



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DEL ESTADO DE MÉXICO
FACULTAD DE QUÍMICA**



**“ANÁLISIS DEL SUMINISTRO DE VAPOR DE UNA PLANTA
AGROQUÍMICA”**

TESINA

Que para obtener el título de:

INGENIERO QUÍMICO

Presentan:

FERNANDA HEREDIA GUTIÉRREZ

Asesor académico:

DR. CÉSAR PÉREZ ALONSO

Asesor externo:

ING. MIGUEL ÁNGEL BARRIOS CASTREJON

Toluca, México, Noviembre 2017

AGRADECIMIENTOS

A mi centro, mi papá, mi mamá y mi hermano, gracias por apoyarme en cada paso que he dado a lo largo de mi vida.

Papito chulo; agradezco el gran hombre que tengo de ejemplo, trabajador, amante de su profesión. Dedicado a su familia, fiel a sus principios, con un gran humor y seguridad en su andar.

Gracias papito, por recibirme con tanto amor cuando caí de las estrellas directo a tus brazos.

Mamiji; gracias por siempre apoyarme a sentirme segura de quien soy, de lo que valgo y de lo que soy capaz de hacer. Agradezco las decisiones que has tomado a lo largo de tu vida, te han vuelto una mujer fuerte, con un corazón enorme, siempre dispuesto a dar. Gracias por ser mi confidente, por cuidarme, por respetar mi forma de ser y sobre todo por ser mucho más de lo que una hija pudiera desear.

Al, mi dude y carnalito; tengo la fortuna de crecer junto a una personita con un gran cerebro y un gigantesco corazón, que siempre me ayuda, reta, y a través de su necesidad me motiva a aspirar por más. Gracias por ayudarme con mis tareas, jugar conmigo, bailar conmigo, por fortalecer nuestra hermandad y probar que nuestro cariño es más fuerte que nuestra sangre.

A mis abuelos maternos; Abuelo y Aby, por siempre echarme porras y estar al pendiente de cada paso que doy, bueno, malo u oscilante, siempre cuento con su sabiduría y gran sonrisa para seguir creciendo. Gracias por confiar en mis locuras, en quien soy y quien quiero llegar a ser.

A mis abuelos paternos; un gran ejemplo de vida y como pareja. Gracias por estar al pendiente de mí y mi crecimiento.

A mis tíos-abuelos; Martha y Javier; gracias por su cariño, por querer a mi papá como hijo suyo, por siempre abrirnos las puertas de su casa y su corazón. Felizmente digo que ¡sí, funcionó el plan "B"!

A mi tío Carlos; “tu haz lo que te llena y haga feliz, el dinero viene y va, pero si al final del día sigues con esa sonrisa... ya la hiciste”. Tío, gracias por ser una de las razones de mi sonrisa. Gracias por ser mi tío favorito: loco y sincero, al que siempre he admirado tanto.

A mi tía Lala; por ese gran ejemplo que me has dado de fuerza, determinación, de ser mamá, mujer independiente, con objetivos claros, tanto en tu vida profesional como en lo personal.

Al resto de mi familia, tíos y primos, que de corazón estimo, gracias por formar parte de mis raíces, por ser una familia sólida y decidida a crecer. Gracias por sus palabras y empujones que me han ayudado a querer dar más de mí.

A mis constantes, mis hermanas del alma;

Cess; gracias por siempre ir de mi mano, por tu amor sincero y desinteresado. Gracias por tu amistad que sólo crece cada día más fuerte. Todo resumido en que agradezco que seas “My Person”.

Mariana; gracias por mostrarme cómo amar incondicionalmente, por enseñarme que el dar te llena el corazón, porque con tu partida entendí que un amor puro trasciende y que la vida es tan frágil como valiosa. Gracias Epus, por hacerme entender lo preciado que es cada despertar.

Ana, Molina, Javon; gracias por su apoyo y cariño. Saber que tengo amigos incondicionales, sinceros, siempre dispuestos a escribir más historias conmigo me llena el alma.

A todos los amigos con los que tuve la fortuna de compartir momentos y situaciones que me han llevado hasta aquí. Gracias porque de todos ustedes he aprendido.

A mi asesor, Dr. César, gracias por sus enseñanzas y el gran empujón para la realización de este trabajo, por su confianza en mí como persona y profesionalista.

A mi tutor, Dr. Varela, muchas gracias por sus palabras como profesor y consejero, desde fenómenos de transporte, a mi intercambio, a esta tesina. Por buscar cómo orientarme y definir en qué desarrollarme, en enseñarme a confiar que el camino que elija, vendrá con grandes sorpresas.

A Mike y Alonso, muchas gracias por todo el soporte que me dieron en este trabajo, pero sobre todo, en mi inicio como Ingeniera Química, por su sinceridad y ganas de verme crecer y aprender.

A mi alma mater, la Universidad Autónoma del Estado de México, por las bases que me dio para poder desarrollarme como profesionista, por todos los maestros que dejaron una semillita en mí y deseos de continuar desarrollándome.

“Ladies and Gentleman, that’s okay, that’s alright, thank you very much.”

-Don Antonio Gil

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	10
1. ANTECEDENTES.....	11
1.1. PLANTA AGROQUÍMICA DUPONT®	11
1.2. SECADO DE SÓLIDOS.....	11
1.2.1 SECADOR DUPONT®	14
1.3 VAPOR	16
1.4 CALDERAS INDUSTRIALES	18
1.4.1 CALDERAS EN DUPONT®	23
1.4.2 ASPECTOS DE SEGURIDAD.....	25
1.4.3 ASPECTOS ECONÓMICOS	29
1.5 LÍNEA DE VAPOR.....	29
1.5.1 LÍNEA DE VAPOR EN DUPONT®	34
1.5.2 ASPECTOS DE SEGURIDAD.....	35
1.5.3 ASPECTOS ECONÓMICOS	36
2. JUSTIFICACIÓN	38
3. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN.....	39
4. OBJETIVOS.....	40
4.1 OBJETIVO GENERAL.....	40
4.2 OBJETIVO PARTICULAR.....	40
5. METODOLOGÍA.....	41
5.1 OBTENCIÓN DE LA CANTIDAD DE VAPOR	41
5.1.1 BALANCE DE MASA Y ENERGÍA DEL AIRE EN EL SECADOR.....	41
5.1.2 BALANCE DE ENERGÍA ENTRE EL AIRE DEL SECADOR Y EL VAPOR SUMINISTRADO	46
5.1.3 BALANCE DE MASA Y ENERGÍA PARA OTROS SERVICIOS DE LA PLANTA.....	48
5.2 ANÁLISIS ECONÓMICO	49
5.2.1 CALDERAS.....	49
5.2.2 LÍNEA DE VAPOR.....	49
6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	52
6.1 BALANCE DE MATERIA Y ENERGÍA	52
6.1.1 BALANCE DE MASA Y ENERGÍA DEL AIRE EN EL SECADOR.....	52
6.1.2 DETERMINACIÓN DE LA ENERGÍA DISIPADA POR EL SECADOR	53

6.1.3	BALANCE DE MASA Y ENERGÍA PARA OTROS SERVICIOS DE LA PLANTA.....	56
6.2	CALDERAS.....	57
6.2.1	EVALUACIÓN DE CALDERAS	57
6.2.2	RESULTADOS	60
6.3	LÍNEA DE VAPOR.....	61
6.3.1	EVALUACIÓN DE LÍNEA DE VAPOR	61
6.3.2	RESULTADOS	66
7	CONCLUSIONES	67
8	BIBLIOGRAFÍA.....	70
9	ANEXOS.....	71
9.1	ANEXO I: SECADOR.....	71
9.2	ANEXO II: SIMULACIÓN DE INCIDENTES MEDIANTE PHAST.....	72
9.3	ANEXO III: LAYOUT LÍNEA DE VAPOR EN PLANTA	77
9.4	ANEXO IV: DTI DE LÍNEA DE VAPOR	78
9.5	ANEXO V: BALANCE DE MASA DEL SECADOR.....	80
9.6	ANEXO VI: DTI DE LAS CALDERAS	81
9.7	ANEXO VII: PÉRDIDA DE VAPOR POR CONDENSADO.....	82
9.8	ANEXO VIII: ESTIMADO DEL LEVANTAMIENTO PARA LA LÍNEA DE VAPOR.....	83
9.9	ANEXO IX: TABLA COSTO BENEFICIO.....	84

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características del herbicida. Datos de Dupont® obtenidos en Julio 2017	14
Tabla 2. Características de Operación del Secador Vibrofluidizado. Datos de Dupont® obtenidos en Julio 2017	15
Tabla 3. Temperaturas del aire en serpentín y ambiente. Datos de Dupont® obtenidos en Julio 2017.....	15
Tabla 4. Temperaturas de las Tres diferentes zonas del Secador Vibrofluidizado. Datos de Dupont® obtenidos en Julio 2017	16
Tabla 5. Características del Vapor de la planta. Datos de Dupont® obtenidos en Julio 2017	18
Tabla 6. Características de Caldera de 100HP. Datos de Dupont® obtenidos en Julio 2017	24
Tabla 7. Características de Caldera de 20HP. Datos de Dupont® obtenidos en Julio 2017	24
Tabla 8. Resultados de Afectación para dos diferentes escenarios. Datos de Dupont® obtenidos en Julio 2017	25
Tabla 9. Presión de válvulas de línea de vapor. Datos de Dupont® obtenidos en Julio 2017	35
Tabla 10. Variables conocidas del sistema. Datos de Dupont® obtenidos en Julio 2017	52
Tabla 11. Variables desconocidas del sistema	52
Tabla 12. Resultados de balance de masa y energía.....	53
Tabla 13. Datos del aire a 100°C. Datos de Dupont® obtenidos en Julio 2017. Propiedades del aire a 100°C de “Perry’s Chemical Engineer’s Handbook” R. Perry, 6ª Edición.....	53
Tabla 14. Datos variables de cada zona del secador.....	54
Tabla 15. Resultados del número Reynolds	54
Tabla 16. Resultados número Nusselt y coeficiente de convección	54
Tabla 17. MLDT de cada zona.....	55
Tabla 18. Calor total convectivo.....	55
Tabla 19. Datos para calor conductivo.....	55
Tabla 20. Calor total por conducción	55
Tabla 21. Datos para calentamiento del agua.....	56
Tabla 22. Resultados de calentamiento del agua	56
Tabla 23. Gastos anuales de las Calderas. Datos de Dupont® obtenidos en Julio 2017	60
Tabla 24. Comparativa de costos y su ahorro	66
Tabla 25. Valores para Flujo de Efectivo	85

