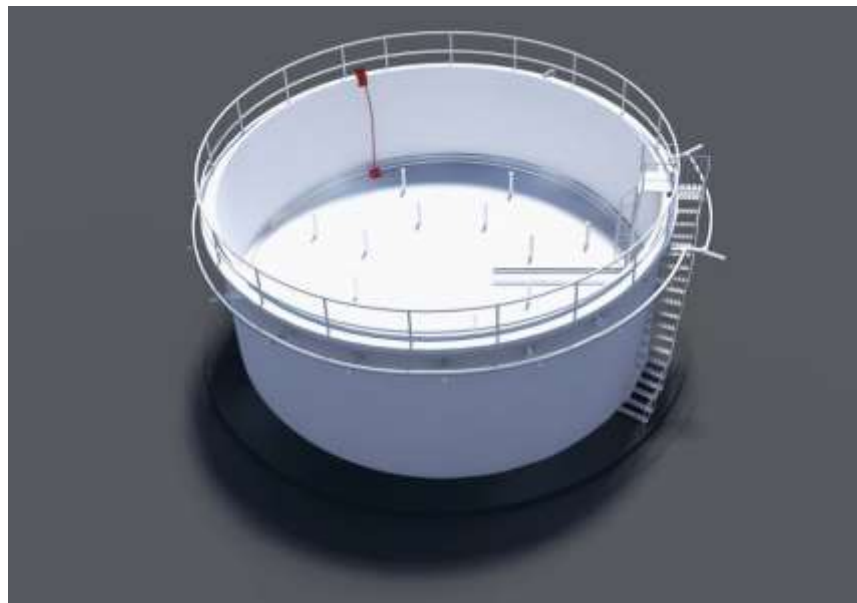


Figura No.3 Tanque de techo flotante

- Tanque de techo fijo con membrana flotante: consiste de un tanque con techo fijo cónico y una membrana interna sobre el líquido sostenida por cilindros flotadores. Estos tanques se usan para las mismas condiciones de producto de los tanques de techo flotante sin embargo implican menor seguridad y confiabilidad por la posibilidad de estanqueidad de vapores entre la membrana y el techo fijo.

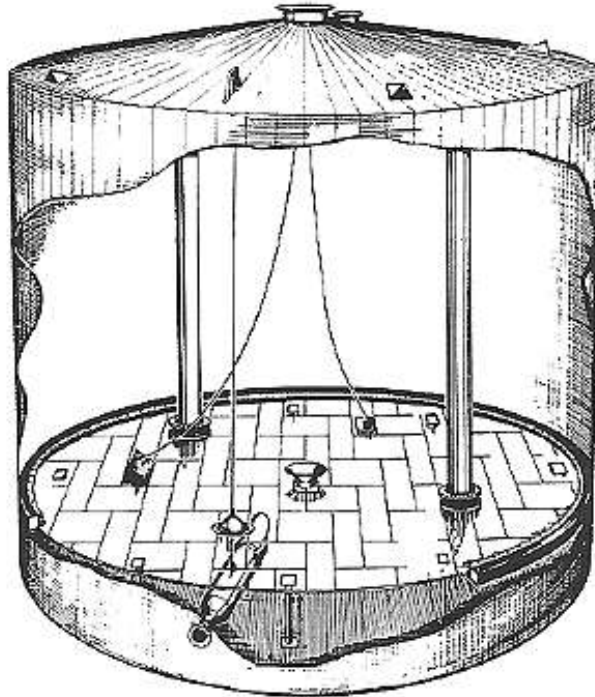


Figura No.4 Tanque de techo fijo con membrana interna flotante

5.2.2. Clasificación de acuerdo a su servicio y presión

- Tanques a presión atmosférica: usados para líquidos
- Tanques a presión o vasijas: usados para líquidos o gases

5.2.3 Clasificación en función de su temperatura de operación

- Temperatura ambiente: Utilizado para la mayoría de productos líquidos como crudos, gasolinas, diesel, jet y solventes entre otros.
- Tanques Refrigerados (Criogénicos): Operan a temperaturas inferiores a la atmosférica y que generalmente almacenan gases licuados, por ende su presión de operación es alta.
- Tanques Calientes: muchos productos como el asfalto, parafinas, productos intermedios como el DMO, DMOH y el CRC tienen propiedades reológicas que hacen que se presenten fuertes aumentos en su viscosidad con la disminución de la temperatura, llegando incluso en algunos casos a tener aspecto de sólido a temperatura ambiente. Con este tipo de productos se hace necesario un almacenamiento a alta temperatura que asegure la fluidez del producto. Al tener una alta temperatura de producto se tiene una menor viscosidad lo que implica un requerimiento de potencia menor en los equipos de bombeo que transfieran estos productos. Constan de:

- Sistema de adición de calor externo: Transferencia de calor convectiva entre la fuente de calor (superficie a alta temperatura, generalmente serpentines) y el fluido. Puede ser:
 - Calentamiento por combustión a través de calentadores de gas inmerso: Tubos en U que entran y salen del tanque con un quemador de gas automático, switch de ignición, controlador de temperatura automático, sistema de corte por alta temperatura y respectiva chimenea para gases de combustión.
 - Calentamiento con vapor saturado de media o alta presión.
 - Calentamiento con resistencias eléctricas.

- Aislamiento térmico exterior: Capa de material aislante que recubre el casco y el techo del tanque ajustada con láminas de foil que conserva la alta temperatura del producto reduciendo pérdida o ganancia de energía por transferencia calor con el ambiente debido a que su propiedad para transferir calor (conductividad térmica), es baja. Se pueden clasificar, de acuerdo a su forma y composición, de la siguiente manera:
 - Aislantes térmicos de fibras minerales: materiales procesados a partir del estado de fusión de roca, escoria o vidrio, y convertidos a fibra con un procedimiento de centrifugación a alta velocidad, o a través de dados de estirado o la combinación de ambos. Las fibras están distribuidas de modo multidireccional y dividen finamente el espacio de aire. Pueden o no estar unidas entre sí. Los aislantes fibrosos más usados son la lana de escoria, de roca, fibra de vidrio y la fibra cerámica (refractario). Generalmente la presentación es con aceites minerales: Colchoneta armada con metal desplegado y tela hexagonal; y con aglutinantes orgánicos: Medias cañas, Placas rígidas y semirrígidas.
 - Aislantes térmicos celulares: materiales compuestos por pequeñísimas celdas individuales separadas entre sí. El material celular puede ser vidrio o plástico espumado. Los aislantes de este tipo más usados son: vidrio espumado, poliestireno expandido, poliuretano, elastómeros y polisocianurato. Presentaciones: Flexibles: preformados en hojas, rollos, tubos o unidades rectangulares: Placas, medias cañas, módulos, cubiertas para tuberías. Espumado en sitio: Poliuretano por aspersión.
 - Aislantes térmicos granulares: materiales compuestos por nódulos que contienen espacios vacíos. Son combinados con fibras de refuerzo con lo que consiguen rigidez, estructura y preforma. Los más comúnmente usados son: vermiculita expandida, perlita

expandida, tierra diatomácea, silicato de calcio y silicato de sodio.
Presentaciones: Rígidos, Blocks, tablas y medias cañas.

- Sistema de Blankenting: Mecanismo de inyección de CO₂ para asegurar en todo momento manto de gas inerte en el tanque, con esto se evita presencia de vapores de hidrocarburo y se minimiza el riesgo de mezcla explosiva en la fase vapor del tanque.
- Sistema de lavado de gases y recolección de condensado y sello: Pote de sello de agua a donde se conducen los gases emanados por el hidrocarburo con el fin evitar incendios o explosiones en los tanques. También proporciona el medio de transferencia de calor con el fin de condensar los vapores de hidrocarburos livianos.
- Sistema de inyección de vapor de sofoco: Cada tanque posee cuatro boquillas ubicadas cada 90 grados en la parte superior de la pared cilíndrica del casco, su función es inyectar vapor a cada una de las boquillas y con el objeto de sofocar las llamas en el tanque en caso de que se produzca un incendio.

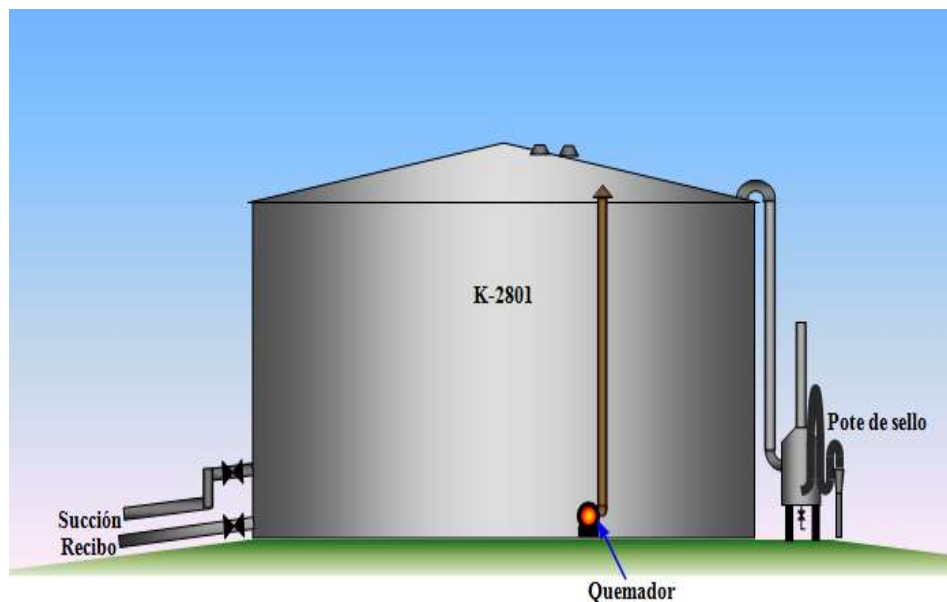
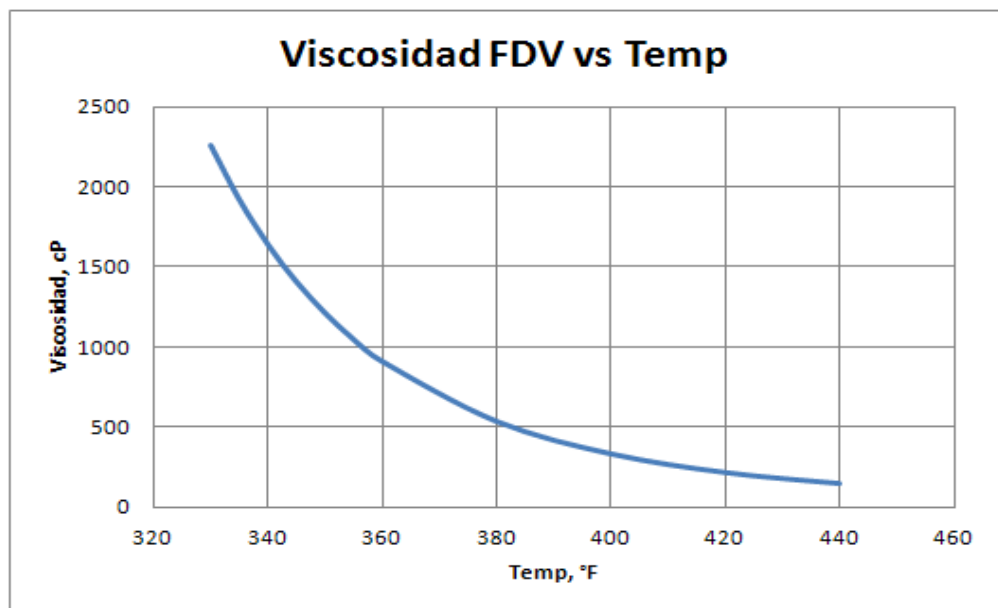


Figura 5. Tanque caliente

4.3. Tanques calientes de almacenamiento de la refinería de Barrancabermeja

Los productos que se almacenan en tanques calientes en la refinería de Barrancabermeja son los Fondos de Vacío (FDV), Fondos Demex (FDX), Aceite Demetalizado (DMO), Aceite hidrodemetalizado (DMOH), y crudo reducido cusiana (CRC), se cuenta con 10 tanques para el almacenamiento de estos productos con una capacidad total de 1`400.000 barriles, adicionalmente existen tres tanques pequeños (K200, K205 y K206) de 2000bls cada uno donde se almacena el asfalto producto que se despacha a clientes externos por carrotanques. Para estos productos se requiere almacenamiento en caliente debido a su incremento de la viscosidad con la disminución de la temperatura como se puede observar en la gráfica 2.

Gráfica 2. Curva reológica de los Fondos de Vacío.



Por ser los de mayor capacidad (170000 barriles c/u) y operar con las temperaturas más altas de los 10 tanques calientes de la refinería (350-450°F), se seleccionan para este estudio los tanques K2501 y K2502. El tanque K2806, a pesar de tener condiciones similares, no se tiene en cuenta por modificar su servicio a FDX regularmente.



Figura 7. K2502 Tanque caliente con fondos de vacío de la GRB.

5. ESQUEMA METODOLÓGICO

5.1. Desarrollo de un modelo de transferencia de calor general para un tanque de fondos de vacío (K2501/2) mediante balances de masa y energía.

Para reducir la complejidad del modelo se asumieron las siguientes pautas:

- Densidad y calor específico del producto líquido constantes.
- Mezcla perfecta del producto en el interior del tanque, es decir la temperatura del fluido en cualquier punto dentro del tanque es la misma, no hay dependencia de variables espaciales.
- La temperatura en la pared y en el techo del tanque es homogénea, (misma temperatura de pared en cualquier punto, sin considerar que internamente esté en contacto con el líquido o con aire sobre el líquido).
- Calor adicionado al sistema por la fuente externa (quemadores) constante: dos quemadores de 2,5 MMBTU/h cada uno, (en la realidad hay quemadores de tres capacidades: 1,5, 2,0 y 2,5 MMBTU/h, para efectos prácticos de este trabajo se contemplaran los de mayor capacidad).
- Pérdida de calor con el entorno por transferencia de calor por convección natural con el aire. La contribución de las pérdidas por radiación y conducción (suelo del tanque) no se consideran. Para la estimación del Coeficiente global de transferencia de calor, U, se asumió un sistema de pared plana, dadas las grandes dimensiones de los tanques; para los coeficientes de película se asumieron valores típicos de la literatura para hidrocarburos pesados y aire Anexo 2 (estimación del Coeficiente global de transferencia de calor U).
- El aislamiento actual de los tanques calientes es a base de capas de lana de vidrio en las paredes y de perlita expandida en el techo, el espesor es de dos pulgadas. Para simplificar el análisis se asume que la totalidad del aislamiento en el casco y en el techo es a base de la lana de vidrio con espesor de 2 pulgadas y con conductividad térmica de 0,27 BTU.in/h.ft².°F.

Masa constante en el tanque, es decir flujo de entrada de producto al tanque es igual al flujo de salida (no se analiza el caso con volumen variable en el tiempo dado que la complejidad matemática del modelo sale del alcance de este trabajo).

5.1.1. Balance de masa

Como la densidad se asume constante el balance de masa es igual al del volumen:

$$\frac{dm}{dt} = \dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} \rightarrow \frac{d(\rho V)}{dt} = \rho F_{in} - \rho F_{out} = 0 \quad ; \quad F_{in} = F_{out}$$

Donde V = volumen de producto en el tanque en cualquier instante t. (de las pautas constante), ft³.

F_{in} = Flujo de producto entrando al tanque, ft³/h.

F_{out} = Flujo de producto saliendo del tanque, ft³/h.

5.1.2. Balance de energía

El balance de energía esta dado por la acumulación de energía en el producto dentro del tanque y que es igual a la diferencia de los flujos de energía que ingresan y salen: unos asociados a las entalpias de las corrientes de entrada y salida y los otros asociados a transferencia de calor sin masa por la adición de calor por la fuente externa y las pérdidas de calor por convección natural con el medio ambiente:

$$E_{acum} = E_{in} - E_{out}$$

$$\frac{dU}{dt} = \dot{m}_{in}h_{in} + \dot{m}_{out}h_{out} + Q_{in} - Q_{loss}$$

$$\frac{d(\rho V c_v (T - T_{ref}))}{dt} = F_{in} \rho c_p (T_{in} - T_{ref}) + F_{out} \rho c_p (T - T_{ref}) + Q_{in} - UA(T - T_{\infty})$$

Considerando que: $c_v \approx c_p$; $F_{in} = F_{out} = F$; $\rho = cte$; $V = cte$; $T_{ref} = cte$

$$\rho V c_p \frac{dT}{dt} = F \rho c_p (T_{in} - T) + Q_{in} - UA(T - T_{\infty})$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{F}{V}(T_{in} - T) + \frac{Q_{in}}{\rho V c_p} - \frac{UA}{\rho V c_p}(T - T_{\infty})$$

Eliminando paréntesis:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{F}{V}T_{in} - \frac{F}{V}T + \frac{Q_{in}}{\rho V c_p} - \frac{UA}{\rho V c_p}T + \frac{UA}{\rho V c_p}T_{\infty}$$

Reorganizando:

$$\frac{dT}{dt} = \left(\frac{F}{V}T_{in} + \frac{Q_{in}}{\rho V c_p} + \frac{UA}{\rho V c_p}T_{\infty} \right) - \left(\frac{F}{V} + \frac{UA}{\rho V c_p} \right) T$$

Esta es una ecuación diferencial lineal de primer orden de la forma: $y' + \alpha y = \beta$

Cuya solución es

$$y(x) = y_0 \exp(-\alpha x) + \frac{\beta}{\alpha} (1 - \exp(-\alpha x))$$

Para nuestro caso:

$$\frac{F}{V}T_{in} + \frac{Q_{in}}{\rho V c_p} + \frac{UA}{\rho V c_p}T_{\infty} = \beta \quad ; \quad \frac{F}{V} + \frac{UA}{\rho V c_p} = \alpha$$

Para la condición inicial $T(t_0) = T_0 \quad ; \quad t_0 = 0$

Reemplazando en la ecuación y simplificando términos:

$$T(t) = T_0 \exp \left[- \left(\frac{F}{V} + \frac{UA}{\rho V c_p} \right) t \right] + \frac{FT_{in} + \frac{Q_{in} + UAT_{\infty}}{\rho c_p}}{F + \frac{UA}{\rho c_p}} \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{F}{V} + \frac{UA}{\rho V c_p} \right) t \right] \right\}$$

De acuerdo al modelo planteado la tendencia de temperatura del tanque depende de las condiciones operativas del sistema. Haciendo sensibilización con las constantes F, V, To, Tin, Qin (que son las grados de libertad del sistema) se encuentra una gran variabilidad en la tendencia de la temperatura (ver Anexo 3 Tendencia de la temperatura para diferentes valores de las constantes).

5.2. Aplicación del modelo obtenido para determinar el comportamiento de las tendencias de temperatura y pérdidas energéticas en el tanque K2501/2.

Se analiza la situación de almacenamiento de FDV del tanque K2501/2 con las siguientes condiciones (promedio típicas de la operación normal):

Producto: Fondos de vacío (FDV)

Gravedad específica a 400°F: 0.94

Calor específico a 400°F: 0.52BTU/lb°F

Volumen de producto en el tanque: constante e igual al 80% de su capacidad, 137,512kbls brutos (se asume este valor de acuerdo a histórico de volumen promedio almacenado en el tanque durante el año 2010).

Temperatura inicial del tanque (T_o): 400°F (temperatura ideal de almacenamiento de FDV).

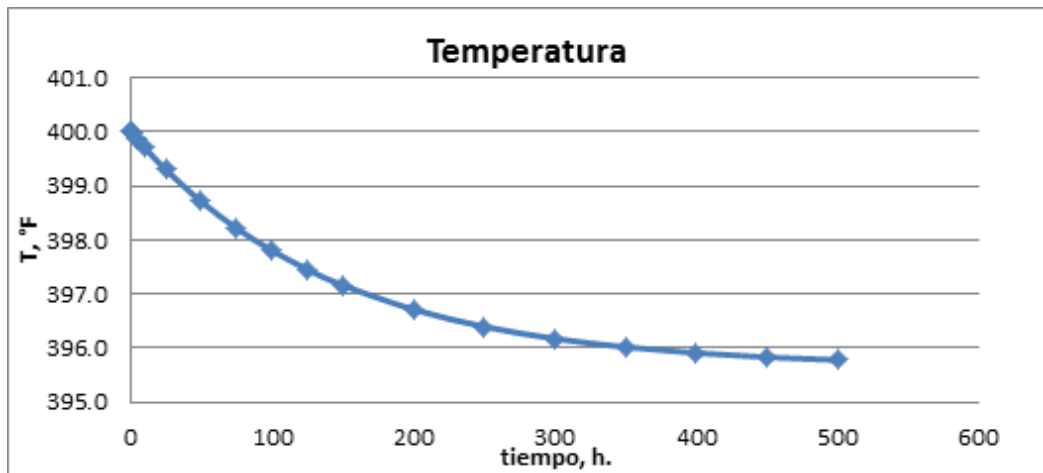
Flujo de entrada/salida (F): 22500bpd (equivalente a la mitad de la carga a la planta Demex, constante).

Temperatura de entrada de los FDV al tanque (T_{in}): 390°F (se asume una temperatura de entrada constante e igual al límite inferior típico de entrada).

Calor adicionado externo neto (Q_{in}): 2.5MMBTU/h. El tanque cuenta con dos quemadores de aproximadamente 2.5MMBTU/h cada uno para un total de 5.0MMBTU/h cuando están en operación ambos quemadores. Sin embargo se asume una eficiencia del 50% en la transferencia de calor, esta suposición se hace con base en eficiencias de transferencia de calor en sistemas que tengan una configuración similar como en calderas pirotubulares donde la eficiencia en el mejor de los casos es del 60%.

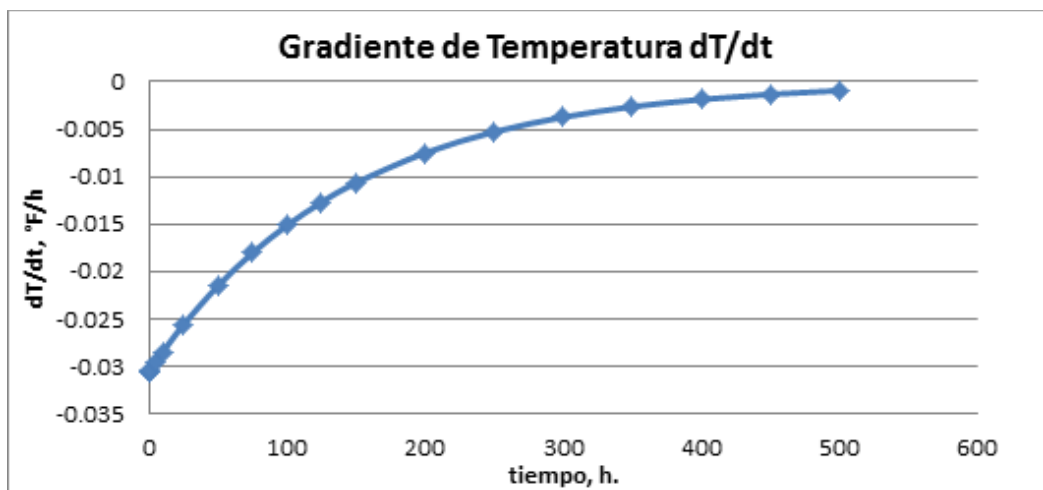
Bajo estas premisas la temperatura del tanque presenta el siguiente comportamiento en el tiempo conforme con la ecuación del modelo obtenido:

Gráfica 3. Tendencia de Temperatura para el tanque K2501/2



Con la ecuación diferencial inicial se puede obtener el gradiente de temperatura del tanque en función del tiempo:

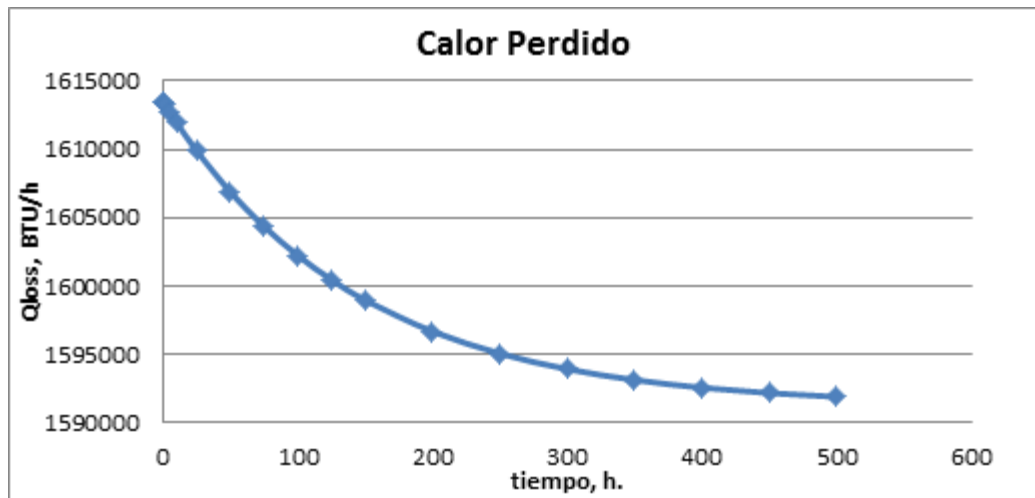
Gráfica 4. Tendencia del Gradiente de Temperatura para el tanque K2501/2



El calor perdido Q_{loss} se obtiene de la ecuación de transferencia de calor aplicada entre la temperatura del producto y la temperatura del ambiente con el área total y el coeficiente global de transferencia de calor:

$$Q_{loss} = UA(T-T_{\infty})$$

Gráfica 5. Tendencia de la Pérdida de Calor para el tanque K2501/2



5.3. Identificación del esquema logístico óptimo de operación de los tanques de fondos de vacío (K2501, K2502, K2806)

Para la optimización energética del sistema se considera la totalidad del almacenamiento de fondos de vacío: tanques K2501, K2502 y K2801; solo se contemplan ajustes operativos, no se consideran cambios al diseño de los equipos, al aislamiento o al sistema de adición de calor externo.

De acuerdo al anexo 3 (tendencias de temperatura a valores diferentes de constantes T_o , T_i , F , V y Q_{in} para el tanque K2501/2) y con las condiciones preestablecidas para el estudio del caso base se obtienen las siguientes conclusiones preliminares fundamentales para el análisis:

- En un tanque en operación recibe/entrega (flujo entrada y salida iguales y constantes) conforme el volumen de producto almacenado es mayor la disminución de la temperatura tiene a ser más baja, es decir por ejemplo un tanque con 100kbls de producto y con las condiciones estipuladas arriba pierde temperatura a una razón de 1°F/día, el mismo tanque con 25Kbls pierde a razón de 2°F/día.
- En un tanque a mínimo Flujo Recibe/Entrega la pérdida de temperatura es menor al inicio, el gradiente de temperatura es casi constante, sin embargo posteriormente con el pasar del tiempo el enfriamiento llega a

ser más fuerte que con un tanque en movimiento a alto flujo recibe/entrega.

El sistema de almacenamiento fondos de vacío normalmente consta de tres tanques cuyo número de quemadores por tanque es:

K2501 = 2 quemadores; K2502 = 2 quemadores; K2806 = 4 quemadores

Se asume una capacidad de 2.5MMBTU/h por quemador.

Considerando una operación global en los tres tanques con las siguientes condiciones:

Flujo total de entrada y salida = 45 KBPD (equivalente a la carga nominal de la unidad Demex).

Volumen total de FDV en los 3 tanques = 398170bls (223557ft³); equivalente al 70% de la capacidad máxima disponible (por históricos el volumen total oscila cercano a este valor)

Temperatura de entrada del producto: 390°F

Temperatura mínima en los tanques objetivo: 400°F

Considerando las conclusiones anteriores y realizando pruebas con el modelo variando la distribución del volumen y flujo a cada tanque se encuentra una configuración de consumo mínimo de gas con una operación de 6.7 quemadores del total de 8 que normalmente operan logando mantener estable la temperatura en 400°F. Reducción en el consumo de 3.25MMBTU/h.

Se puede pensar en dejar el K2801 sin Flujo R/E que de acuerdo con la segunda conclusión favorece la temperatura, pero como el flujo total es de 45KBPD debo incrementarse al doble el flujo en los otros dos tanques y por ello se baja la temperatura de estos y no se logra mantener los 400°F.