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Balance de masa del secador.....	42
Ecuación 2. Balance de Energía del secador	42
Ecuación 3. Entalpía del sólido.....	42
Ecuación 4. Entalpía del gas	43
Ecuación 5. Igualdad de ambos balances.....	43
Ecuación 6. Calor total de disipación	43
Ecuación 7. Ley de Fourier	44
Ecuación 8. Temperatura media logarítmica	44
Ecuación 9. Calor convectivo.....	44
Ecuación 10. Número de Nusselt	45
Ecuación 11. Correlación de Sieder-Tate	45
Ecuación 12. Diámetro equivalente	45
Ecuación 13. Calor total en el secador	46
Ecuación 14. Balance de energía.....	46
Ecuación 15. Balance de calor requerido por aire y calor cedido por vapor	47
Ecuación 16. Calor del aire	47
Ecuación 17. Calor de vapor.....	47
Ecuación 18. Masa del vapor.....	47
Ecuación 19. Balance de calor requerido de agua y calor cedido del vapor.....	48
Ecuación 20. Flujo de Efectivo.....	50
Ecuación 21. Valor Presente Neto.....	50
Ecuación 22. Valor de rescate	50

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Secador de lecho fluidizado esquematizado "Operaciones de Transferencia de Calor" R. Treybal, 2a Edición.	12
Ilustración 2. Esquema de secador	42

RESUMEN

En la planta DuPont® Lerma, se utiliza vapor saturado como suministro para el calentamiento de aire, el cual es utilizado en un secador de lecho vibrofluidizado, para secar los productos agroquímicos que se formulan, de igual forma el vapor es requerido para calentar agua en otros servicios que se tienen. La generación del vapor saturado se obtiene mediante calderas, las cuales deben encargarse del suministro de un aproximado de 1,830 toneladas al año. Este trabajo se enfocó en encontrar una alternativa viable para el suministro de dicho fluido.

Se consideró que la empresa colindante a la planta puede suministrar su vapor mediante una línea de vapor, la cual, en este proyecto se evaluaron sus ventajas sobre el uso de las calderas.

En primera instancia, se realizó el balance de masa y energía del secador en lecho vibrofluidizado para determinar la cantidad de vapor que se consume anualmente en la planta, obteniéndose la cantidad de 1,552.099 toneladas de vapor saturado por año. Después se evaluaron las calderas desde un punto de vista técnico como su operación, mantenimiento, seguridad, y posteriormente el aspecto económico en cuanto al gasto que se tiene anualmente por hacer uso de éstas, encontrándose que el gasto anual es un aproximado de \$111,772.22 USD.

Posteriormente se realizó el análisis de la línea de vapor, es decir, se solicitó a un contratista que hiciera un estimado del costo del proyecto (\$40M USD), también se realizó un análisis económico como si ésta ya operara, encontrándose que la inversión se recuperaría en un año y que el gasto anual de la línea de vapor sería de un aproximado de \$ 51M USD. Se evaluaron las medidas de seguridad que se requerirían y cuál sería su factibilidad para utilizarla.

Finalmente se hizo la comparativa técnico económica de ambas opciones, determinándose que las calderas requieren un mayor grado de seguridad, ya que las probabilidades de tener incidentes con ellas son mayores que con la línea de vapor, al igual que las consecuencias de éstas serían más graves. También se vio que la operación de la línea de vapor sería más sencilla que el uso de las calderas, y como último factor de comparación, en la parte económica, tras analizar la inversión y el ahorro que se tendría, se concluye que la inversión sería cubierta al año de su instalación y que anualmente se tendría un aproximado del 45% de ahorro en comparación al uso de las calderas.

Por lo que se concluye que el proyecto de la sustitución de las calderas por la línea de vapor dónde el suministro de vapor saturado sea suministrado por la empresa colindante, es factible, óptimo y conveniente para la planta DuPont® Lerma.

INTRODUCCIÓN

Los procesos de formulación de agroquímicos (herbicidas) sólidos a nivel industrial, implican una serie de operaciones unitarias que requieren de diversos servicios para garantizar su funcionalidad. Uno de estos servicios es el vapor, requerido para el calentamiento de aire en la operación de secado. El suministro de aire caliente a los secadores puede generarse al ser calentado mediante resistencias eléctricas, gases productos de combustión, vapor, etc. En el caso particular del suministro de aire caliente, el cual es calentado por medio de vapor, la generación de éste se da mediante el uso de calderas.

Las calderas tienen el objeto de obtener un vapor saturado de alta calidad y que la energía requerida para lograr este objetivo sea de bajo costo, que las líneas de suministro sean de rápida construcción y que sea amigable con el medio ambiente. Por lo que las empresas que hacen uso de las calderas y líneas de suministro se encuentran en constante búsqueda de encontrar opciones alternas para la obtención de vapor saturado y el suministro de éste.

La planta DuPont® Lerma es una planta que desarrolla productos agroquímicos, la cual formula herbicidas sólidos, los cuales son formulados, sometidos a molienda, granulación, secado y finalmente empacados para su venta a nivel internacional. Para el secado de los gránulos, se utiliza un secador de lecho vibro fluidizado que para su funcionamiento hace uso de vapor saturado para el calentamiento del medio desecante, de igual forma utilizan el vapor para otros servicios dentro de la planta. DuPont® ha tenido por años sus propias calderas para la generación de vapor, sin embargo, se planteó la posibilidad de encontrar otro medio que ofrezca mayores ventajas para el suministro de este servicio. Se analizó y comparó técnica y económicamente la etapa de suministro de vapor por parte de la empresa, siendo las calderas la fuente de esto, contra el uso de vapor generado por parte de una empresa colindante.

1. ANTECEDENTES

1.1. PLANTA AGROQUÍMICA DUPONT®

DuPont® es una empresa multinacional de origen estadounidense, dedicada a diferentes ramas industriales de la química. Esta empresa se ha caracterizado por el desarrollo de materiales como el Neopreno®, Nylon®, la Lycra®, el Teflón®, Nomex®, Tyvek®, entre otros. Fue inaugurada el 19 de julio de 1802 por Eleuthere Du Pont de Nemours, cerca de la ciudad de Wilmington, Delaware, Estados Unidos. Hoy en día es la sexagesimosexta compañía en tamaño en los Estados Unidos de América, opera en cinco diferentes sectores: Electrónica y comunicaciones, seguridad y protección, agricultura y nutrición, materiales de alto rendimiento y tecnologías textiles y tintes. (DuPont, 2017)

La planta en que se desarrolló este proyecto fue en Lerma, Estado de México. La planta es del sector Agroquímico, donde se lleva a cabo la formulación de herbicidas. La misión de la empresa es la entrega de productos agrícolas; productos de protección de cultivos, para ofrecer un mayor rendimiento de la cosecha y alimentos más saludables. La empresa tiene la visión de que al trabajar juntos con los clientes, se puede encontrar mejores maneras para mejorar la cantidad, calidad y sostenibilidad del suministro mundial de alimentos.

Uno de los productos que DuPont® comercializa es un herbicida sólido, el cual es granulado y posteriormente secado en un equipo de lecho vibrofluidizado. La selección del tipo de secador se determinó basado en las propiedades de las partículas sólidas. Para el secador es necesaria la obtención de aire caliente, el cual es calentado a través de vapor saturado que es generado en las calderas de la planta.

Este proyecto contemplo los siguientes temas:

1. Secado de los herbicidas sólidos
2. Vapor, el cual es utilizado para el calentamiento del aire suministrado al secador
3. Calderas, las cuales son utilizadas para la generación del vapor
4. Línea de vapor, la cual es la alternativa para la obtención del vapor

1.2. SECADO DE SÓLIDOS

En términos generales el proceso de secado consiste en eliminar pequeñas cantidades de disolvente (generalmente agua u otro líquido) de un material sólido con el fin de reducir el contenido de líquido aceptable. Los equipos pueden clasificarse desde un punto de vista térmico cuando: (Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas. Universidad de Chile, 2017)

1. El sólido está directamente expuesto al gas caliente, conocido como secador adiabático o directo.
2. El calor es transmitido desde un medio externo, como una superficie metálica que se ponga en contacto con el sólido, llamado no adiabático o indirecto. En esta clasificación también se encuentran los secadores calentados por energía radiante, dieléctrica o de microondas.

Los secadores son normalmente comprados en compañías especializadas en ingeniería y la fabricación de estos equipos, rara vez es diseñado por los usuarios debido a su complejidad. Sin embargo, es difícil tener un tipo de secador general para todos los procesos debido a que estos dependen de las variaciones posibles en forma y tamaño de los materiales, de la humedad de equilibrio, de los mecanismos del flujo de humedad a través del sólido y del mecanismo de transmisión de calor que se requiere para la vaporización.

La siguiente figura ejemplifica el secador que es utilizado en la planta: de lecho fluidizado:

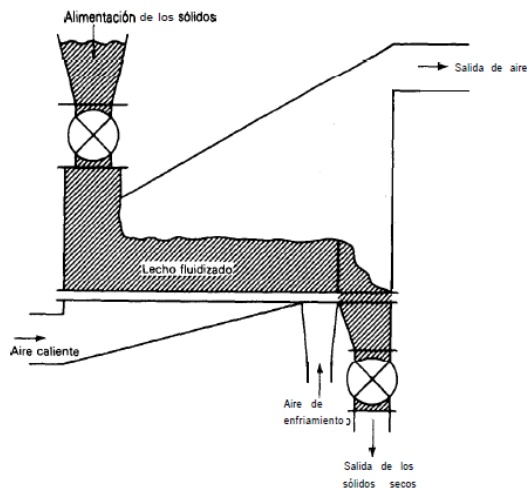


Ilustración 1. Secador de lecho fluidizado esquematizado
"Operaciones de Transferencia de Calor" R.Treybal, 2a Edición.