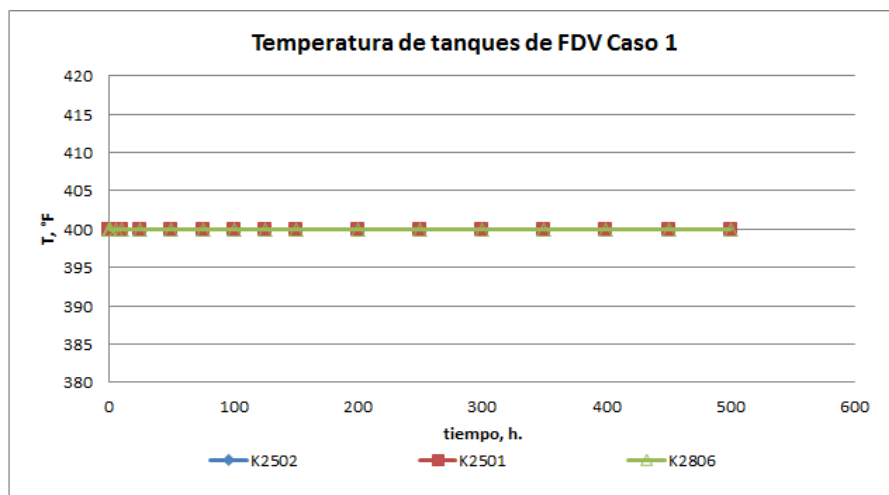
Tabla 2. Condición logística óptima para reducción de consumo energético en el almacenamiento de FDV

	K2501	K2502	K2806
Temp. Inicial To, °F	400	400	400
Temp. llegada FDV Tin, °F	390	390	390
Volumen, ft3	965097	965097	305363
Capacidad volumen, %	100%	100%	25%
Flujo Recibe/entrega, BPD	12404	12404	20191
Temperatura T a 500 h, °F	400	400	400
No. de quemadores E/S	2/2	2/2	2.67/4

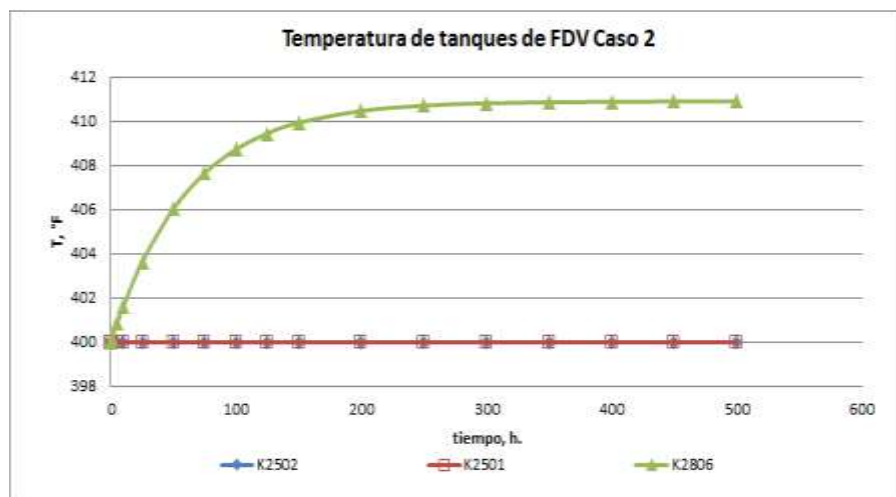
En las figuras a continuación se aprecia la tendencia de la temperatura en el tiempo para el esquema óptimo (caso 1), esquema con todos los quemadores operando (caso 2) y con el esquema sin quemadores operando (caso 3).

Hay que mencionar que es muy poco factible que la operación de la refinería se acomode a este esquema logístico para reducir el consumo energético y minimizar pérdidas en los tanques calientes, por el contrario es la logística de almacenamiento la que se debe acomodar a la operación de la refinería

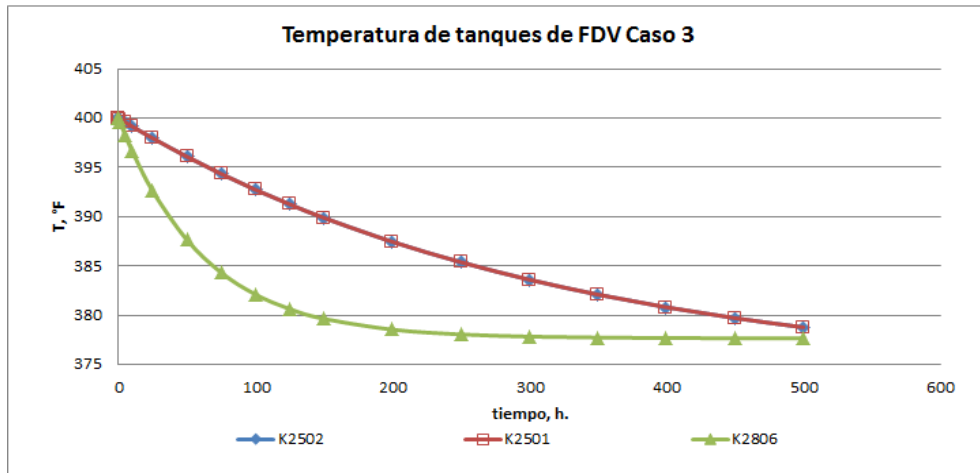
Gráfica 6. Temperatura de tanques de FDV con esquema operativo óptimo, 6.7 de 8 quemadores operando.



Gráfica 7. Temperatura de tanques de FDV con todos los quemadores operando (8 de 8).



Gráfica 8. Temperatura de tanques de FDV sin quemadores operando (0 de 8).



5.4 Análisis técnico de las condiciones de temperatura y desempeño energético del tanque K2501/2 de fondos de vacío con los diferentes tipos de materiales aislantes y espesores considerados para la optimización energética del sistema de sostenimiento de temperatura.

Para el análisis técnico se tomarán como base las condiciones halladas en el numeral 6.3 y solo se evaluará las condiciones de temperatura y desempeño energético del tanque K2501/2 con los aislante y espesores considerados: no se realizará la evaluación para el tanque K2806 dado que este almacenamiento con frecuencia cambia de esquema al servicio de FDX por requerimientos operativos de la refinería.

Las condiciones operativas del tanque se resaltan a continuación:

Tabla 3. Condiciones logísticas optimizadas para la operación del tanque K2501/2

	K2501/2
Temp. Inicial T_o , °F	400
Temp. llegada FDV T_{in} , °F	390
Volumen, ft ³	965097
Capacidad volumen, %	100%
Flujo Recibe/entrega, BPD	12404
Temperatura requerida T_a 500 h, °F	400

Se cuantifica la reducción de adición de calor con el tipo de aislamiento evaluado de tal forma que se conserve el mismo perfil de temperatura constante durante todo el tiempo (400°F).

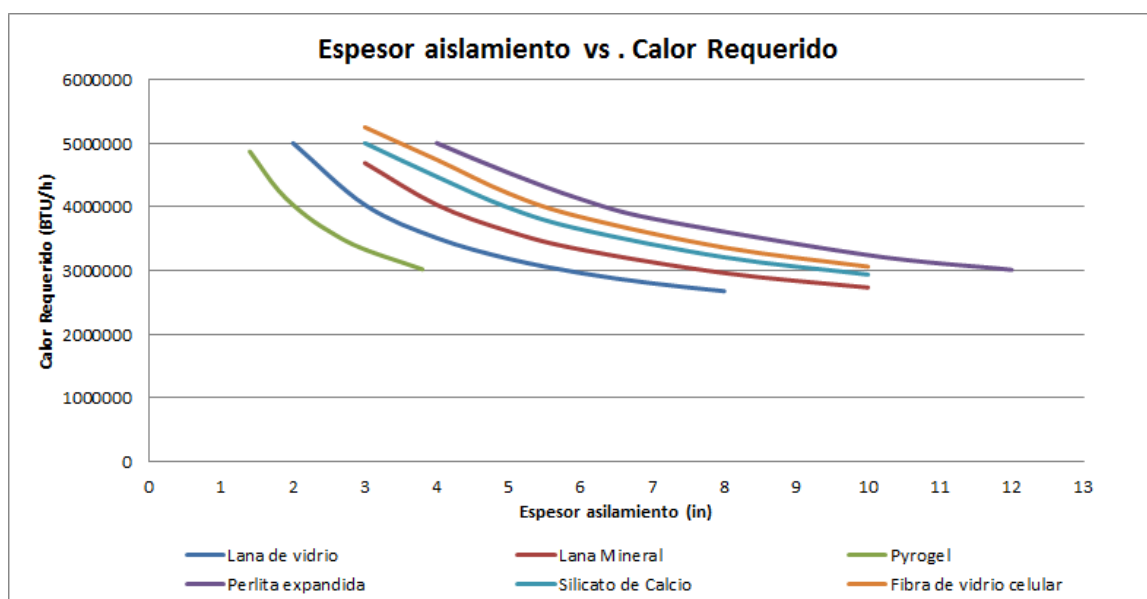
Para la evaluación se consideraron seis tipos de aislamientos térmicos:

Tabla 4. Tipos de materiales aislantes considerados

Material Aislante	Conductividad Térmica, k (BTU/h.ft.°F)
Lana de vidrio	0.022
Lana mineral de roca	0.030
Aerogel de Sílice	0.015
Perlita Expandida	0.047
Silicato de calcio	0.037
Fibra de vidrio celular	0.041

Los materiales aislantes de lana de vidrio, lana mineral y fibra de vidrio celular se consiguen comercialmente en presentaciones con espesores de 1", 1,5" y 2"; la perlita expandida y el silicato de calcio en presentaciones de 1", 2", 3", 4" y 5"; la aerogel de sílice viene en mantas de 0,2" y 0,4" de espesor.

Gráfica 9. Calor requerido en función del espesor para cada material aislante evaluado



Como es de esperarse, de acuerdo a la tabla de conductividades térmicas, el material aislante más efectivo es el aerogel de sílice el cual requiere un espesor de 4" para reducir el consumo de calor en un 40%, mientras que con el resto de los materiales se necesitan desde 6" (en el caso de la fibra de vidrio) hasta 12" (en el caso de la perlita expandida).

Ventajas de los aislamientos térmicos considerados

Lana de vidrio: Las principales ventajas de este tipo de aislamiento son: alta resistencia al fuego, alta resistencia a la contaminación microbiológica, buena resistencia a la mayoría de las sustancias químicas, alta resistencia al calor, disponible en diversas presentaciones.



Figura No 8. Lana de vidrio

Lana mineral de roca: Se elabora a partir de rocas diabásicas, es resistente al fuego e incombustible-ignifugo, tiene alta densidad (2 a 16 lb/pie³), presenta gran capacidad para soportar picos de temperatura, es resistente a la humedad y a la compresión, relativamente amigable con el medio ambiente (PH Neutro). También es un excelente material para aislamiento acústico, y es fácil ajustar e instalar.

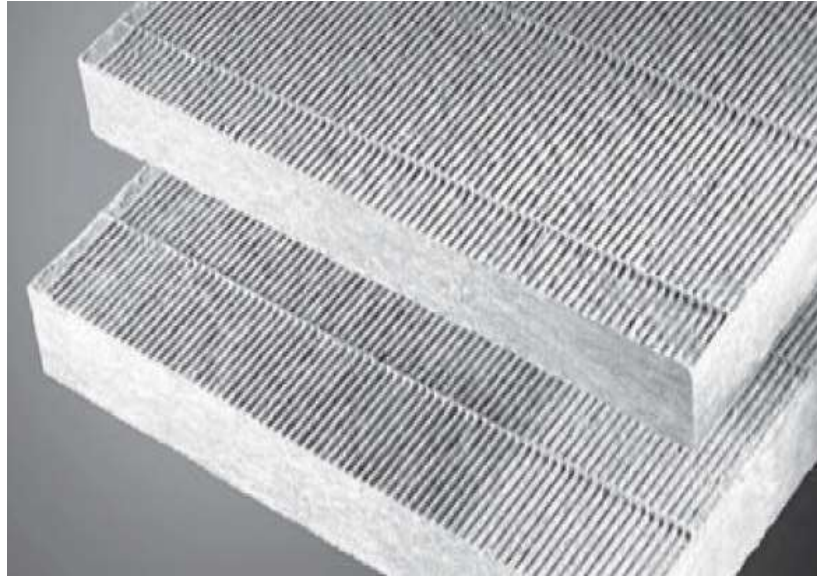


Figura No.9 Lana mineral de roca

Aerogel de sílice: Como aislante térmico, el aerogel se presenta en mantas flexibles (rango de servicio: -40°C a 650°C o -270°C a 90°C). Solo se presenta en espesores de 5mm y 10mm. Tiene propiedades mecánicas grandes para el rendimiento que ofrece, es hidrófobo (repele la humedad), es permeable (deja pasar el aire/vapor), previene la corrosión bajo el aislamiento, es ignífugo (no se incendia) y es resistente al trato duro (pisotones, golpes, etcétera). Su instalación es sencilla, el material se puede cortar con tijeras o cutters, disminuyendo el tiempo y los costos de mano de obra excesivos.



Figura No.10 Aerogel de sílice

Perlita expandida: La perlita es una roca volcánica que contiene del 2 al 5 por ciento de agua ligada. Es una sustancia químicamente inerte compuesta básicamente por sílice y aluminio, pero que contiene también algunas impurezas, como Na_2O , CaO , MgO y K_2O , que son higroscópicas, absorben humedad. Por consiguiente, debe reducirse evitar el contacto con el agua para una mayor durabilidad del material. La perlita expandida tiene una densidad media de alrededor de 130 kg/m^3 . La manipulación e instalación de la perlita expandida deben realizarse con precaución, ya que el polvo de perlita puede ocasionar envenenamiento crónico.

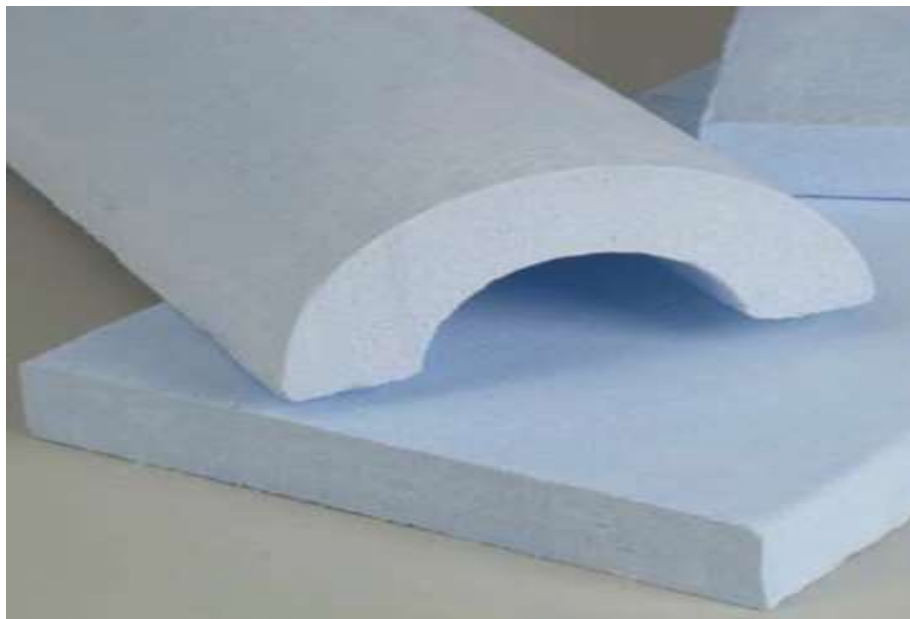


Figura No.11 Perlita expandida

Silicato de calcio: El silicato de calcio es un compuesto natural constituido de cal y sílice. Se usa en procesos industriales donde las tuberías y los equipos operan hasta $650 \text{ }^\circ\text{C}$ (1200°F), sirve como aislante ignífugo, es material no combustible, por lo que ofrece protección pasiva contra el fuego funcionando como retardante en todo incendio. Puede resistir temperaturas de hasta $1050 \text{ }^\circ\text{C}$. Se le considera como uno de los materiales más acertados en el tema de ignifugación.

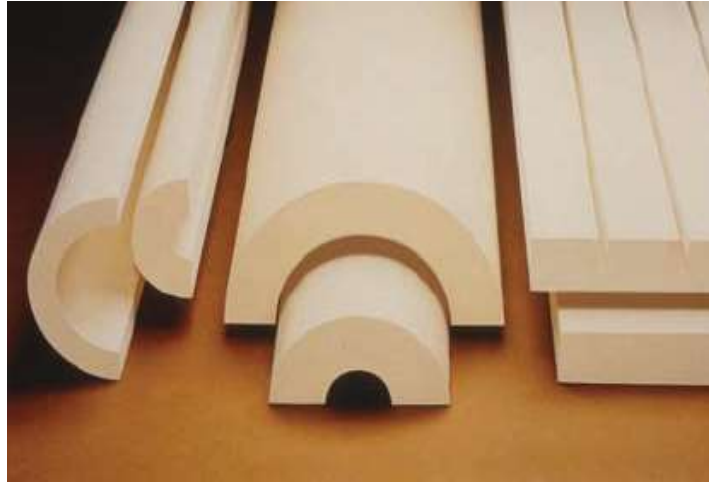


Figura No.12 Silicato de calcio

Fibra de vidrio celular: La fibra de vidrio celular es resistente al agua y al vapor, no combustible y además no absorbente. Como es de origen inorgánico, es resistente a las plagas (aves y roedores) y tiene un ciclo de vida largo plazo; brinda una resistencia extremadamente elevada a la compresión sin deformación bajo cargas permanentes, es dimensionalmente estable, no se contrae o hincha, es resistente a solventes orgánicos y a casi todos los ácidos, puede cortarse e instalarse fácilmente en sitio.



Figura No.13 Fibra de vidrio celular

5.5 Revisión técnica de requerimientos y disponibilidad de fuentes de calor alternas para la adición de calor y sostenimiento de temperatura del tanque K2501/2.

Calentamiento con vapor saturado de 600psig

En el área de balance se cuenta con disponibilidad de vapor de alta presión (600psig) proveniente de las calderas las cuales no operan a su capacidad máximo, por lo tanto es posible usar esta fuente de energía para la adición de calor en los tanques.

Temperatura del vapor saturado de 600psig T_{sat} : 489°F

Calor latente del vapor saturado de 600psig ΔH_{fg} : 728BTU/lb

Cantidad de vapor requerido para transferir 5MMBTU/h:

$$Q = \dot{m}\Delta H_{fg}$$

$$\dot{m} = \frac{Q}{\Delta H_{fg}} = \frac{5000000BTU/h}{728BTU/lb} = 3434.1lb/h$$

Estimación de área requerida para transferencia de calor:

$$Q = UA\Delta T = UA(T_{sat} - T_{Tanque})$$

Usando un típico de coeficiente global de transferencia de calor para vapor/hidrocarburo $U=60BTU/h.ft^2.^{\circ}F$ y reemplazando en la ecuación anterior el área de transferencia de calor requerida total es $A = 936,32ft^2$.

Calentamiento con resistencia eléctrica

Considerando el mismo tipo de sistema de calentamiento usado en otras aplicaciones similares en la refinería (mantas marca *Tyco* para calentamientos de tanques que almacenan bases parafínicas) el montaje de sistema consistiría de mantas *Tyco* tipo *RHS-H-1400-2* de 1400W y dimensiones 24"x 36" alimentadas por línea de tensión de 240 Voltios.

Para suplir el calor requerido (5MMBTU/h=1465kW) se requerirían:

$$Q = \frac{1465kW}{1.4kW} = 1046 \text{ mantas}$$

Cada manta requeriría un amperaje de:

$$Q = V \times I \rightarrow I = \frac{Q}{V} = \frac{1.4kW}{240V} = 5,83 \text{ Amp}$$

La generación de potencia en la unidad de balance es del orden de 600MW y normalmente se opera al 70% por lo que también habría disponibilidad de energía eléctrica para este sistema.

6. EVALUACIÓN ECONÓMICA

La evaluación económica consiste en el comparativo de los beneficios económicos resultantes al implementar cambios de material y espesor del aislamiento térmico del tanque K2501/2 de FDV; se cuantifica la relación en la disminución de los costos operativos (reducción del consumo de gas combustible) asegurando las condiciones operativas requeridas del tanque (temperatura mínima 400°F) y el costo de la inversión inicial (costo material e instalación). En el análisis económico no es considerada la variación en la fuente de calor dado que por el precio de este insumo comparado con las demás fuentes de energía disponibles consideradas (vapor y energía eléctrica,) la actual (gas combustible) es la que representa los menores costos operativos (sección 7.3).

Pautas para la evaluación económica:

- Se efectúa un comparativo según factor J. El factor J se define como la relación entre la diferencia de beneficio económico implementando el cambio (valor presente neto del caso de estudio) y el beneficio económico actual (valor presente neto del caso base) y el valor de la inversión requerida para efectuar el caso de estudio, el valor obtenido indica que tan justificable económicamente resulta el implementar la ejecución de un cambio considerando la inversión requerida y la condición inicial o base. En esta evaluación se calculará el factor J para la implementación del cambio de aislamiento para cada material a diferentes espesores de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$J_{M,e} = \frac{VPN_{\text{caso estudio}} - VPN_{\text{caso base}}}{\text{Costo Inversión Inicial}_{M,e}}$$

M = material aislante;

e = espesor aislante

$VPN_{\text{caso estudio}}$ = Valor Presente Neto del caso de estudio con el material M a espesor e .

$VPN_{\text{caso base}}$ = Valor Presente Neto del caso base (optimizado logísticamente, sin efectuar modificaciones al aislamiento ni a la fuente de calor).

Costo inversión Inicial $_{M,e}$ = Costo inversión Inicial con el material M a espesor e .

- La Tasa de interés asumida es la típica usada para las valoraciones económicas de proyectos en Ecopetrol 11% e.a.

- El tiempo para retorno de la inversión del proyecto es de 20 años. Se asume este periodo dado que el mantenimiento general de un tanque que almacena hidrocarburos pesados es de aproximadamente cada 20 años.
- El caso base (caso sin efectuar cambios al sistema de aislamiento) corresponde al sistema actual con las condiciones operativas (Flujo F, Volumen V, Temperatura inicial T_o y temperatura de llegada T_{in}) halladas en el numeral 6.3 para el esquema logístico óptimo; se considera únicamente los costos operativos y los costos de mantenimiento.
- Los casos propuestos corresponden a cambio total del recubrimiento del tanque (inversión inicial) y a los costos operativos y de mantenimiento resultantes en los que se incurren con el espesor y tipo de aislamiento considerado en cada caso.
- El costo de la inversión inicial corresponde al costo del material y costo de instalación y montaje: se asume cambio total del recubrimiento del casco y del techo del tanque.
- El costo de material corresponde al costo del aislamiento térmico y de la lámina de aluminio protectora superficial (foil).
- El precio de cada material aislante se considera fijo por cada ft² por pulgada de espesor, y proporcional al espesor considerado: es decir por ejemplo el precio de 1ft² de lana mineral de 3" de espesor es tres veces el precio de 1ft² de 1" de espesor e igual al precio de 2 ft² de 1.5" de espesor, no se considera cambios en el precio unitario (por ft²) del aislamiento por presentaciones a diferentes tamaños y por efectos de compras al por mayor material aislante.
- El precio de la lana de vidrio, el aerogel de sílice (Pyrogel) y la perlita expandida corresponde a un precio promedio de las diferentes presentaciones con las que se adquieren estos materiales en la refinería.
- El precio del silicato de calcio, lana mineral de roca y la fibra de vidrio celular es el promedio de los precios cotizados comercialmente a fabricantes diferentes.
- El precio del foil corresponde al precio al que se compra este material en la refinería.
- El costo del mantenimiento del aislamiento se asumió equivalente al 1% del precio de la totalidad del recubrimiento, la frecuencia de mantenimiento se considera anual (En la actualidad en la refinería no existe un plan de mantenimiento de estos sistemas).

- El precio del gas combustible se consideró constante e igual al promedio de la proyección a 5 años en la refinería: 3,5USD/MMBTU.
- El poder calorífico del gas combustible se considera constante: 1000BTU/kft³.
- De acuerdo a precios de instalación y montaje de recubrimientos de equipos (tambores, torres y tuberías mayores) en la refinería el costo aproximado de instalación por ft² de aislamiento es de 1,70USD. Este precio es independiente del espesor y del tipo de aislamiento e involucra también la instalación de la lámina de foil.

Tabla 5. Precios promedios de los materiales aislantes considerados

Material Aislante	Precio, (USD/ft².in)
Lana de vidrio	3.7
Lana mineral	4.5
Aerogel de Sílice	9.2
Perlita Expandida	4.3
Silicato de calcio	3.4
Fibra de vidrio celular	4.7
Lamina Foil	0.96
Instalación (material y foil)	1.70

6.1 Espesor óptimo económico sin considerar el Factor J

Para cada tipo de aislamiento el espesor óptimo económico se estima como el mínimo de la curva de costo total. El costo total se obtiene de la suma de la inversión inicial y el valor neto actual del consumo de gas combustible y valor neto actual de los costos de mantenimiento para el tiempo considerado del proyecto, 20 años.

Este espesor óptimo económico encontrado matemáticamente no considera el cumplimiento de las condiciones y requerimientos operacionales del sistema (temperatura mínima de operación en el tanque de 400°F: en algunos casos el espesor óptimo económico no satisface el logro del sostenimiento de la temperatura objetivo), solo refleja el costo total más bajo.

Tablas 6. Análisis sin factor J, Inversión inicial, VPN costo gas combustible, VPN costos mantenimiento, VPN costo total a diferentes espesores

		Fibra de vidrio					
Espesor aislamiento	in	3	4	5	6	7	8
Inversion Inicial	KUSD	608.7	772.3	883.5	1047.1	1210.8	1374.5
Costo gas combustible	KUSD/año	123.60	107.62	97.63	90.80	85.83	82.05
Costo mantenimiento	KUSD/año	6.1	7.7	8.8	10.5	12.1	13.7
VPN costo gas combustible	KUSD	\$1,107.9	\$964.6	\$875.1	\$813.8	\$769.3	\$735.4
VPN mantenimiento	KUSD	\$54.6	\$69.2	\$79.2	\$93.9	\$108.5	\$123.2
VPN Costo total	KUSD	\$1,771.1	\$1,806.2	\$1,837.8	\$1,954.8	\$2,088.6	\$2,233.1

		Lana mineral					
Espesor aislamiento	in	3	4	5	6	8	10
Inversion Inicial	KUSD	714.8	913.9	1112.9	1312.0	1710.1	2108.2
Costo gas combustible	KUSD/año	143.72	123.60	110.88	102.11	90.80	83.82
Costo mantenimiento	KUSD/año	7.1	9.1	11.1	13.1	17.1	21.1
VPN costo gas combustible	KUSD	\$1,288.2	\$1,107.9	\$993.9	\$915.2	\$813.8	\$751.3
VPN mantenimiento	KUSD	\$64.1	\$81.9	\$99.8	\$117.6	\$153.3	\$189.0
VPN Costo total	KUSD	\$2,067.1	\$2,103.7	\$2,206.6	\$2,344.8	\$2,677.2	\$3,048.4

		Aerogel de Silice					
Espesor aislamiento	in	1.4	1.8	2.2	2.6	3	3.8
Inversion Inicial	KUSD	686.0	848.3	1010.7	1173.1	1335.5	1660.2
Costo gas combustible	KUSD/año	149.23	130.45	117.88	108.88	102.11	92.61
Costo mantenimiento	KUSD/año	6.9	8.5	10.1	11.7	13.4	16.6
VPN costo gas combustible	KUSD	\$1,337.6	\$1,169.3	\$1,056.6	\$975.9	\$915.2	\$830.1
VPN mantenimiento	KUSD	\$61.5	\$76.0	\$90.6	\$105.1	\$119.7	\$148.8
VPN Costo total	KUSD	\$2,085.1	\$2,093.7	\$2,157.9	\$2,254.1	\$2,370.4	\$2,639.1