Los secadores de lecho fluidizado también son utilizados para materiales que pueden ser agitados, es decir que no son sensibles a romperse o a la abrasión. Cuando únicamente se vaporiza el líquido de la superficie de los sólidos la distribución de tiempo de residencia típica es de 20-120s, pero si se presenta difusión interna en las partículas se deja de 15 a 30 minutos.

En la carga de material si existen partículas muy pequeñas, éstas pueden ser transportadas en el gas fluidizante, por lo que se requiere la instalación de un sistema de recolección de polvos, ciclón o silo, permitiendo que los finos sean recogidos y reciclados, mientras que los sistemas con carga pesada usan un ventilador de extracción en la salida del colector de polvo, equilibrando la presión en la zona terminal del lecho con la atmosférica. La velocidad

del gas fluidizante debe ser algo elevada para que permita el movimiento del material a lo largo del lecho, pero no debe llegar a ser excesiva y así el material no se rompe. Normalmente se tiene un espacio de 1 a 2 m arriba del lecho para permitir que las partículas sean arrastradas y depositadas nuevamente.

Algunos secaderos de lecho fluidizado poseen compartimentos fluidizados separados, en los cuales los sólidos pasan secuencialmente, siendo el tiempo de residencia casi el mismo para todas las partículas. Las condiciones de secado varían por compartimento, en los cuales la temperatura va creciendo debido a que la transferencia de calor más fuerte se lleva a cabo en el primer compartimento, y este gradiente de temperatura va decreciendo a lo largo del secador.

Es importante que para la operación del secador, éste opere de manera segura y económica, los costos de operación y mantenimiento no deben ser excesivos, la contaminación debe poder controlarse y el consumo de energía debe ser el mínimo. Los secadores adiabáticos son generalmente más económicos que los no adiabáticos a pesar de la menor eficacia térmica de las unidades adiabáticas. Desafortunadamente, con frecuencia se produce el arrastre de polvos en los secaderos adiabáticos y para evitar el arrastre, se usan equipos de colección de polvos los cuales terminan costando igual que los no adiabáticos. Por lo que muchas empresas eligen los secadores continuos sobre los no continuos.

Los secadores de lecho fluidizado tienen las siguientes ventajas: (Treybal, 1981)

- Tiempo de residencia corto
- Usados para partículas cuyo tamaño varía entre 0.05 y 15 milímetros (evitando que las partículas grandes se acumulen en el lecho, al igual que permite quitar las partículas demasiado finas)
- La agitación de las partículas sólidas es mejor ya que permite la eliminación de la película de gas estancada alrededor de las partículas, y la fase gaseosa es revuelta a lo largo del lecho. Dando resultado a coeficientes de transferencia de masa y calor muy grandes. Y así el gas abandona el lecho a la temperatura de éste, o muy poco arriba de él, siendo posible que sea la temperatura de bulbo húmedo; haciendo que los rendimientos de los secadores de lecho fluidizado cercano al 100%.
- El gas protege a las partículas, durante la agitación, de la rotura y abrasión
- Si el material es termosensible es posible que los secadores cuenten con serpentines interiores o ser calentada la pared del lecho, para evitar que las partículas se fundan a altas temperaturas

Factores que intervienen en este tipo de secadores:

- Transferencia de calor: el gas que entra cede su calor sensible a las partículas sólidas

- Transferencia de masa: las partículas húmedas pesadas se van al fondo del lecho, favoreciendo que el coeficiente de transferencia de masa se incremente y la velocidad de secado disminuya, resultando en que la fuerza impulsora sea menor también. El calor latente del gas fluidizante no llega a su saturación a la salida del secado, de ahí parte la elección de tener más de una etapa, siendo posible reutilizar el gas o utilizar uno nuevo; de ser el primer caso se debe esperar cierto arrastre de material fino al siguiente compartimento del lecho.
- Tiempo de residencia
- Fuerza impulsora: es la relación de la humedad de los sólidos fluidizados a cierta temperatura y la humedad del gas a ese mismo punto
- Consumo de vapor: el calor necesario para secar el producto se puede obtener a partir de la cantidad necesaria para la evaporación del agua de las partículas, de la pérdida por radiación y convección desde el secador y la pérdida por el gas de salida.

A través de la convección es que se transfiere el calor del vapor a los gránulos húmedos, asumiéndose que ésta es la resistencia tanto interna como externa a la transferencia de masa. La razón de transferencia es corta, incluso se puede llevar a cabo en fracciones de segundos debido a que los coeficientes de transferencia de calor y masa son muy grandes.

La temperatura de saturación adiabática es la temperatura húmeda del gas, el secado ocurre durante una temperatura, por un tiempo considerable, y el líquido se puede vaporizar a una temperatura inferior a la del medio de calefacción, mientras que en las etapas finales del proceso de secado la temperatura de los sólidos asciende, la cual puede llegar a ser ligeramente o considerablemente superior a la temperatura del secado. El secado de las partículas a veces se ve complicado por la difusión en el sólido o a través del gas, algunos materiales es posible remover el agua al ser calentados por encima de la temperatura de ebullición del líquido, si la temperatura se eleva más, es posible remover trazas de material absorbido. Cuando la difusión es mínima, el paso limitante es la transmisión de calor. En el caso del secado adiabático la difusión normalmente está presente, sin embargo, normalmente la velocidad la controla la transferencia de calor.

El gas a la salida está prácticamente saturado con vapor para cualquier velocidad de fluidización permitida.

1.2.1 SECADOR DUPONT®

Las características del producto (fluido dispersable) se muestran en la **Tabla 1**:

Tabla 1. Características del herbicida. Datos de Dupont® obtenidos en Julio 2017

Peso molecular (g/mol)	261.116
------------------------	---------

Gravedad específica	0.53
Densidad (g/cm ³)	0.53
Capacidad Calorífica (kJ/kg°C)	0.96296

El secador utilizado en la empresa es un secador vibratorio de lecho fluidizado, este tipo de secador cuenta con diferentes características que lo hace más eficiente comparado con otros tipos de secadores; permite la descarga de una distribución alta de tamaños de partícula, y las vibraciones del secador ayudan a la separación de los diferentes tamaños de partícula. Al utilizar este tipo de equipos se requieren bajas velocidades de fluidización, lo que baja el uso energético de éste. Además, es sencillo de limpiar y dar mantenimiento y la recirculación de gas y sistemas cerrados cíclicos (closed loop systems) mejoran su eficiencia.

El secador remueve la humedad de los gránulos, es decir, del herbicida. Los cuales generalmente contienen inicialmente un 15% de humedad, buscando que salgan con un porcentaje igual o menor al 1%. El secador opera isotérmicamente y de forma continua, utiliza aire precalentado a 100°C que entra en contacto directo con los sólidos. En la **Tabla 2** se muestran las características de la operación:

Tabla 2. Características de Operación del Secador Vibrofluidizado. Datos de Dupont® obtenidos en Julio 2017

Capacidad de diseño/ Demanda (kg/h)	300
Presión de vapor de agua (kg/cm ²)	7
Área del lecho del secador (ft ²)	20
Tamaño de tamiz (mesh)	10-80
Energía (Volts)	127

Las temperaturas que se manejan para el aire se muestran en la **Tabla 3**:

Tabla 3. Temperaturas del aire en serpentín y ambiente. Datos de Dupont® obtenidos en Julio 2017

Entrada de aire a serpentín (°C)	25
Salida de aire del serpentín (°C)	100
Entrada del secador de aire, bulbo seco (°C)	100

Salida del secador de aire, bulbo seco (°C)	10
---	----

El secador está conformado por tres compartimentos, los cuales permiten incrementar el tiempo de residencia de las partículas en el equipo, y por ende se incrementa la tasa de secado de las partículas. En la **Tabla 4** se presentan las temperaturas que se utilizan en cada compartimento:

Tabla 4. Temperaturas de las Tres diferentes zonas del Secador Vibrofluidizado. Datos de Dupont® obtenidos en Julio 2017

Primera zona (°C)	35-45
Segunda zona (°C)	45-60
Tercera zona (°C)	60-90

En el **ANEXO I** se muestra una imagen y las características principales del secador de lecho vibrofluidizado utilizado por la empresa.

1.3 VAPOR

El vapor es la fase gaseosa en que se transforma una sustancia, generalmente un líquido. Este es producido a temperaturas cercanas al punto de ebullición o licuefacción. En este estado de agregación las moléculas interactúan débilmente entre sí, sin formar enlaces moleculares. El vapor puede presentarse de diferentes formas físicas, presentando distintas propiedades y características por lo que su uso puede llegar a ser diferente. El vapor a presión positiva se puede encontrar en las plantas procesadoras de alimentos, químicas y refinerías. Es utilizado como fuente de calentamiento en intercambiadores de calor, reactores, reboilers, precalentadores de aire de combustión y otros tipos de equipos para la transferencia de calor. (Crane, 1987)

Para que el agua sea transformada a vapor, ya que en condiciones atmosféricas ésta se encuentra en estado líquido, debe de pasar por tres diferentes etapas:

1. Se aplica calor al agua para incrementar su temperatura hasta llegar a su punto de ebullición, conocido mejor como la temperatura de generación o de saturación. La cantidad de calor requerido para elevar la temperatura de los 0°C a la temperatura de ebullición es conocido como calor sensible o como entalpía del agua.