		Perlita Expandida					
Espesor aislamiento	in	4	5	6	7	10	12

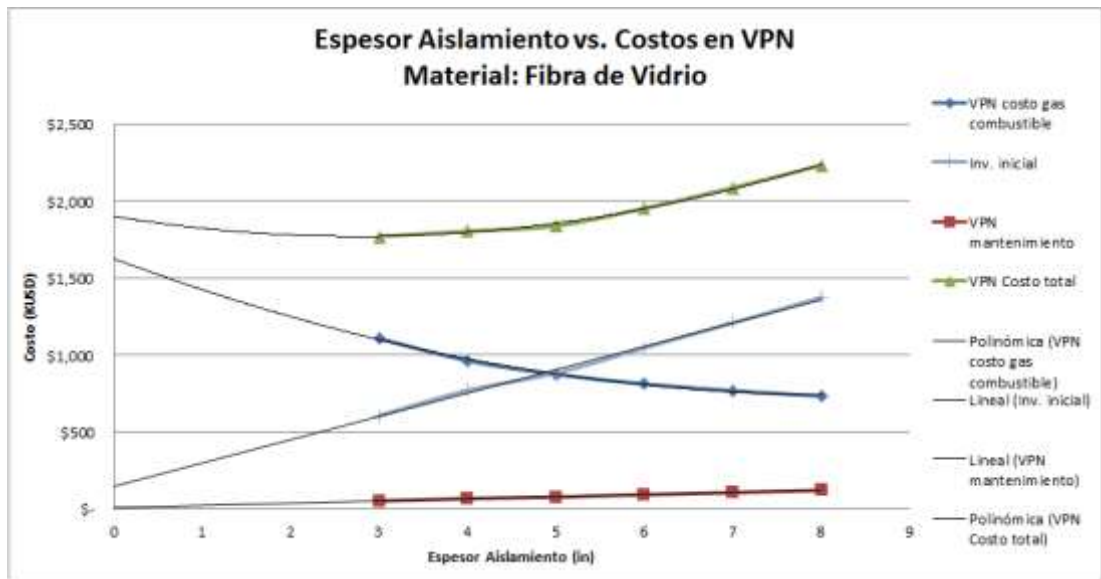
Inversion Inicial	KUSD	885.6	1077.6	1269.6	1461.6	2037.5	2421.5
Costo gas combustible	KUSD/año	153.30	139.01	126.36	117.00	99.43	92.33
Costo mantenimiento	KUSD/año	8.9	10.8	12.7	14.6	20.4	24.2
VPN costo gas combustible	KUSD	\$1,374.1	\$1,246.0	\$1,132.6	\$1,048.7	\$891.2	\$827.5
VPN mantenimiento	KUSD	\$79.4	\$96.6	\$113.8	\$131.0	\$182.6	\$217.0
VPN Costo total	KUSD	\$2,339.1	\$2,420.2	\$2,516.0	\$2,641.3	\$3,111.3	\$3,466.1

		Silicato de Calcio					
Espesor aislamiento	in	3	4	5	6	8	10
Inversion Inicial	KUSD	568.9	719.3	869.7	1020.1	1320.8	1621.6
Costo gas combustible	KUSD/año	153.30	137.16	122.21	111.84	98.38	90.03
Costo mantenimiento	KUSD/año	5.7	7.2	8.7	10.2	13.2	16.2
VPN costo gas combustible	KUSD	\$1,374.1	\$1,229.4	\$1,095.4	\$1,002.5	\$881.8	\$806.9
VPN mantenimiento	KUSD	\$51.0	\$64.5	\$78.0	\$91.4	\$118.4	\$145.4
VPN Costo total	KUSD	\$1,993.9	\$2,013.1	\$2,043.1	\$2,113.9	\$2,321.0	\$2,573.9

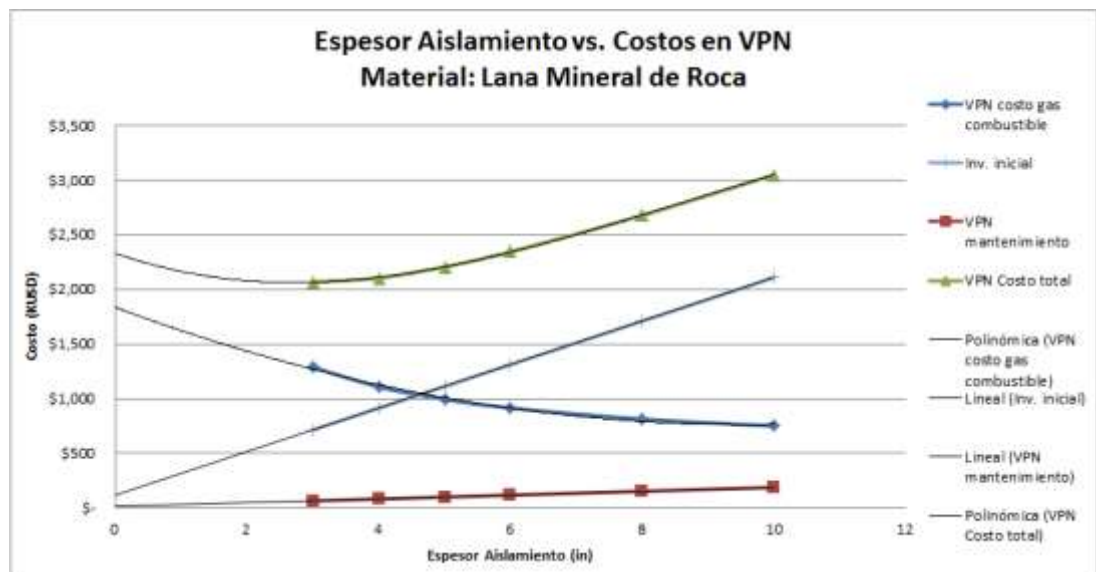
		Fibra de vidrio celular					
Espesor aislamiento	in	3	4	5	6	8	10
Inversion Inicial	KUSD	741.4	949.3	1157.2	1365.1	1780.9	2196.7
Costo gas combustible	KUSD/año	153.30	145.34	129.10	117.78	103.03	93.85
Costo mantenimiento	KUSD/año	7.4	9.5	11.6	13.7	17.8	22.0
VPN costo gas combustible	KUSD	\$1,374.1	\$1,302.7	\$1,157.1	\$1,055.7	\$923.5	\$841.2
VPN mantenimiento	KUSD	\$66.5	\$85.1	\$103.7	\$122.4	\$159.6	\$196.9
VPN Costo total	KUSD	\$2,181.9	\$2,337.1	\$2,418.0	\$2,543.1	\$2,864.0	\$3,234.8

En las gráficas 10 a 15 se ilustra de forma gráfica la información de las tablas No.6 donde se presentan valor presente neto del total de los costos como la suma de los costos operativos (costo del consumo de gas requerido) y de los costos de mantenimiento durante el periodo de estudio y el costo de la inversión inicial equivalente para el cambio total del aislamiento, se adiciona una curva de tendencia para extrapolar a valores inferiores y superiores.

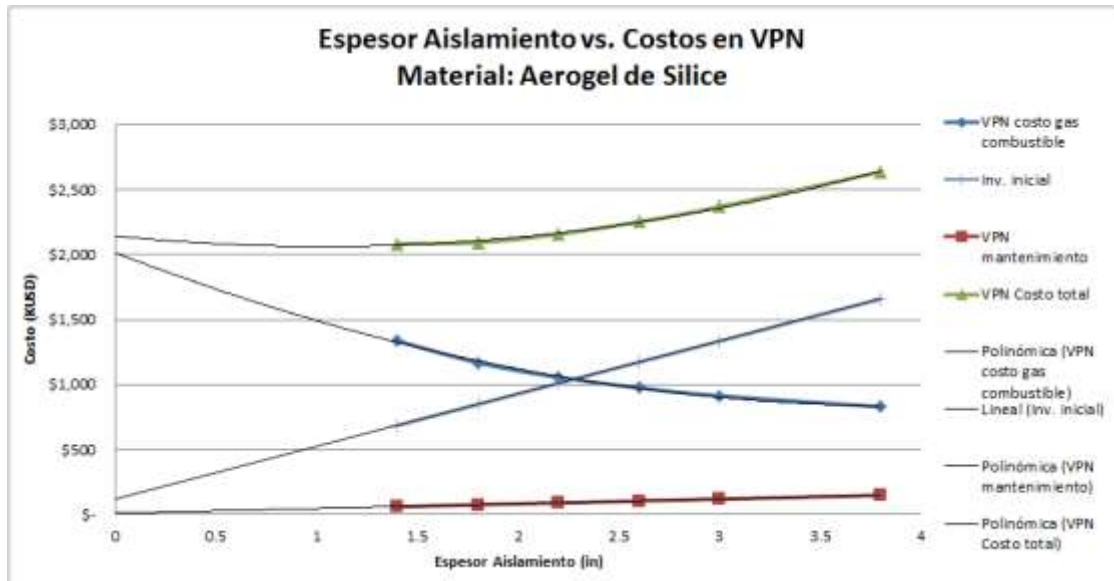
Gráfica 10. Fibra de vidrio, Costo total en función del espesor



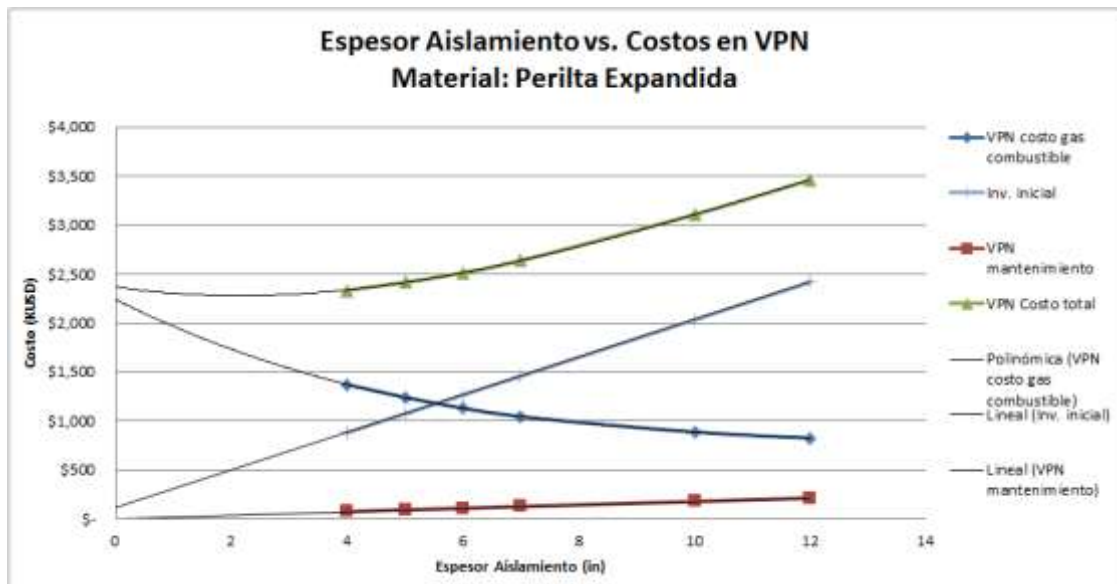
Gráfica 11. Lana mineral de roca, Costo total en función del espesor



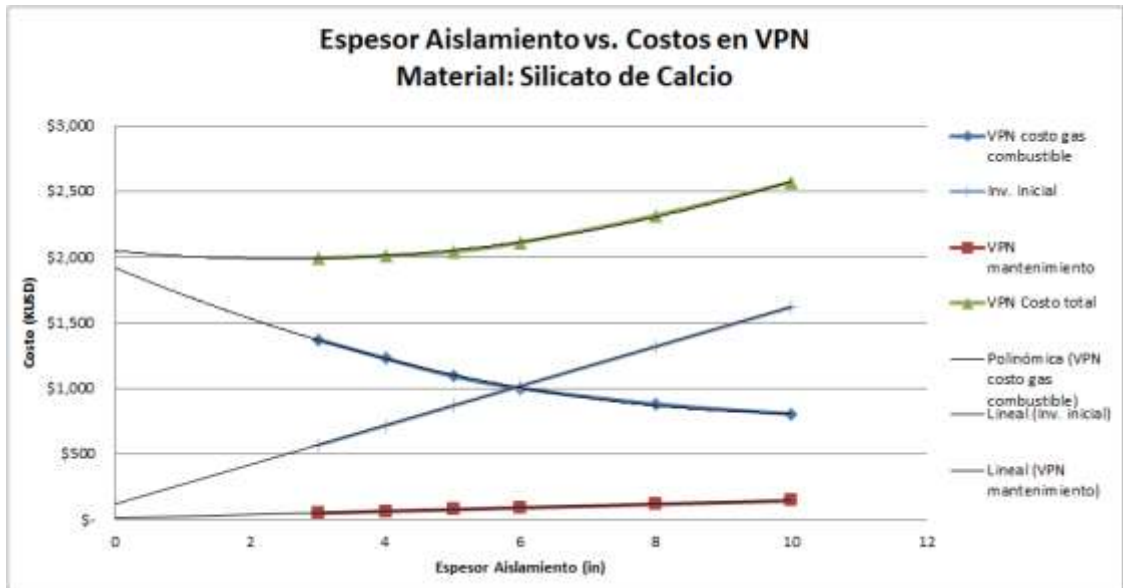
Gráfica 12. Aerogel de Sílice, Costo total en función del espesor



Gráfica 13. Perlita Expandida, Costo total en función del espesor



Gráfica 14. Silicato de Calcio, Costo total en función del espesor



Gráfica 15. Fibra de vidrio celular, Costo total en función del espesor

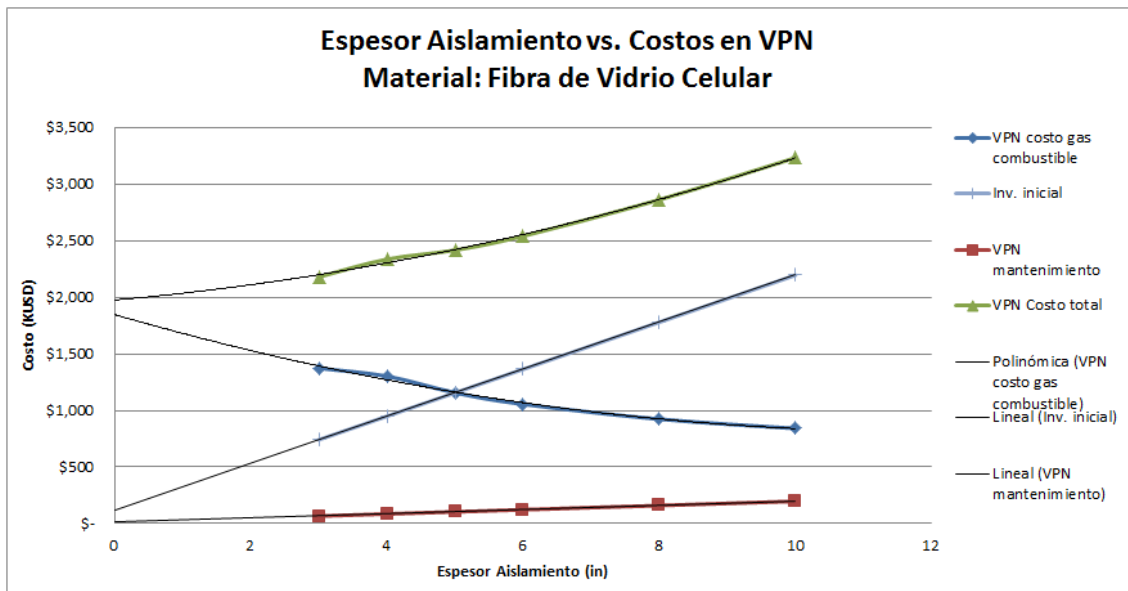


Tabla 7. Espesores óptimos de los materiales aislantes sin considerar factor J

Material Aislante	Espesor óptimo (in)
Lana de vidrio	2,6
Lana mineral de roca	2,5
Aerogel de Sílice	1,0
Perlita Expandida	2,2
Silicato de calcio	2,4
Fibra de vidrio celular	-

Estos espesores requieren una adición de calor externo superior a la máxima posible entregada por el sistema de calentamiento actual del tanque (2 quemadores de 2,5MMBTU/h cada uno) para el logro del sostenimiento de la temperatura en los 400°F. En el caso de la fibra de vidrio celular el óptimo económico resultante es sin aislamiento.