2. En la segunda etapa el calor es suministrado al agua ya hirviendo y bajo la condición de presión constante, el agua se convierte en vapor sin el aumento de temperatura, esta etapa es la de evaporación o de calor latente. El vapor está en contacto con el agua líquida y la condición es conocida como vapor saturado. Éste puede presentarse de dos formas; seco o húmedo, depende de la cantidad de partículas de agua que contenga. El vapor saturado a cualquier presión, tiene una temperatura definida.
3. Finalmente la tercer etapa se da cuando el vapor a determinada presión comienza a calentarse por encima de la temperatura de saturación, a este tipo de vapor se le conoce como vapor sobrecalentado.

El calor sensible del agua a 1 bar es de 417.5 kJ/kg y su calor latente es de 2,2557.9 kJ/kg, por lo que el calor total o la energía total que se forma cuando el agua hierve es de 2,675.4 kJ/kg, la suma de ambos calores, o también conocidas como entalpías. (Crane, 1987)

El vapor saturado se presenta cuando el gas y el líquido, a una temperatura y presión dada, pueden co-existir juntos, teniendo el intervalo de vaporización igual al de condensación. El vapor húmedo se genera debido a que cuando es evaporado el líquido arrastra un poco de humedad al gas, por lo que se tiene que tener cuidado de retirar el líquido del vapor. Es la forma en la que se encuentra en la mayoría de las plantas, cuando es generado mediante calderas, se encuentran algunas partículas no evaporadas y son arrastradas hacia las líneas de distribución de vapor. Las mejores calderas llegan a tener un 3% o 5% de humedad.

Mientras que el vapor sobrecalentado se crea por el sobrecalentamiento del vapor saturado o vapor húmedo para tener un punto mayor de saturación. Haciéndolo un vapor con mayor temperatura y menor densidad de vapor saturado a una misma presión, este vapor es principalmente utilizado para el movimiento e impulso de aplicaciones como lo son las turbinas.

Ventajas del vapor saturado: (Compañía Especialista en Vapor TLV, 2017)

- El vapor saturado aporta mayores beneficios cuando se encuentra a temperaturas de 100°C y mayores:
- Mejora de productividad y calidad del producto que se quiera calentar, debido a que el calentamiento se da de forma equilibrada a través de la transferencia de calor latente.
- La temperatura se puede establecer de forma rápida y precisa debido al control de la presión que la ejerce.
- Para la transferencia de calor el área requerida es pequeña, así se pueden reducir costos en el equipo, esto es debido a su alto coeficiente de transferencia de calor.
- Es limpio, seguro de usar y tiene un costo bajo, gracias a que es originado del agua.

Teniendo en consideración las características y posibles desventajas del vapor saturado, se pueden tener las siguientes consideraciones para su uso e instalación:

- La eficiencia del calentado se ve afectada y reducida si se utiliza vapor diferente al vapor seco. Todo el vapor generado en calderas no es seco, al contrario, se obtiene vapor húmedo el cual contienen moléculas de agua aún sin ser evaporizadas.
- El condensado puede ser removido mediante trampas o piernas de vapor, este cae del vapor, sin embargo, el vapor húmedo que es arrastrado debe ser removido, esto puede ser mediante estaciones de separación en el punto de uso o a lo largo de la distribución.
- Se debe tener cuidado con las pérdidas de presión debido al exceso de fricción en la tubería, ya que esto también se puede ver reflejado con la pérdida de temperatura del vapor.

El vapor saturado es generado en las calderas de la planta, sus condiciones son mostradas en la **Tabla 5**:

Tabla 5. Características del Vapor de la planta. Datos de Dupont® obtenidos en Julio 2017

Presión de vapor (kg/m ²)	7
Temperatura (°C)	100
Humedad Relativa (%)	<1

1.4 CALDERAS INDUSTRIALES

Las calderas son máquinas utilizadas para la generación de vapor. El vapor es generado mediante la transferencia de calor a presión constante, en el cual un líquido cambia de fase y se transforma a vapor saturado. Este tipo de equipos son utilizados para diversas aplicaciones industriales, como lo son la esterilización, la generación de electricidad o calentado de otros fluidos. (Manual de Operación de Calderas DuPont, 2017)

Existen dos tipos de calderas:

1. Acuatubulares; el agua circula a través de los tubos. En este tipo de calderas se manejan presiones de 0 hasta 2000psig.
2. Piro tubulares: también conocidas como humotubulares, dónde el gas de combustión circula en el interior de los tubos. Las presiones que soportan este tipo de calderas varía entre 0 y 300 psig.

Las calderas están conformadas por dos cámaras; la cámara de agua que es donde se genera el vapor mientras que la cámara de gas es donde se lleva a cabo la combustión.

Los elementos principales de las calderas son:

- Agua: Es un servicio el cual debe ser tratado previamente para remover las impurezas de éste, con el fin de mantener la caldera en buenas condiciones y evitar su desgaste. El agua es sometida a diversos procesos como lo son: descarbonatación, ablandamiento, desmineralización, etc. (Perry, 1984)
- Aire: Específicamente el oxígeno ya que éste es utilizado para que la combustión se lleve a cabo. En cuanto al nitrógeno que se encuentra en el aire, al ser calentado, es liberado de la caldera como óxidos de nitrógeno, los cuales contaminan el ambiente.
- Fuego: Se busca que este sea lo más óptimo posible y amigable con el ambiente. El cual requiere de un combustible, un comburente (generalmente es el aire) y de un agente externo para la ignición (genere la chispa). (Perry, 1984)

Para la combustión se requiere de tres componentes; calor, combustible y oxígeno. El calor es generado por la chispa, el combustible puede ser gas natural, propano, aceite, carbón, madera, etc. Mientras que el oxígeno se obtiene del aire, sin embargo, ya que el aire cuenta con nitrógeno, éste al ser calentado, una molécula de oxígeno se adhiere a una de nitrógeno, liberándose en forma de óxidos de nitrógeno, los cuales contaminan el aire.

Para mantener una combustión satisfactoria se deben cubrir tres requerimientos: (Perry, 1984)

- Tiempo: Debe ser suficiente para que el proceso de combustión se lleve a cabo
- Temperatura: Esta se genera del mismo proceso
- Turbulencia: Se presenta entre la mezcla de aire y el combustible

De igual manera se deben tomar en cuenta las razones de combustión combustible/ aire, una combustión estequiometría es utilizada únicamente en laboratorios donde se tienen las cantidades exactas para que la combustión se lleve a cabo, sin embargo, esta no es más que un punto de referencia para establecer las razones óptimas para la combustión.

Un exceso de oxígeno siempre será necesario para que se quemara todo el combustible; sin embargo, si este límite es sobrepasado reduce la temperatura de combustión, también si este aire en exceso está a cierta velocidad de quemado, este resulta en fuego inestable en la caldera. (Perry, 1984)

De ser el caso contrario, si se tiene menos oxígeno del necesario, el rendimiento del combustible es menor y se tienen un impacto nocivo en el medio ambiente, debido a los gases que no son completamente quemados. Ya que se genera un exceso de monóxido de carbono. El CO que no se quema con el combustible puede volverse a utilizar.

Para asegurar ese porcentaje de exceso de aire, usualmente se toman lecturas para saber si se está cumpliendo, esto se hace mediante analizadores del proceso, los cuales son un sistema de sensores que están basados en un principio físico o fisicoquímico. Éstos hacen mediciones de combustión, tiro de chimenea, presión y temperatura diferencial.

Mientras que para el diseño de las calderas se deben considerar los siguientes rubros: (Perry, 1984)

- El combustible: Su costo y disponibilidad
- Requisitos del vapor: Temperatura, presión y tasa de alimentación que son requeridos
- Agua: Es importante considerar el tratamiento que se le tiene que dar
- Almacén: Para suministros y el lugar donde se tendrá a la caldera
- Emisión de gases al exterior: Los gases generados en la combustión son liberados al medio ambiente por lo que es importante cuidar los límites permitidos
- Energía extra: La energía utilizada para el manejo de auxiliares
- Personal: Los involucrados que den el mantenimiento y cuidado de la caldera

Para este tipo de equipos es fundamental considerar la cantidad de calor que se requiere para que la transferencia de calor que se dé sea la necesaria y la requerida. Su función principal es ceder energía, por lo que buscar el método más eficiente es primordial.

La transferencia de calor depende de dos factores; la turbulencia que se genere entre los fluidos y la tubería en la que va, esto se refiere a la ebullición que se da dentro de los tubos, y en el flux de calor (Kern, 2013).

Los criterios de diseño son los siguientes:

1. El calor que libera el horno o la rejilla
2. La velocidad con la que se da la combustión en la tubería
3. El espacio que tiene la tubería

Para poder evitar accidentes y tener bajos costos es importante conseguir que la transferencia se dé con bajas presiones y altos puntos de ebullición.

Los sistemas de vapor son buenos porque la generación de vapor es de bajo costo, es una sustancia no tóxica y tiene una capacidad calorífica alta. Sin embargo, una de sus desventajas es que tiene una alta presión de vapor y un bajo punto crítico.

En el horno lo que sucede es que la energía química generada por la combustión del gas con el carburante, es utilizada como energía térmica, la alta temperatura que puede llegar a obtenerse dependerá de los productos de combustión. (Perry, 1984)

Las calderas modernas utilizadas en la industria tienen una eficiencia aproximadamente del 85%. En algunos casos se instalan condensadores, los cuales son utilizados para re utilizar el agua que se condense una vez cedido su calor, depende del diseño y tamaño de la caldera de la planta, de la disponibilidad de agua y la cualidad con la que ésta condense.

Los fenómenos por los que se transfiere el calor son los siguientes:

Conducción: (Perry, 1984)

Este fenómeno es explicado mediante la Ley de Fourier, la cual explica que la tasa de flujo de calor es igual a la conductividad térmica del material por el área y por el gradiente de temperatura con respecto a la distancia que este transcurriendo la transferencia.

La conductividad térmica se ve más afectada por la temperatura que por la dirección a la que esté siendo transferida la energía.

Convección:

Este se da entre al menos dos fluidos, ya sea líquido o gas en contacto con una superficie sólida. Un fluido le transfiere el calor a otro, y la velocidad de transferencia de calor está restringida por la resistencia a la transferencia de calor.

Existen dos tipos de convección:

- Natural: Se da cuando la superficie de un sólido entra en contacto con un fluido que presenta diferente temperatura, el fluido al tener diferente densidad se mueve y transfiere su calor.
- Forzada: Se genera cuando existe turbulencia en el fluido, en este caso el fluido es bombeado con un agente externo al sistema ya que existe una separación entre el sólido y el fluido.

El mantenimiento de la caldera es importante ya que con esto se asegura mantener sus condiciones al máximo y extender su vida útil.

Los fenómenos que se pueden presentar en la caldera y afectarla son los siguientes:

- Corrosión: Es la destrucción del metal debido a las reacciones químicas o la electrostática que tiene el metal con el medio ambiente, este fenómeno provoca el adelgazamiento del metal, volviéndolo más sensible.
- Deposición: Es la acumulación de materias en forma cristalina y amorfa, las cuales se presentan en la superficie de la caldera, esto es generado por el sobrecalentamiento de la caldera.
- Transporte: Es la contaminación en los tubos de vapor, puede ser líquidos, vapores o sólidos.

Para evitar este tipo de desgastes es importante considerar el mantenimiento correcto de ambas cámaras de las calderas, es decir, se tienen ciertos cuidados para minimizar el impacto generado por el agua que es utilizada, los gases que se forman durante la combustión y el vapor y condensados que son transportados a lo largo del sistema. (Perry, 1984)

Cámara de agua: (Perry, 1984)

El agua que se utiliza nunca está completamente pura por lo que requiere de un tratamiento para evitar daños al equipo y que la conversión del agua a vapor sea óptima. El agua normalmente viene con sólidos, coloides, compuestos orgánicos, sales, ácidos y se ve turbia. Por lo que se considera realizar un tratamiento que remueva todas estas impurezas.

El agua normalmente es pre-tratada para remover los sólidos suspendidos y suavizarla. Posteriormente es sometida a un tratamiento químico para evitar la corrosión, depósitos y paros no programados. El tratamiento químico está dividido en:

1. Tratamiento interno:

Está enfocado principalmente para atacar las sustancias corrosivas; ácidos y gases diluidos, como lo son el monóxido de carbono, oxígeno, nitrógeno, amonio, etc. Los cuales con aeración son disminuidos ya que estas sustancias entran al agua por tener contacto directo con el vapor y se encuentran en la atmósfera por lo que pueden entrar a la caldera. Se inhibe la formación de minerales, depósitos de metales, evitando la corrosión del metal.

2. Depuración de oxígeno:

El agua de alimentación contiene oxígeno, el cual si se tiene en exceso, puede reaccionar al estar a altas presiones, se disuelven los sólidos sulfato de sodio, dióxido de azufre y ácido sulfhídrico los cuales corroen el cuerpo de la caldera. Generan picaduras en el cuerpo de éstas. Para disminuir la cantidad de oxígeno en el agua se utilizan de aireadores y acondicionador de oxígeno, en caso extremo de picadura se puede llegar utilizar un lavado con ácido, sin embargo, éste es lento, caro y se deben tener cuidados especiales.

3. Tratamiento de condensados:

Éstos generan cierta corrosión en su entorno, por lo que se busca disminuir su efecto mediante el uso de nitrógeno; mediante la hidracina, la cual disuelve el oxígeno sin elevar la disolución de azufre a altas presiones, pero su exceso en el residual debe de ser evitado para que no se forme un subproducto de amonio, el cual ataca el cobre, material de la caldera.

El pH del agua reciclada se busca que este entre 10.5 y 11 para evitar la corrosión, ya que esta al ser neutra funciona como una delgada película entre el metal y el condensado de oxígeno y dióxido de carbono, actuando contra su acidez.

El agua debe ser previamente calentada por dos razones, evitar un choque térmico al igual que la temperatura del agua no permite que se asienten sólidos en la parte inferior de las calderas, ya que su solubilidad decrece con temperaturas altas.

El tratamiento del agua que es utilizada para la generación de vapor, éste es muy importante ya que garantiza tanto la calidad del agua y del vapor generado, como el mantenimiento de la caldera misma.

Mientras que la caldera también se le aplica un choque eléctrico; para evitar cargas electrostáticas, las cuales a veces son generadas por la condensación del vapor, formando una niebla al bajar la presión.

Cámara de gas:

La cámara de gas puede sufrir un ataque de ácido sulfúrico el cual se debe a los cambios de temperatura, ya que varían las cantidades de azufre y los niveles del exceso de oxígeno, para evitar esto se hacen lavados de agua a la cual se le agrega una solución caustica con el fin de neutralizar el ácido, es decir, disminuir su concentración.

La superficie donde se lleva a cabo la transferencia de calor es propensa a tener depósitos de sólidos o incrustaciones, que es la formación de cristales como lo es el sulfuro de calcio, ambos efectos son minimizados con inhibidores y al tener una velocidad alta, siempre cuidando las altas caídas de presión y la erosión que el exceso de velocidad puede llegar a generar. Es importante también evitar el exceso de temperatura.

1.4.1 CALDERAS EN DUPONT®

La planta agroquímica utiliza dos calderas, una de 100 HP y otra de 20 HP, siendo la de menor capacidad utilizada como respaldo de la primera. Las calderas son utilizadas para el calentamiento del aire que es utilizado en el secador.

El vapor saturado es utilizado para transferir calor al aire que es suministrado en el secador de la planta y para otras aplicaciones dentro de la planta. El vapor es transportado mediante serpentines, los cuales mediante conducción y convección calientan el aire que es arrojado por un ventilador, hacia el secador.

Las calderas son marca Cleaver Brooks y sus características se muestran en la *¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.* y la *¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.*:

Tabla 6. Características de Caldera de 100HP. Datos de Dupont® obtenidos en Julio 2017

Caldera de 100	
Capacidad (HP)	100
Capacidad evaporativa (kg/h de vapor)	1,565
Presión de diseño (kg/cm ²)	10.5
Temperatura máxima (°C)	212
Material	Acero al carbón

Tabla 7. Características de Caldera de 20HP. Datos de Dupont® obtenidos en Julio 2017

Caldera de 20	
Capacidad (HP)	20
Capacidad evaporativa (kg/h de vapor)	312
Presión de diseño (kg/cm ²)	10.5
Temperatura máxima (°C)	212
Material	Acero al carbón

Las materias primas que son utilizadas para el uso y mantenimiento de las calderas son:

- Diésel como combustible
- Alcalinizante
- Polímero
- Aditivo N500
- Aceite Mobil

Debido a que las calderas son equipos utilizados en diferentes plantas a lo largo del mundo, han ido suscitando incidentes con ellas, las cuales han sido investigadas con el fin de prevenir el riesgo que su uso conlleva. DuPont® realizó mayores investigaciones y ha buscado como evitar o minimizar el riesgo de sufrir accidentes con estas, es por eso que las

calderas que se tienen en la planta se les han ido implementando nuevos equipos de instrumentación para incrementar la seguridad en las Calderas de la planta DuPont® Lerma.

1.4.2 ASPECTOS DE SEGURIDAD

Para la seguridad de la caldera de 100 HP se realizó un análisis de consecuencias, las imágenes de éste análisis se encuentran en el **ANEXO II**. En este estudio se simularon dos diferentes escenarios de explosión obteniéndose zonas de alto riesgo y amortiguamiento de hasta 26.4 y 44.1 m, respectivamente; presentando el potencial de dañar equipo en proceso en radios de hasta 14.3 m.

La caldera puede tener fallas tanto en el material del lado de vapor, como explosión de la caldera por ignición de vapores excedentes de combustible, en este caso diésel. Se realizó el estudio para analizar el impacto que se tendría para ambos tipos de explosión.

El análisis de consecuencias simula los escenarios peligrosos con el programa Phast v6.53.1. La simulación se hizo observando los criterios definidos por la Secretaría del Medio Ambiente.

La Caldera de 100 HP utiliza diésel como combustible para calentar agua la cual es evaporada generando vapor saturado hasta presiones y temperaturas de 10 kg/cm² y 186.5 °C respectivamente. En estas condiciones se realizaron dos diferentes suposiciones:

1. Se asumió que si el material fallaba ocurriría una explosión del tipo BLEVE (boiling liquid evaporating vapor explosión) suponiendo la conversión de todo el líquido a vapor.
2. El otro escenario simulado suponía una falla durante el barrido previo al encendido de la caldera, lo cual provocaría la acumulación excesiva de los vapores de diésel que provocaban una explosión al encender la caldera.

La siguiente resume los alcances de las zonas de afectación obtenidas para cada simulación.

Tabla 8. Resultados de Afectación para dos diferentes escenarios. Datos de Dupont® obtenidos en Julio 2017

Escenario	Afectación (m)		
	Daño a equipo	Alto riesgo	Amortiguamiento
Explosión de vapor	14.3	26.4	44.1
Explosión de diésel	4.6	10.2	18.6

Explosión de vapor:

Siendo este el primer escenario, se reportó que la explosión podría generar zonas de alto riesgo y de amortiguamiento de 26.4 y 44.1 m, respectivamente. También se podría dañar equipo de proceso en un radio de 14.3 m. En el **ANEXO II** se encuentran las gráficas que muestran la sobrepresión en función de la distancia y muestra las zonas que se verían afectadas.

En este escenario se puede ver que se llegarían a generar sobrepresiones hasta de 50 psi que decrecen rápidamente por lo que la zona de afectación a equipo de proceso, parece afectar únicamente dentro del cuarto de calderas, sin embargo, cuando se simuló el contorno de 1 psi, se pueden derribar muros alcanzando edificios cercanos, representando un riesgo al personal. Finalmente el contorno externo muestra que se pueden romper ventanas, representando un peligro para los operadores que trabajen y también para la empresa vecina que se encuentra al oeste.

Es importante entonces contar con programas de inspección y mantenimiento que garanticen que este tipo de falla de material no pueda presentarse, así como con dispositivos de alarma que notifiquen efectivamente la disminución del nivel del líquido dentro de la caldera, que permitan el apagado de la caldera de manera automática por falta de líquido y que avisen en caso de interrupción del suministro continuo de agua.