Adicionalmente la operación del tanque con estos espesores de aislamiento bajos implica una mayor temperatura externa en la lámina de foil lo que para la operación y actividades de los operadores no es conveniente por seguridad industrial.

6.2 Espesor optimo económico considerando el Factor J

Para el estimativo del factor J se plantea inicialmente el caso base (caso actual sin modificaciones) en el que solo se consideran los costos operativos y de mantenimiento para el sistema actual: tanque con aislamiento térmico a base de lana de vidrio con dos pulgadas de espesor. A continuación se plantean los casos para cada tipo y espesor de material aislante considerado, se realiza la proyección de costos operativos y de mantenimiento a 20 años, se asume que la inversión inicial se realiza en el año 0.

Tabla 8. Valor presente neto de la operación del tanque para el caso base (actual)

Material Aislante: Lana de Vidrio	Caso Base actual lana de vidrio 2"																				
Año	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032
Costos Operativos																					
Calor externo, MMBTU/H	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Costo Gas, USD/MMBTU	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
Costo calor externo, KUSD/año	153.3	153.3	153.3	153.3	153.3	153.3	153.3	153.3	153.3	153.3	153.3	153.3	153.3	153.3	153.3	153.3	153.3	153.3	153.3	153.3	153.3
Costo mantenimiento, KUSD/año	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52
Flujo de Caja Neto; KUSD	153.8	153.8	153.8	153.8	153.8	153.8	153.8	153.8	153.8	153.8	153.8	153.8	153.8	153.8	153.8	153.8	153.8	153.8	153.8	153.8	153.8
VPN Caso Base, KUSD	\$ 1,379																				

Tabla No.9. Valor presente neto de la operación del tanque para el caso con lana de vidrio con 3" de espesor

Material Aislante	Lana de vidrio espesor 3"																				
Año	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032
Costo aislamiento lámina unitaria ft2, USD	11.1																				
Total Costo aislamiento pared y techo, KUSD	491.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costo Foil unitario ft2, USD	0.96																				
Total Costo foil pared y techo, KUSD	42.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costo instalación aislamiento y foil ft2, USD	1.7																				
Costo instalación aislamiento y foil, KUSD	75.3																				
Total inversión inicial, KUSD	608.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Costos Operativos																					
Calor externo, MMBTU/H	4.03	4.03	4.03	4.03	4.03	4.03	4.03	4.03	4.03	4.03	4.03	4.03	4.03	4.03	4.03	4.03	4.03	4.03	4.03	4.03	4.03
Costo Gas, USD/MMBTU	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
Costo calor externo, KUSD	123.60	123.6	123.6	123.6	123.6	123.6	123.6	123.6	123.6	123.6	123.6	123.6	123.6	123.6	123.6	123.6	123.6	123.6	123.6	123.6	123.6
Costo mantenimiento, KUSD/año	0.61	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Flujo de Caja Neto; KUSD	732.89	124.2	124.2	124.2	124.2	124.2	124.2	124.2	124.2	124.2	124.2	124.2	124.2	124.2	124.2	124.2	124.2	124.2	124.2	124.2	124.2
VPN caso lana de vidrio de 3", KUSD	\$ 1,722																				
Factor J	0.5641																				

Igualmente para los otros materiales y espesores en las siguientes tablas se resumen los resultados encontrados de inversión inicial, ahorro en consumo de gas combustible, VPN y Factor J:

Tabla 10. Resultados análisis económico con Factor J para cada espesor de los materiales aislantes considerados

	Fibra de vidrio					
Espesor aislamiento, in	3	4	5	6	7	8
Inversion Inicial, KUSD	608.7	772.3	883.5	1047.1	1210.8	1374.5
Ahorro consumo combustible , KUSD/ano	29.70	45.68	55.67	62.50	67.47	71.25
VPN, KUSD	\$ 1,722	\$ 1,744	\$ 1,766	\$ 1,870	\$ 1,991	\$ 2,122
Factor J	0.5641	0.4728	0.4389	0.4695	0.5057	0.5410

	Lana mineral					
Espesor aislamiento, in	3	4	5	6	8	10
Inversion Inicial, KUSD	714.8	913.9	1112.9	1312.0	1710.1	2108.2
Ahorro consumo combustible , KUSD/ano	9.58	29.70	42.42	51.19	62.50	69.48
VPN, KUSD	\$ 2,009	\$ 2,030	\$ 2,117	\$ 2,239	\$ 2,539	\$ 2,878
Factor J	0.8824	0.7126	0.6632	0.6557	0.6786	0.7114

	Aerogel de Silice					
Espesor aislamiento, in	1.4	1.8	2.2	2.6	3	3.8
Inversion Inicial, KUSD	686.0	848.3	1010.7	1173.1	1335.5	1660.2
Ahorro consumo combustible , KUSD/ano	4.07	22.85	35.42	44.42	51.19	60.69
VPN, KUSD	\$ 2,030	\$ 2,025	\$ 2,076	\$ 2,159	\$ 2,263	\$ 2,505
Factor J	0.9491	0.7621	0.6903	0.6656	0.6619	0.6785

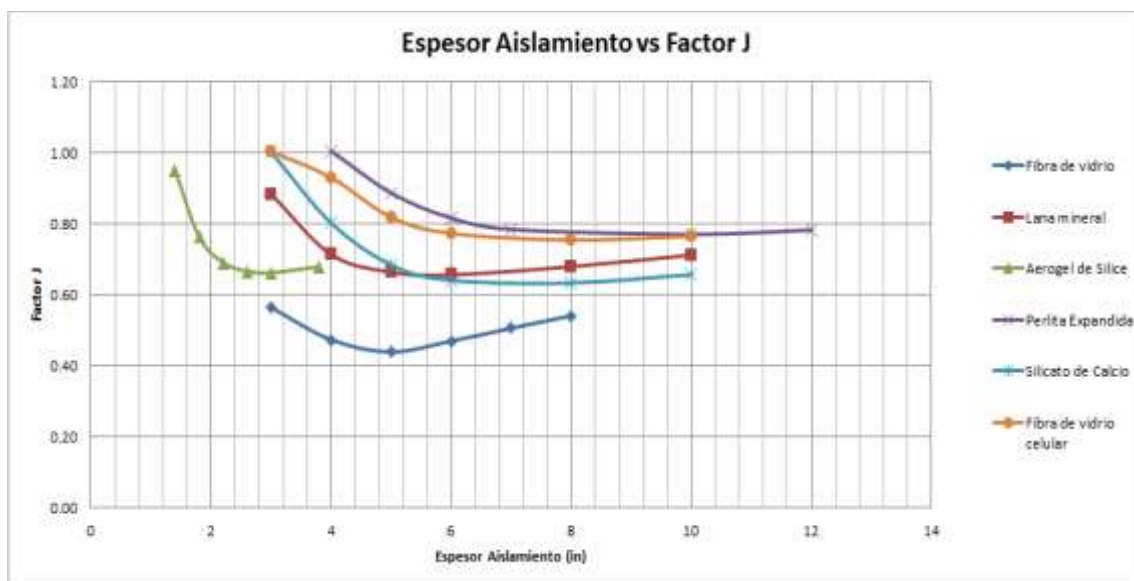
	Perlita Expandida					
Espesor aislamiento, in	4	5	6	7	10	12
Inversion Inicial, KUSD	885.6	1077.6	1269.6	1461.6	2037.5	2421.5
Ahorro consumo combustible , KUSD/ano	0.00	14.29	26.94	36.30	53.87	60.97
VPN, KUSD	\$ 2,268	\$ 2,333	\$ 2,414	\$ 2,523	\$ 2,947	\$ 3,271
Factor J	1.0037	0.8858	0.8151	0.7832	0.7697	0.7814

	Silicato de Calcio					
Espesor aislamiento, in	3	4	5	6	8	10

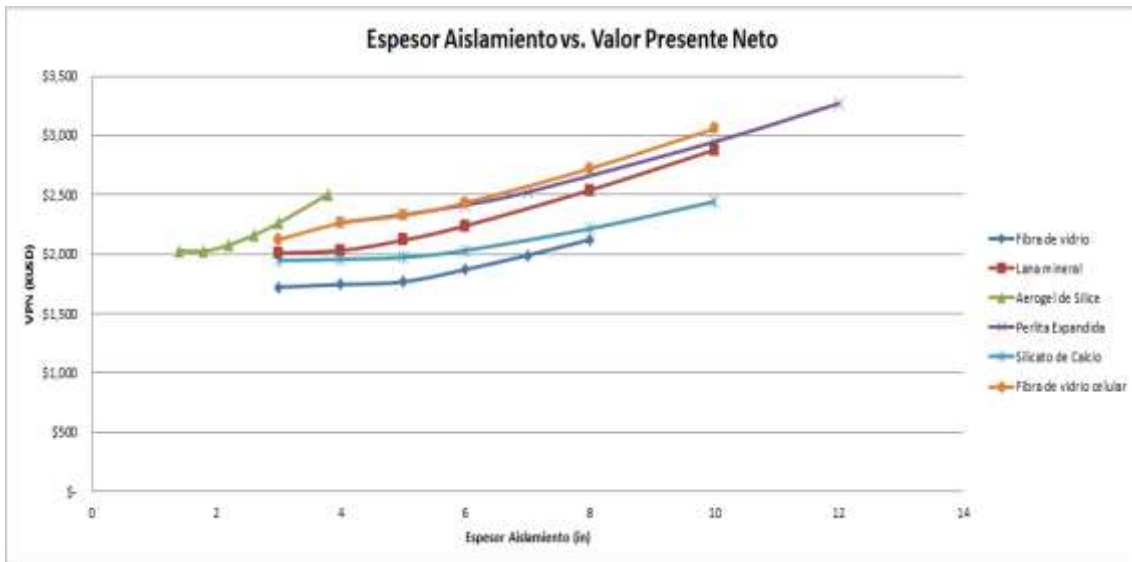
Inversion Inicial, KUSD	568.9	719.3	869.7	1020.1	1320.8	1621.6
Ahorro consumo combustible , KUSD/ano	0.00	16.14	31.09	41.46	54.92	63.27
VPN, KUSD	\$ 1,948	\$ 1,955	\$ 1,973	\$ 2,032	\$ 2,214	\$ 2,443
Factor J	1.0008	0.8014	0.6833	0.6401	0.6328	0.6564

	Fibra de vidrio celular					
Esesor aislamiento, in	3	4	5	6	8	10
Inversion Inicial, KUSD	741.4	949.3	1157.2	1365.1	1780.9	2196.7
Ahorro consumo combustible , KUSD/ano	0.00	7.96	24.20	35.52	50.27	59.45
VPN, KUSD	\$ 2,122	\$ 2,260	\$ 2,325	\$ 2,433	\$ 2,720	\$ 3,058
Factor J	1.0027	0.9289	0.8175	0.7723	0.7534	0.7643

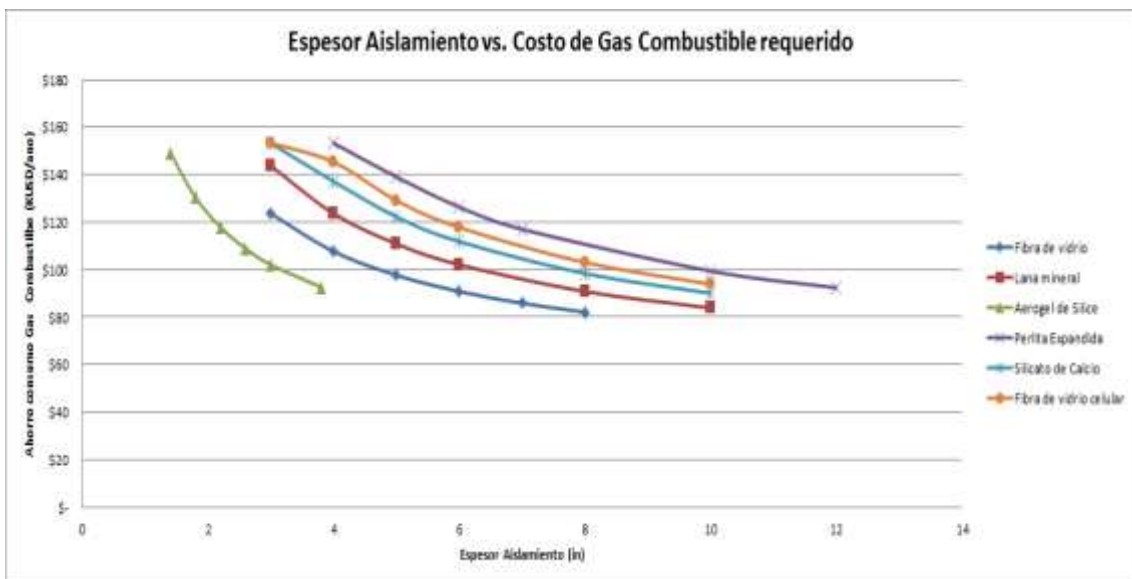
Gráfica 16. Factor J en función del espesor para cada material aislante con precios actuales



Gráfica 17. VPN en función del espesor para cada material aislante



Gráfica 18. Costo del gas combustible requerido en función del espesor para cada material aislante



El espesor óptimo de cada material corresponde al mínimo de la gráfica del Factor J, sin embargo para que el proyecto represente rentabilidad el factor J debe ser menor o igual a 0 por lo tanto con los precios actuales utilizados no han recuperación de la inversión inicial; la reducción en el consumo de gas combustible no es suficiente para retornar la inversión al cabo de los 20 años estipulados como tiempo de retorno de inversión del proyecto.

Tabla 11. Espesor óptimo de los materiales aislantes considerando el factor J

Material Aislante	Espesor óptimo (in)
lana de vidrio	5,0
Lana mineral de roca	5,4
Aerogel de Sílice	2,8
Perlita Expandida	9,0
Silicato de calcio	6,8
Fibra de vidrio celular	7,2

6.3 Sensibilización económica y Análisis de Riesgos

Sensibilización económica

Se efectuó una sensibilización aumentando el horizonte tiempo del proyecto aumentando a 30 años el tiempo de retorno de inversión resultando que aún se está lejos de ser rentable el proyecto, la disminución de los factores J es del orden de 0.05.

Para lograr encontrar rentable el cambio del recubrimiento aislante del tanque se simuló un análisis económico variando los precios de los materiales aislantes hasta encontrar los valores hipotéticos que representaran un factor J igual a 0, en resumen estos valores correspondieron en promedio a una reducción de precios aproximada del 60% del precio actual.

Gráfica 19. Factor J en función del espesor para cada material aislante con precios hipotéticos requeridos para $J = 0$

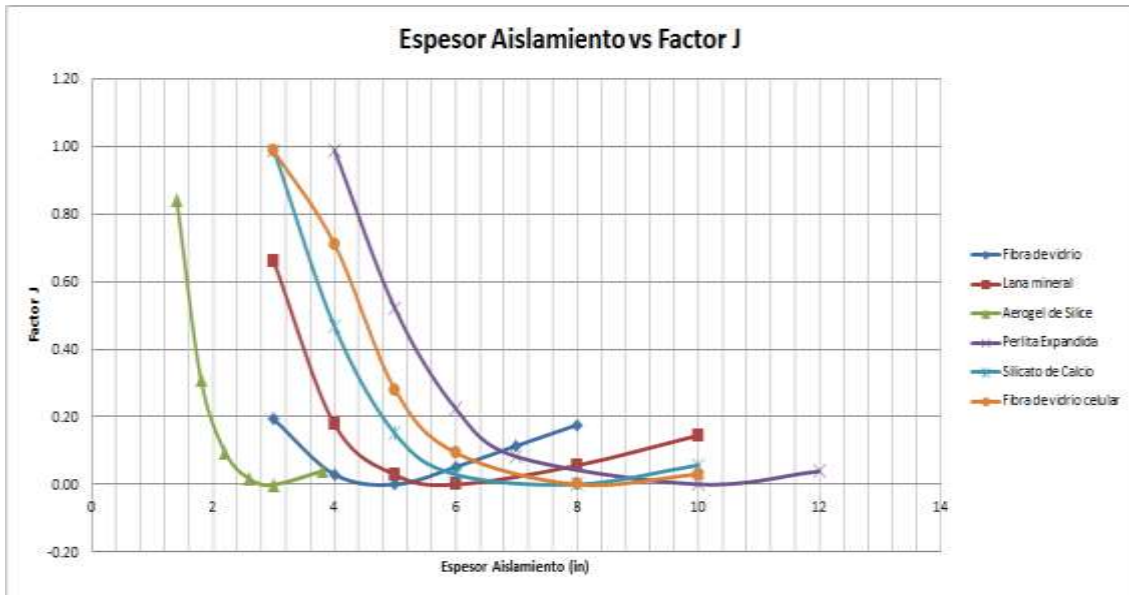


Tabla 12. Precios hipotéticos requeridos de los materiales para lograr que Factor J = 0

Material Aislante	Precio ideal (USD/ft ² .in)	Porcentaje del precio real
lana de vidrio	3.7	56%
Lana mineral	4.5	34%
Aerogel de Sílice	9.2	33%
Perlita Expandida	4.3	22%
Silicato de calcio	3.4	36%
Fibra de vidrio celular	4.7	24%
Lamina Foil	0.96	50%
Instalación (material y foil)	1.70	50%

Análisis de riesgos

Para el caso del cambio total del aislamiento actual del tanque a base de lana de vidrio de 2" de espesor a un recubrimiento de 5" de espesor del mismo

material aislante (de acuerdo al factor J es la menor opción) se resumen en la siguiente tabla los riesgos más representativos con su probabilidad de ocurrencia, consecuencia y acción de mitigación:

Tabla 13. Análisis de Riesgos

Riesgo	Probabilidad de ocurrencia	Consecuencia	Mitigación
No disponibilidad del material requerido	Baja. Oferta considerable del material en el mercado, asimismo hay existencias disponibles en bodega de materiales de la refinería.	Retraso en el tiempo de ejecución de la obra, sobrecosto por cláusulas de cumplimiento con el contratista.	Asegurar tempranamente la gestión de contras del material e insumos.
Cambio de servicio del tanque en un futuro cercano	Media. Los proyectos futuros de modernización de la refinería podrían concebir cambios de servicios en los almacenamientos o incluso eliminación de algunos tanques	Pérdida de la Inversión económica inicial.	Programa para interrelaciones con los proyectos presentes y futuros de la refinería.
Deterioro severo en la integridad mecánica del tanque	Media. Estos tanques tienen fechas para inspección y mantenimiento general vencidas.	Retraso en ejecución del proyecto, afectación a la integridad del aislamiento: sobrecostos	Inspección de la condición mecánica del tanque, mantenimiento.
Retraso o demora en la ejecución del proyecto (cambio del aislamiento)	Alta. Demoras en la contratación, Cambios de prioridades, limitación en la asignación de recursos, retrasos en las compras.	Incremento en sobrecostos, cláusulas de cumplimiento con el contratista vencidas.	Gestión adecuada y oportuna de compras, contratación y ejecución de obra.
Sobrecosto del aislamiento y/o instalación	Baja. Alta oferta en el mercado de aislamientos térmicos. Precios típicos para mano de obra y montajes.	Menor rentabilidad del proyecto	Realización de inteligencia de mercado.
No disponibilidad de presupuesto para el proyecto	Alta. Destinación de presupuesto a otras actividades de mayor prioridad.	Retraso en la ejecución del proyecto, sobrecostos.	Inclusión de requerimientos financieros en el Plan anual de compras y contratación de la refinería.
Riesgo	Probabilidad de ocurrencia	Consecuencia	Mitigación
No disminución en los costos operativos una	Baja. Desarrollo de análisis	Retorno sobre la inversión menor al estipulado.	Revisión de las bases técnicas del proyecto,

vez implementado el cambio del aislamiento	técnico completo.		Operación adecuada de los sistemas asociados al tanque, medición confiable.
Ocurrencia de accidentes durante la ejecución del proyecto	Baja. Estándares de seguridad industrial y de proceso aplicados a la ejecución del proyecto.	Retrasos, sobrecostos, afectación a la imagen.	Implementación de grupo de apoyo y revisor del cumplimiento de lineamientos de seguridad industrial y de proceso.

6.4 Comparativo costos de fuentes de calor

En la tabla a continuación se presenta el comparativo de precios de las fuentes de calor consideradas:

Tabla 14. Comparativo costos fuentes de calor

Fuente	Costo unitario*	Cantidad requerida	Costo total
Gas combustible	3,50 USD/MBTU	5,0 MMBTU/h	17,5 USD/h
Vapor de alta presión (600#)	5,38 USD/Klb	33.4 Klb/h	179,5USD/h
Energía eléctrica	50 USD/MWh (170.61USD/MMBTU)	5,0 MMBTU/h	853,1USD/h

*Precios internos para la refinería

Como se aprecia en la tabla la fuente de calor actual es la más económica y dista bastante de las otras consideradas, por lo que no se justifica hacer un análisis técnico-económico al respecto del cambio de la fuente de calor.

Tabla resumen comparativa

Adicional al comparativo económico se debe considerar las propiedades mecánicas y facilidades de instalación de cada material aislante contemplado, propiedades como: resistencia a la humedad, durabilidad, resistencia al fuego, toxicidad y requerimientos de instalación. Con base en la literatura en la siguiente tabla se hace una calificación cualitativa al respecto de estas características para cada material (se incluye el resultado del análisis económico realizado):

Tabla 15. Resumen comparativo del análisis económico y de calificación cualitativa de propiedades de los materiales aislantes considerados

Material	Espesor óptimo, in	Precio, USD/ft ² .in	Factor J	Facilidad instalación	Resistencia a humedad	Resistencia al fuego	Toxicidad
lana de vidrio	5,0	3.7	0,439	Media	Alta	Alta	Alta
Lana mineral	5,4	4.5	0,658	Media	Baja	Alta	Baja
Aerogel de Sílice	2,8	9.2	0,663	Alta	Alta	Alta	Baja
Perlita Expandida	9,0	4.3	0,769	Baja	Media	Alta	Media
Silicato de calico	6,8	3.4	0,632	Media	Media	Alta	Baja
Fibra de vidrio celular	7,2	4.7	0,771	Alta	Media	Alta	Baja

7. CONCLUSIONES

De acuerdo al análisis técnico y financiero realizado no es rentable para la operación efectuar el cambio tecnológico del aislamiento térmico actual del tanque K2501/2 a otro material aislante o a otro espesor.

La fuente de energía externa más económica para contribuir con el sostenimiento de la temperatura en los tanques es la usada actualmente, quema de gas combustible con quemadores inmersos.

Para un estudio más aproximado a la realidad es preciso considerar en el modelo de transferencia de calor las pérdidas energéticas asociadas a la radiación hacia el ambiente que de acuerdo con la literatura pueden corresponder hasta el 30% del total.

La variable de mayor sensibilidad en el desempeño energético de un tanque que recibe y entrega es la temperatura de entrada del producto; esta es determinante para el sostenimiento de la temperatura del tanque.

En un tanque en operación recibe/entrega conforme el volumen de producto almacenado es mayor la disminución de la temperatura tiene a ser más baja, por ejemplo un tanque con 100kbls de producto pierde temperatura a una razón menor que el mismo tanque con 25Kbls.

Comparando la operación de un tanque con volumen constante a bajo y alto flujo Recibe/Entrega en la condición de bajo flujo la pérdida de temperatura es menor al inicio, sin embargo posteriormente con el pasar del tiempo el enfriamiento llega a ser más fuerte que con un tanque en movimiento a alto flujo.

Considerando todo el sistema de almacenamiento actual de fondos de vacío (K2501, K2502 y K2806) es posible reducir el consumo de gas combustible de 8 a 6,7 quemadores en operación (3,23MMBTU/h menos) con ajustes operativos, sin embargo en la práctica la rigidez que representa este esquema es inviable, la logística de almacenamiento es para flexibilizar los procesos.

El resultado del estudio arrojó valores altos de espesores óptimos de los materiales analizados debido a las condiciones adversas que se emplearon en el modelo (primordialmente la condición de temperatura de ingreso del producto inferior a la temperatura objetivo del tanque).

Después de realizar un análisis de sensibilidad en el que se calculan los precios hipotéticos de los aislantes térmicos estudiados requeridos para que la evaluación económica sea favorable y el factor J sea 0, se determina que el material que podría ser usado en el caso de una reducción de precios es la perlita expandida. La reducción del precio en este material tendría que ser de un 22% y corresponde a la menor reducción entre los materiales estudiados. Se recomienda en caso de presentarse modificaciones en los precios comerciales contemplar este material como primera opción.

8. BIBLIOGRAFIA

LONG, B., GARNER, B; Guide to storage tanks and equipment; Professional Engineering Publishing, 1988.

DIGRADO, B., THORP, G.; The aboveground steel storage tank handbook; John Wiley & Sons; 2004

GARZON, G.; Aislamiento de tanques que almacenan productos calientes; Superintendencia de Mantenimiento, Complejo industrial de Barrancabermeja, Empresa Colombiana de Petróleos; 1981

FLOREZ, L.; Memorias primer seminario de tanques y afines; Superintendencia técnica, Complejo industrial de Barrancabermeja, Empresa Colombiana de Petróleos; 1983

LOPEZ, A.; Manual de construcción y reparación de tanques; Complejo industrial de Barrancabermeja, Empresa Colombiana de Petróleos; 1984

TURNER, W., MALLOY, J.; Thermal Insulation Handbook; R.E. Krieger, McGraw-Hill edition; 1981

NANDI, D.N.; Handbook on Refractories; Tata McGraw, New Delhi, 1987

KERN D.Q. Procesos de Transferencia de Calor. México: McGraw Hill. 1997.

PERRY, Robert et all. (1994). Manual del Ingeniero Químico. México: McGraw Hill. 1994

API-STD-650-1998 Welded Steel Tanks for Oil Storage-Tenth Edition; Addendum 1: January 2000; Addendum 2: November 2001; Addendum 3: September 2003; Addendum 4: December 2005 (Tanques soldados de acero para almacenamiento de petróleo).

API 620. Recommended Rules for Design and Construction of Large Welded, Low Pressure Storage tanks. Última edición

ISOVER; Manual de aislamiento en la industria; Mercaillament, Salvador escoda s.a.

EBALL, A; Cost analysis and thickness optimization of thermal insulation materials used in residential buildings in Saudi Arabia; The 6th Saudi Engineering Conference, KFUPM, Dhahran, December 2002

SETHURAM, C.; Proper selection of insulation material is an art.