También es conveniente revisar si los equipos y estructuras continuas son capaces de resistir los niveles de sobrepresión a que pudieran ser expuestos en caso de que se presentara este evento para decidir sobre la conveniencia de una posible reubicación.

Explosión de Diésel

En segundo escenario la explosión generaría zonas de alto riesgo y amortiguamiento de 4.7 y 7.7 m, respectivamente. También se podría dañar equipo de proceso en un radio de 2.3 m.

En este caso se tienen niveles de sobrepresión relativamente elevados que disminuyen pronto y prácticamente a partir de los 20 m dejan de representar un problema. Sólo el equipo muy cercano tendría potencial de ser afectado, para tener un mejor resultado se corrió de nuevo este escenario pero con el modelo de Explosión de Multienergía el cual permite incorporar factores de confinamiento que modifican proporcionalmente el cálculo de las sobrepresiones, para este modelo se utilizó un factor de 10 que es típico para zonas con equipo de proceso y se encontró que las zonas de alto riesgo y amortiguamiento incrementó el radio de afectación; se tuvieron resultados de 7.1 y 12.9 m, respectivamente, con posibilidad de dañar equipo de proceso en un radio de 3.2 m.

En este escenario se ve que los radios de afectación aumentaron un poco, sin embargo, a 1 psi sólo dañaría a la otra caldera y al equipo dentro del cuarto de calderas.

Ya que la cantidad de diésel considerada en la explosión para este escenario está relacionada con el tiempo de barrido previo al encendido de la caldera, por lo que se corrió una tercer simulación dónde se consideró el caso extremo con un excedente de diésel el cual sería igual a 15 segundos, duración máxima del barrido, se obtuvo que se tendrían zonas de alto riesgo y amortiguamiento de 10.2 y 18.6 m, así como daño a equipo de proceso en un radio de 4.6 m.

Nuevamente con esta suposición el contorno de 1 psi sigue sin alcanzar a los edificios cercanos por lo que se sigue asumiendo que esta explosión afectaría básicamente al equipo dentro del cuarto de calderas, incluyendo a la otra caldera.

Esto no quiere decir que el escenario no sea importante ya que se corre el riesgo de tener un derrame que pueda incendiarse y causar un problema mayor, por lo que es importante contar con sistemas de inspección y mantenimiento que garanticen que un evento así no ocurra, incluyendo alarmas que impidan el encendido de la caldera si hubiera vapores de diésel preexistentes.

Al igual que con el escenario anterior es conveniente revisar que los equipos y edificios cercanos puedan resistir los niveles de sobrepresión a que pudieran verse expuestos.

Finalmente, con base en la lógica de la caldera, se recomienda determinar la cantidad necesaria que se requeriría de diésel para obtener radios de afectación que sí afecten a los edificios de los alrededores y que tengan potencial de rebasar límites de propiedad para que con esa cantidad se determinen acciones preventivas que impidan que tal liberación pueda darse.

Adicional a la simulación de posible explosión, con el apoyo de OSHA, la caldera cubre con ciertos requerimientos en cuanto a los instrumentos adicionales que debe tener para tener la seguridad necesaria para evitar incidentes. Por lo que se debe tener la instalación de sistemas de seguridad y control: (Occupational Safety and Health Administration, 2017)

- En el quemador: Lugar dónde se genera la chispa por el combustible, la presión debe mantenerse baja y el combustible atomizado por aire.
- Guardallama y relevador: Para el control de la llama se utiliza un detector de llama infrarrojo.
- Control para manejo y seguridad del agua: Para nivelar la altura del agua se utilizan flotadores, los cuales dependiendo de la empresa, en ocasiones se tienen dos para mayor seguridad, el principal, y uno auxiliar en caso de que el primero falle. Su función es apagar el quemador y en caso de ser requerido, el flujo de agua es detenido.
- Nivel de agua a la mitad del volumen total: Este no permite el suministro de agua fría a la caldera, para evitar una implosión por choque térmico.

Control, manejo y seguridad del combustible: se debe tener mucho cuidado con el manejo de este ya que es inflamable. Consta de diferentes sistemas:

- Sistema de filtro: protege el cuerpo del tanque del combustible.
- Sistema de bomba: Encargado de la seguridad durante el transporte del combustible.
- Precalentamiento eléctrico y a gas: Se realiza para calentar un poco el agua antes de que entre a la caldera.
- Válvula desaireadora: Saca el aire del cuerpo de la caldera que esté en exceso.
- Válvula termostática: Si la temperatura decrece ésta válvula se abre con el fin de mantener la energía que calienta el vapor.
- Válvula reductora: Para disminuir la presión de vapor.
- Trampa de condensados: Desaloja los condensados del pre-calentador.
- Manómetro y termómetro: Están colocados después del sistema de filtro para revisar que la presión y temperatura sean las especificadas.
- Válvula modulante: Regula la presión y cantidad de combustible suministrado a la caldera.
- Válvulas solenoides: Son las encargadas de controlar el flujo de combustible, éstas se abren o cierran para permitir o no el paso del combustible.

Control, manejo y seguridad de calderas: se utiliza un sistema modulado el cual incrementa o disminuye la generación de vapor al variar la cantidad de combustible en el quemador, es decir, varía la energía que se suministra a la caldera para la evaporación del agua:

- Control regulador de tiro forzado (damper): Es para evitar que la caldera se encienda al estar en una posición diferente bajo fuego.
- Control de tanques condensados: Se utiliza una válvula flotador.
- Control de tanque diario de combustible: Este depende del cambio del combustible.
- Control de gas chimenea: Este equipo regula la temperatura de salida de los gases emitidos por la combustión que se lleva a cabo en la caldera, disminuye la temperatura cuando esta rebasa el set point.
- Control de vapor: Limita la presión de la temperatura al deshabilitar el control del combustible, utiliza una válvula de seguridad la cual se prende cuando la cantidad de vapor incrementa, desaloja el exceso de éste.

De igual manera es importante que se lleven a cabo purgas en las calderas; estas son en la columna de agua para evitar que el flotador se pegue al cuerpo de la cámara, y así la señal siempre sea enviada. Otra purga que se lleva a cabo es la de fondo; para eliminar los lodos, los cuales tienden a incrementar la temperatura y agrietan el cuerpo de la caldera. Se recomienda que sea continua para evitar la formación de lodos de agua, espuma y/o grasas.

1.4.3 ASPECTOS ECONÓMICOS

Las calderas están instaladas en la planta desde 1986, por lo que éstas ya tienen más de 30 años de uso, de acuerdo a la información publicada por ASHRAE*, la vida útil promedio de las calderas de acero varía entre 30 y 35 años, sin embargo, estas siguen siendo útiles para la planta por el mantenimiento y cuidados que se les ha dado a lo largo de los años. Se consideró hacer cambio de equipo, pero su precio sería aproximadamente de 250-300M\$ dólares, la cual representaría una inversión fuerte para la empresa, debido a esto se buscó otra forma de poder obtener el vapor saturado, sin la necesidad de comprar un nuevo equipo, o buscar remedios temporales para extender el uso de las calderas sin correr el riesgo de que las calderas comiencen a fallar. (ASHRAE, 2017)

Para el análisis del aspecto económico de las calderas se consideran todos los gastos que éstas conllevan:

Es importante darles mantenimiento a los equipos de manera regular. Se realizan dos tipos de mantenimientos para las calderas, uno mensual y otro más profundo de manera semestral.

También se tiene que considerar el combustible de las calderas, diésel, el cual ya se tiene un aproximado de cuantos litros se consumen al año.

Por regulaciones ambientales y normatividades es importante cuidar el aspecto del cuidado al medio ambiente, por lo que se debe realizar monitoreo de los gases liberados por parte de la combustión de la caldera, este es otro gasto a considerar.

Finalmente se añade al gasto de las calderas, el sueldo de los operadores responsables de su operación y mantenimiento.

La calibración de válvulas y el tratamiento químico no se agrega debido a que en proporción a los demás gastos, éstos son mínimos.

1.5 LÍNEA DE VAPOR

El transporte de fluidos se lleva a cabo mediante tuberías, las cuales son circulares ya que el diámetro de resistencia de las estructuras es mayor para la sección transversal para el mismo perímetro exterior. Durante el transporte de vapor a lo largo de la tubería es de alta importancia que no se pierda el calor, por lo que el diseño y selección de éstas se debe buscar que sean tuberías efectivas y eficientes. Con el fin de evitar la pérdida de calor en las tuberías, éstas se cubren. Existe una gran diferencia de las que están aisladas a las que están al descubierto, siendo lo típico forrar 1 pulgada por 56 °C de la temperatura del vapor. (Scribd, 2012)

El aislamiento típico para el recubrimiento de tuberías es fibra de vidrio con revestimiento de acero inoxidable. El aislamiento de la tubería es considerado a lo largo de todo el sistema de la línea de vapor, no únicamente la que transporta el vapor, si no los elementos del sistema (válvulas de control, de aislamiento, etc.) al igual que las tuberías de condensado. Para el resto de la instrumentación es bueno considerar aislamientos desprendibles y para las tuberías de condensado, estas segundas son importantes ya que la pérdida de su calor a lo largo de la tubería, es energía que podría ser utilizada nuevamente en las calderas.

*La ASHRAE es una asociación de tecnología que fue fundada en 1894. Ésta fue creciendo hasta que en 1954 se llamó American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers al ser la fusión de American Society of Heating and Air-Conditioning Engineers (ASHAE) con The American Society of Refrigerating Engineers (ASRE).

La velocidad aproximada para el vapor saturado en las tuberías es de 30 m/s a 40 m/s para líneas largas, y de 25 m/s para derivaciones y líneas cortas. En cuanto a los depósitos de suciedad y las trampas de vapor, usualmente se busca ubicarlos cada 30-40 m. Es primordial que las trampas estén localizadas antes de cada subida y de preferencia antes de cada curva. Estos sistemas son prioridad debido a la protección que le aportan a los equipos. Un ejemplo de los sistemas de protección son los medidores de flujo y las válvulas de control. (Progressive Energy Services, 2017).