<http://www.grupojpcalderas.com/aislamiento.php>

<http://www.ssinsulation.co.in/products.html#2>

http://www.globalspec.com/FeaturedProducts/Detail/PittsburghCorning/Hot_Tank_Base_Insulation/145530/0

http://www.construmatica.com/bedec/f/1446/1/B7C4_01

<http://www.indiamart.com/ssinsulation/insulation-materials-tank.html>

http://www.wbdg.org/design/midg_materials.php

<http://www.fiberglasscolombia.com/>

<http://euroaislantes.co.cr/productos/silicato-de-calcio.html>

<http://www.iig-llc.com/> industrial insulation group LLC

www.aerogel.com

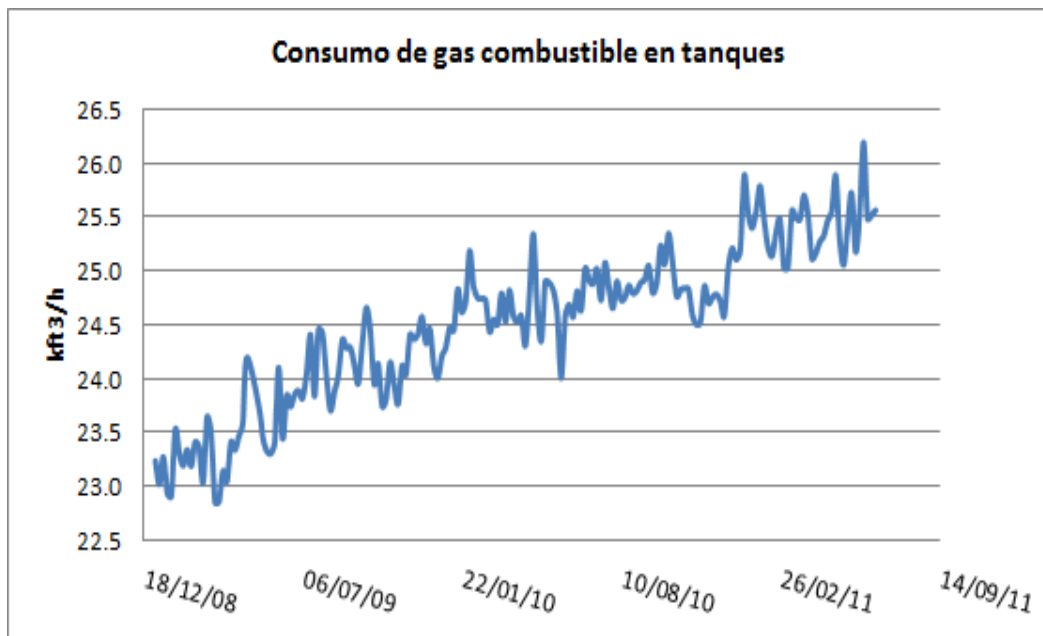
www.tyco.com

9. ANEXOS

Anexo A. Tendencia del incremento de gas combustible hacia tanques de almacenamiento de productos calientes de la refinería de Barrancabermeja y deterioro del aislamiento térmico.

Se puede atribuir el aumento de consumo de gas a un mayor requerimiento de almacenamiento de productos pesados como consecuencia del procesamiento cada vez mayor de crudos pesados y también a temperaturas de entrada de producto a los tanques más bajas.

Gráfica No.1. Consumo promedio diario de gas combustible a quemadores de tanques calientes



Estado actual del techo del tanque K2501

Figura 14. Fotografías estado aislamiento térmico techo K2501

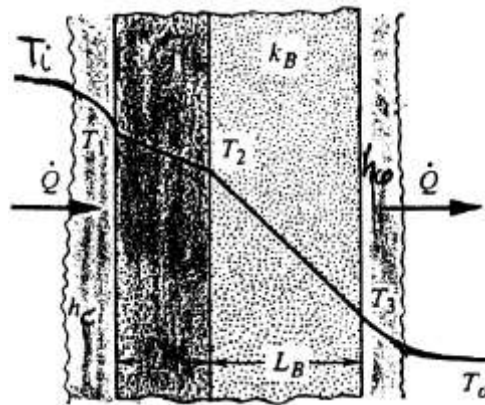


Anexo B. Estimación del Coeficiente global de transferencia de calor U.

Pared plana en contacto con fluidos a diferente temperatura.

La figura a continuación muestra una pared plana compuesta de dos capas, A y B, de materiales sólidos limitada en cada cara por fluidos. La sección transversal tiene un área A y los espesores y las conductividades térmicas de las capas A y B son L_A , k_A , L_B y k_B respectivamente:

Figura 15. Transferencia de calor en pared plana



Se transfiere calor de un fluido caliente a la temperatura i T a la superficie interior de la pared (En este caso la superficie permanece constante al ser la pared plana), con un coeficiente de transferencia de calor por convección h_{ci} y de la superficie exterior de la pared a un fluido frío a la temperatura T_o con un coeficiente de transferencia de calor por convección h_{co}

La ley de enfriamiento de Newton nos dice que:

$$q = \frac{\dot{Q}}{A} = h_c \Delta T = \frac{\Delta T}{\frac{1}{h_c}} = \frac{\Delta T}{R_{tconv}}$$

Donde:

R_{tconv} = Resistencia térmica convectiva

En régimen estacionario el flujo de calor a través de la pared es constante, con lo que:

$$q = \frac{\dot{Q}}{A} = \frac{T_i - T_1}{\frac{1}{h_{ci}}} = \frac{T_1 - T_2}{\frac{L_A}{k_A}} = \frac{T_2 - T_3}{\frac{L_B}{k_B}} = \frac{\dot{Q}}{A} = \frac{T_i - T_1}{\frac{1}{h_{ci}}}$$

De donde se deduce que:

$$q = \frac{\dot{Q}}{A} = \frac{T_i - T_o}{\frac{1}{h_{ci}} + \frac{L_A}{k_A} + \frac{L_B}{k_B} + \frac{1}{h_{co}}}$$

Si se define el coeficiente global de transferencia de calor, U, por medio de la relación:

$$q = \frac{\dot{Q}}{A} = U(T_i - T_o)$$

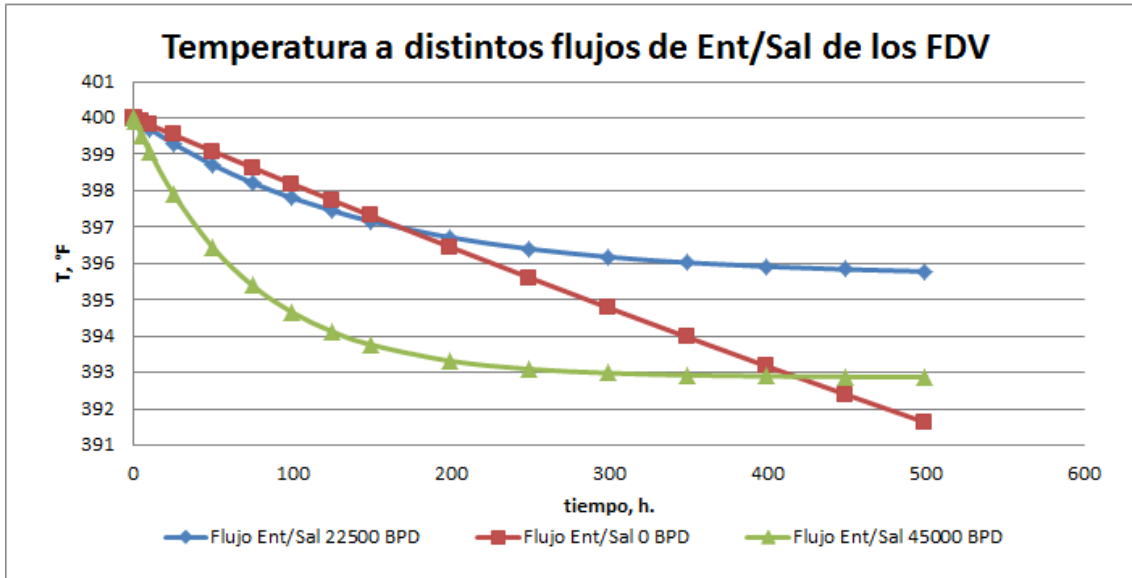
Se tiene que:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_{ci}} + \frac{L_A}{k_A} + \frac{L_B}{k_B} + \frac{1}{h_{co}}$$

Anexo C. Tendencia de la temperatura para diferentes condiciones de operación caso ejemplo tanque K2502 FDV de acuerdo al modelo desarrollado. Cambia la variable a la que se hace referencia, las demás variables se mantienen constantes e iguales a los valores del caso base.

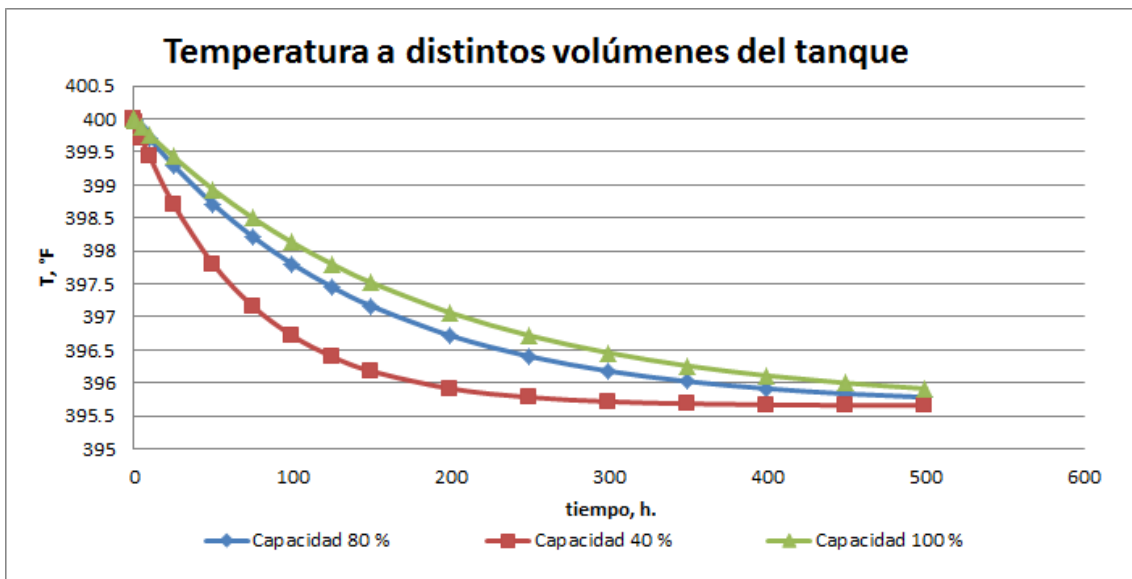
Tendencia de la temperatura del tanque K2502 a diferentes flujos de recibe/entrega:

Gráfica 20. Tendencia de temperatura del tanque de FDV K2502 a tres flujos R/E diferentes.



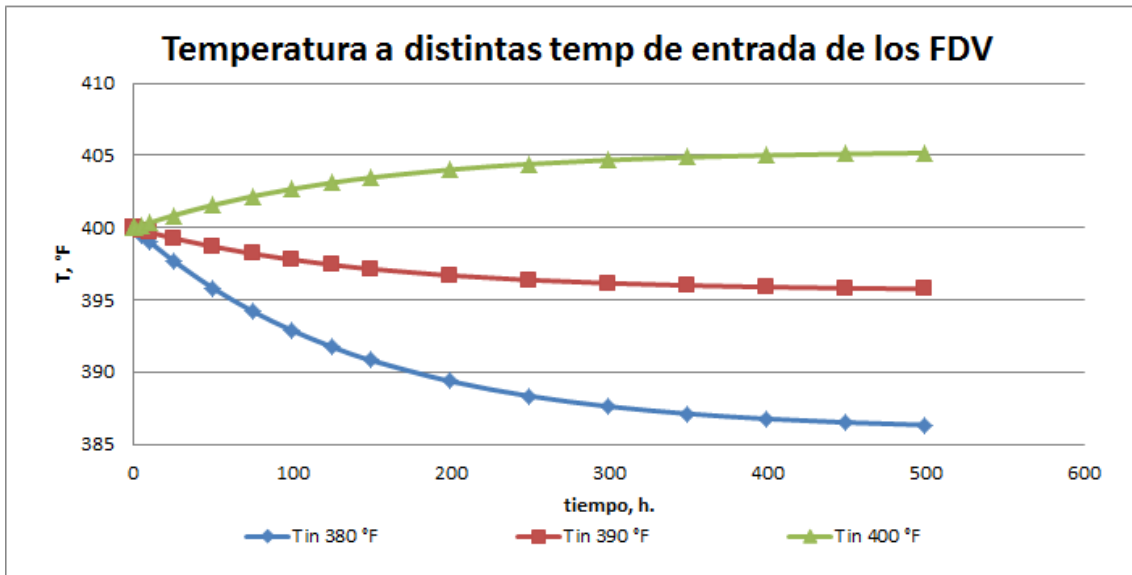
Tendencia de la temperatura del tanque K2502 a diferentes volúmenes:

Gráfica 21. Tendencia de temperatura del tanque de FDV K2502 a diferentes capacidades.



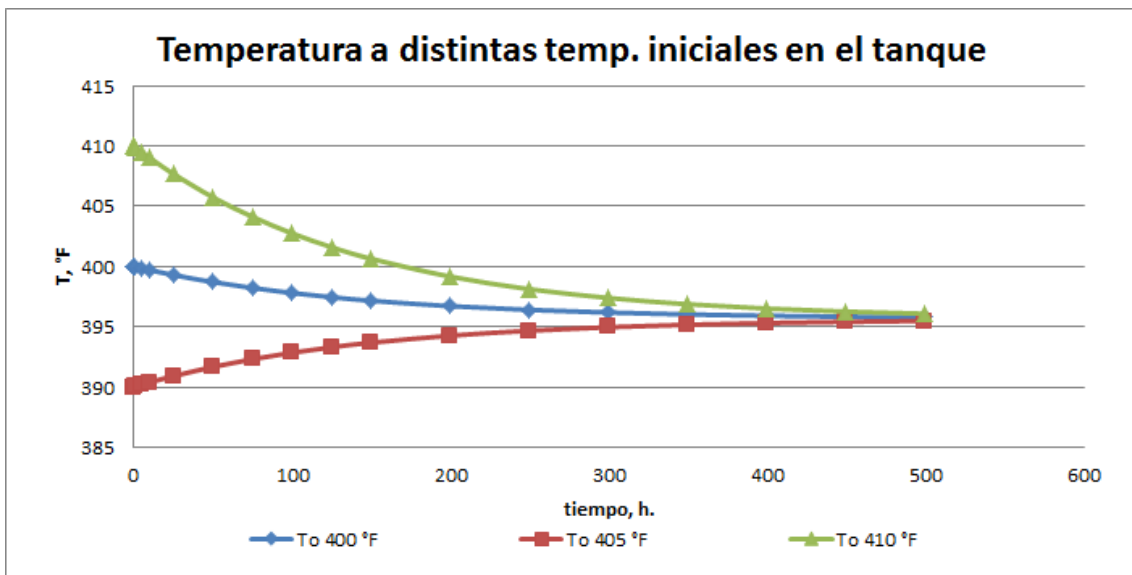
Tendencia de la temperatura del tanque K2502 a diferentes temperaturas de entrada de los FDV:

Gráfica No.22 Tendencia de temperatura del tanque de FDV K2502 a tres diferentes temperaturas de ingreso de FDV.



Tendencia de la temperatura del tanque K2502 a diferentes temperaturas iniciales de tanque:

Gráfica No.23 Tendencia de temperatura del tanque de FDV K2502 a tres diferentes temperaturas iniciales.



Tendencia de la temperatura del tanque K2502 a diferentes ratas de adición de calor externo:

Gráfica No.24 Tendencia de temperatura del tanque de FDV K2502 a tres diferentes flujos de calor externo.