En una instalación típica para líneas de vapor es idóneo tener un depósito de recolección de condensados para cada área de proceso. El condensado que es recolectado en los tanques se bombea de nuevo a las calderas, de ser este el caso es importante que no haya trampas alimentadas en la línea de retorno de condensado bombeado ya que se podría presurizar por las bombas y causar una contra presión en las trampas. Las trampas mecánicas si presentan fallas también pueden provocar un flujo con dos fases, lo cual es contraproducente debido a que la tubería para el retorno de condensados está diseñada para soportar sólo una fase. (Compañía Especialista en Vapor TLV, 2017)

En ocasiones se ha presentado que la línea que transporta el vapor se apaga, dejando la línea del condensado presurizada, por lo que es necesario hacer uso de una válvula check después de la trampa de vapor para prevenir el contra flujo del condensado en el equipo. Usualmente se recomienda que el tanque dónde llegan los condensados este a un nivel inferior que la línea, con la excepción de que exista una tendencia del intercambiador de calor que opere a bajas presiones, como es el caso de los calentadores de aire acondicionado, y estos están a veces parcialmente inundados, y entonces sería necesario levantar la línea después de la trampa de vapor.

La tubería puede sufrir de erosión por lo que el mantenimiento y buen diseño de la tubería es primordial para la vida de esta. El mayor causal de la erosión es el condensado que es acarreado por el vapor, debido a que golpea la tubería, tanto su masa como la alta velocidad

que lleva e impacta la tubería, va adelgazando su pared. Este tipo de erosión es conocida como erosión por picadura de gotas líquidas.

Por el costo de instalación, usualmente se usa acero al carbón aunque su resistencia es menor que la del acero inoxidable.

La tubería del retorno de condensados es susceptible a la erosión por el manejo incorrecto del vapor flash que se genera por la corriente, aún si su diseño es para condensados la aparición de vapor flash es natural, por lo que la corriente se convierte en una corriente de vapor húmedo a gran velocidad, lo cual es conocido como erosión por flasheo.

Esta condición se ve empeorada si se tienen los siguientes factores:

- Líneas de vapor sub dimensionadas, lo cual causa una alta velocidad para el vapor flash
- Elementos corrosivos como el ácido carbónico con los condensados y a baja temperatura

También se puede presentar la erosión por cavitación, la cual ocurre por repentinas ondas de choque generadas por la implosión de pequeñas burbujas de vapor que estén en medio del condensado. Ésta ocurre debido a que el vapor flash ocupa un volumen muy grande y al ser condensado rápidamente y de forma repentina, libera parte de su energía hacia el condensado y la tubería adyacente.

Las trampas de vapor son necesarias en los sistemas que utilizan vapor debido a que estas dependiendo del uso, es su aplicación, pueden ser requeridas para el drenado de condensados de las tuberías de vapor, de procesos que usan vapor y equipos de calefacción de aire, de líneas de trazo y de motores o generadores con turbinas de vapor. Para su selección y diseño se debe tomar en cuenta los siguientes puntos:

1. Se debe determinar la descarga de la aplicación de la trampa de vapor, por ejemplo, si es caliente o sub enfriada, y con esto determinar el tipo de trampa correspondiente.
2. Seleccionar el modelo de acuerdo a la presión y la temperatura de operación, al igual que la orientación que ésta deba tener.
3. Calcular la carga de condensado requerido, considerando el factor de seguridad recomendado por el fabricante.
4. Buscar que la selección final para la trampa de vapor tenga el menor costo de ciclo de vida, es importante considerar que las trampas de vapor ayudan a evitar el golpe de ariete, esto se logra al elegir una trampa que evite la acumulación de condensado, es decir, que no tengan o sea muy escaso el sub enfriamiento del condensado.

Es importante que durante la selección del tipo de trampa de vapor, éstas ayuden a disminuir el tiempo de arranque y que no permita la acumulación de condensado dentro del equipo, ya que esto podría generar baja transferencia de calor y calentamientos dispares a lo largo del equipo. En este tipo de circunstancias, donde el condensado tiende a acumularse mucho, se recomienda trampas que descarguen continuamente.

Las funciones de venteo de aire son usualmente requeridas en las trampas para eliminar el aire y los gases no condensables que quedan atrapados en el equipo y la tubería. Otro problema que presentan algunos equipos calentados por vapor es originado por la válvula de control; ya que se ésta se ajusta dependiendo de la demanda de calor, reduce la presión de vapor suministrado. Cuando esto sucede el flujo se detiene, requiriendo un drenaje de otro tipo, a esta condición se le conoce como Stall, en estos casos se necesita una combinación de trampa con bomba en la que la presión secundaria más alta impulsa el condensado para la descarga. Esto sucede cuando se tiene una presión diferencial que se vuelva negativa, el flujo no se drena y se acumula.

Las condiciones en las que mayoritariamente sucede este efecto son en los siguientes problemas:

- Ruptura de calentadores
- Golpe de ariete
- Temperaturas de calentamiento desiguales

Dependiendo de si se presente o no el efecto Stall se determina el equipo para el calentamiento:

Sin el efecto:

- Descarga continua del condensado para maximizar el calentado y minimizar su acumulación
- No afectación por variaciones de la carga de condensado
- Capacidad de venteo al arranque y durante la operación
- Capacidad de descargar el condensado aun cuando la presión diferencial sea muy pequeña y que pueda operar a contrapresión
- Que tenga la característica de falla abierta para que el condensado sea descargado aún si la trampa está dañada o desgastada
- No descargar el condensado a chorros de alta presión para evitar la erosión de la tubería

Con el efecto Stall:

Se requieren las mismas características que sin el efecto y se requieren las siguientes:

- No sub-enfriamiento del condensado, para maximizar el calentamiento de una forma estable.
- Capacidad de descargar el condensado sin pérdida de vapor, con la presión diferencial negativa o positiva.
- Otro tipo de componentes complementarios pueden ser necesitados de tener el sistema dañado o desgastado, para descargar el condensado.

Pérdida de presión debido a válvulas y accesorios

Cuando se tiene un fluido que se desplaza de forma uniforme en una tubería recta, larga y de diámetro constante, la configuración del fluido adopta una forma característica y cualquier obstáculo o cambio de dirección al que éste se enfrente cambia su configuración y ocasiona turbulencia, por lo que se genera una pérdida de energía, y así las válvulas y los accesorios generan una pérdida de presión adicional.

La pérdida de presión total de una válvula o accesorio se debe a lo siguiente:

1. La pérdida es dentro de la válvula.
2. La pérdida de presión es mayor a la entrada de la tubería de la que se produce si no tuviera una válvula, esta pérdida de presión tiende a ser pequeña.
3. La pérdida de presión a la salida de la tubería es mayor a la producida si no se tuviera la válvula, y este efecto puede llegar a ser considerable.

Para su medición es difícil realizar el cálculo de la presión total, por lo que se tienen métodos conocidos que evalúan las tres posibles razones de pérdida.

Para medir la pérdida de presión en válvulas y accesorios para agua o vapor de agua, se puede medir al instalar un sistema en el que la presión diferencial estática sea medida con un manómetro conectado a anillos piezométricos, los cuales están situados en la entrada y salida de dónde se realiza la prueba, así al restar la presión diferencial encontrada en la tubería (determinada entre los piezométricos) de la total, se obtiene la de las válvulas. (Perry, 1984)

La pérdida de presión está relacionada con la velocidad con la que el flujo tenga; muchos experimentos han demostrado que la presión de las válvulas y accesorios es proporcional a la velocidad elevada a un exponente constante. En los casos prácticos se acepta que la caída de presión debido al flujo del fluido de régimen turbulento varía al cuadrado de la velocidad. (Perry, 1984)

1.5.1 LÍNEA DE VAPOR EN DUPONT®

El alcance del proyecto que se quiere realizar incluye el suministro e instalación de una línea de interconexión de vapor, manteniendo como respaldo de generación de vapor las calderas existentes. La interconexión va desde el límite de batería con un tercero hasta la línea de alimentación que está en el rack proveniente de la caldera, este tiene una capacidad máxima de 2,000 kg/h.

La línea de vapor debe tener los siguientes accesorios:

- 120 m de tubería de 3" NPS de acero al carbón
- Aislamiento de 1.5" de espesor: fibra de vidrio acabado de acero inoxidable para toda la tubería
- Válvulas con 3 trampas de vapor con el fin de desahogar los condensados de la tubería
- Dos medidores de presión en las tuberías, uno justo en la conexión con el proveedor de vapor y otro más adelante, para asegurarse que el suministro de vapor sea el correcto
- Un regulador de presión
- Válvula de alivio de presión calibrada a 12.5 kg/cm²
- Válvula de globo para el empaquetado de la línea, controlando el flujo de éste y equilibrando la presión
- 4 válvulas de compuerta, las cuales funcionan para el seccionamiento del vapor
- 1 válvula motorizada la cual esta automatizada, si la presión llega a sobrepasar la establecida, ésta válvula se cierra
- 1 válvula reguladora para disminuir la presión generada por parte de la empresa colindante
- Accesorios: un aproximado de 35 codos, 18 t's, 13 uniones y 3 coples

En el **ANEXO III** se muestra el layout de la línea de vapor y en el **ANEXO IV** se encuentra su DTI, los cuales muestran el flujo que tendría el vapor saturado. Primeramente se inicia el suministro por parte de la empresa colindante hacia la empresa, es suministrada a 8 kg/cm² de presión, pasará por un filtro el cual se encargará de impedir que cualquier sólido tenga acceso a la tubería y así se asegura que no se dañe la válvula reguladora. De igual forma, en el filtro se encuentra una válvula con el fin de descargar todo los posibles condensados que vengan arrastrados por la empresa vecina.

De igual forma, la válvula de globo que está instalada en el bypass, donde se encuentra la válvula motorizada, se abre un 30% para permitir el empaquetado de la línea, asegurando el control del flujo de este, posterior a su apertura se hace el segundo drenado, expulsando los condensados que se hayan generado en la línea de vapor, una vez regulada la presión se cierra esta válvula y la de compuerta es abierta, permitiendo el paso del vapor a la actuada, se cuenta con un transmisor de presión el cual si detecta una presión mayor a la establecida, manda una señal al registrador de datos y la válvula actuada se cierra.

Para la prevención de recibir mayor presión a la que se está solicitando, pasando el filtro, se cuenta con una válvula de seguridad o de alivio, la cual si se recibe presión mayor a 12.5 kg/cm², la válvula libera presión hasta disminuir a 12.2 kg/cm². De igual forma, la válvula de bola se cierra automáticamente al recibir presiones mayores a 7.4 kg/cm² e impide que el suministro de vapor llegue al cabezal de la línea de vapor de DuPont®.

La tubería está diseñada para soportar presiones hasta de 14 kg/cm². A continuación en la **Tabla 9** se muestran las presiones a las que operaran las válvulas:

Tabla 9. Presión de válvulas de línea de vapor. Datos de Dupont® obtenidos en Julio 2017

Accesorio	Presión de Operación (kg/cm ²)	Presión Máxima (kg/cm ²)
Válvula de seguridad	12.4	12.5
Válvula actuada	7.2	7.5
Válvula reguladora	7.2	N/A

Para su instalación no es necesario realizar cambios en el uso habitual de equipos de protección personal. Se realizaron actualizaciones en los procedimientos de operación para la caldera, al igual que se llevó a cabo la modificación de los planos de la caldera, tuberías y planos de instrumentación. Se realizará un cambio de control lógico del proceso, plan del proceso y la respuesta a auxilios en cuanto a la operación de las calderas, ya que ahora serán utilizadas como fuente de energía auxiliar.

Adicionalmente, se le dará entrenamientos al personal de mantenimiento, los ingenieros de producción y a los calderistas para que el uso sea el indicado y no se tengan ningún tipo de incidentes durante el uso e instalación de la línea.

1.5.2 ASPECTOS DE SEGURIDAD

Se realizó un Análisis de riesgos en el cual se determinó que la mayoría de estos disminuirían:

- No existe riesgo de contaminación cruzada
- No se tendría probable fuga química ya que la sustancia a transportar es vapor
- La posibilidad de fuegos es nula ya que el vapor es un fluido inflamable
- La probabilidad de que se presenten explosiones es aún más reducida que las posibles con el uso de las calderas, sin embargo, se tiene que tener cuidado con exceso de presión. Se deben instalar sistemas para cuidar este aspecto, ya que el impacto de esto puede ser alto aunque su probabilidad no es tan alta (C2,F1)*. Para esto se le agregarán placas de orificio y se realizará una prueba hidrostática alrededor del distribuidor existente

- No hay posibles reacciones químicas, probable ignición o nubes de vapor inflamable en el aire
- La nueva línea no tendrá nueva tecnología que incremente el riesgo durante el transporte del vapor
- La instalación de la tubería se buscó que no esté localizada sobre áreas peligrosas
- No existe la potencialidad de fatalidades
- No afecta la disposición de seguridad ni la ergonomía del área, por lo que las medidas que se tenían en la planta, como respuesta a emergencias no se deberán de adicionar actualizaciones ya que las que se tenían son suficientes
- No incrementa el volumen de derrame del fluido
- No se requeriría de un procedimiento robusto para la línea, al igual de un sistema en caso de falla del sistema
- La toxicidad que se podría tener es crónica y no es del proceso, ya que no existe emisión de material tóxico
- No existe la generación de ruidos
- La radiación no es nuclear ni térmica
- Contaminación al ambiente no es generada por el proceso sino depende de los buenos procedimientos de diseño, la contaminación que puede existir es por posibles derrames, como lo son las fugas (bridas), por salpicaduras o si el vapor llegará a descargarse. Para prevenir esto se colocarán válvulas de alivio, válvulas de venteo y lavadores (scrubbers), drenes, etc. Se debe dar mantenimiento y asegurar la limpieza de la tubería.

DuPont® tiene una clasificación de equipos críticos; los cuales son clasificados así por su importancia para la seguridad del sistema, el personal y el medio ambiente. En este caso, los únicos equipos críticos considerados fueron las válvulas de seguridad y las válvulas de la tubería.

*DuPont® cuenta con un estándar en el que clasifican los riesgos de los peligros en sus instalaciones, siendo C la severidad del evento y P, la frecuencia con la que éste evento se presenta.

Siendo

C2: La consecuencia del evento es considerada moderada, efectos en la salud son reversibles, esperándose una recuperación completa.

F1: Muy improbable, no esperado su suceso, 1 cada 10,000 años.

1.5.3 ASPECTOS ECONÓMICOS

Debido a que la operación de las calderas tiene un precio elevado y un riesgo inherente, se buscó una segunda opción con la que se pudiera ahorrar costo, por lo que se consideró llevar a cabo un proyecto donde el suministro del vapor no fuera generado por la propia empresa, sino con una externa. Al evaluar las empresas colindantes se llegó a la conclusión

que una de ellas podría ser quien suministrara el vapor, debido al excedente de vapor saturado que esta planta genera.

Considerando que se ahorrarían la operación y mantenimiento de las calderas, el combustible que requiere y el salario de los operadores de ella, se abrió la posibilidad de investigar más respecto a la posibilidad de llevar a cabo este proyecto, con el fin de disminuir el costo para la obtención de este servicio.

2. JUSTIFICACIÓN

El objetivo principal de este proyecto es realizar un análisis técnico económico del suministro de vapor en la planta DuPont® Lerma. En la planta se formulan herbicidas sólidos, los cuales son sometidos al proceso de secado con el fin de disminuir su porcentaje de humedad, incrementando la eficiencia de los sólidos y los prepara para entrar a las zarandas dónde los granos serán separados de acuerdo a su tamaño. El secador, junto con otros servicios que requieren el uso de aire caliente, utiliza vapor saturado para su calentamiento, el cual es generado mediante calderas.

Las calderas son excelente opción debido a que proporcionan este servicio buscando generar vapor saturado de alta calidad, con un bajo costo. Sin embargo, se tienen diferentes factores que se deben tomar en consideración, como lo son:

El gasto que generan:

- Costo de operación
- Salarios de los calderistas
- Costo del combustible
- Su mantenimiento

Los posibles riesgos que con su manejo se podrían presentar en la planta:

- Explosión de la caldera o tanque de combustible
- Fugas
- Quemaduras por contacto con el equipo, etc.

Por lo que este proyecto se basa en la búsqueda de una alternativa para mantener el suministro de vapor saturado en la planta, disminuyendo los costos de producción, operación, riesgos y manteniendo su eficiencia.

Una alternativa podría ser la compra de unas calderas nuevas y sus respectivas redes de calor las cuales implican una fuerte inversión para la planta, por lo que la opción presentada en este trabajo es la adquisición de esta energía y/o vapor de un tercero (empresa alterna), siempre y cuando la disponibilidad del vapor sea cercana.

Debido a la necesidad del uso de vapor saturado en la planta DuPont® Lerma en el presente proyecto se realiza el análisis técnico y económico para la posibilidad de encontrar otro medio que ofrezca mayores ventajas para su suministro.

3. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN.

¿El suministro de vapor por parte de una empresa colindante es más ventajosa en cuanto a la disponibilidad, seguridad y su aspecto económico, que el uso de las calderas propias en la planta DuPont® Lerma?

4. OBJETIVOS.

4.1 OBJETIVO GENERAL

Analizar y comparar económica y técnicamente la etapa de suministro de vapor en la planta industrial de DuPont® en Lerma para el consumo de vapor saturado requerido, tanto en el proceso de su secador de lecho vibrofluidizado como en sus otros servicios que lo requieren, por parte de la propia empresa y una empresa colindante, decidiendo la mejor opción.

4.2 OBJETIVO PARTICULAR

- Determinar la cantidad de energía requerida mensual y anualmente por la planta para el uso del secador y demás aplicaciones.
- Evaluar el diseño de una línea de suministro de vapor, de acuerdo a estándares y buenas prácticas de ingeniería, contemplando los requerimientos de seguridad necesarios, así como el sistema de medición de consumo, que permita cuantificar el consumo de vapor por la planta.
- Realizar una comparación económica de gastos de las calderas actuales con respecto a la instalación de la línea de vapor suministrada por un tercero. De igual forma, evaluar el índice de retorno de inversión de la instalación de la línea de vapor.
- Realizar una comparativa de riesgos de ambas instalaciones.

5. METODOLOGÍA.

5.1 OBTENCIÓN DE LA CANTIDAD DE VAPOR

Para determinar la cantidad de aire requerido para llevar a cabo la operación se debe realizar el balance de calor respectivo del tipo de secador. Se planteó que el secado del producto tiene un contenido inicial de humedad en base seca de 0.17 y con un flujo de 300 kg/h a base seca. Este fue sometido a un secado continuo en las tres zonas del secador, el aire atmosférico con una humedad absoluta (Y) promedio 11.5 g/kg de Aire Seco (condiciones de Toluca 560mmHg, en época lluviosa) el cual es calentado hasta una temperatura de 100°C, ya que el producto no es termosensible bajo dichas condiciones no se tiene problemas con la temperatura, éste se pone en contacto con el producto con las condiciones diseñadas en cada una de las etapas del secador, después del proceso de intercambio de calor, éste aire es desechado a la atmósfera y el producto con un decremento en su humedad será alimentado a la siguiente zona hasta llegar a la última zona con una humedad final de 0.01 base seca.

5.1.1 BALANCE DE MASA Y ENERGÍA DEL AIRE EN EL SECADOR

Por lo anterior, el objetivo fue determinar los flujos de aire a través de cada una de las cámaras rectangulares del secador, así como los requerimientos energéticos para su calentamiento con el uso de vapor saturado empleando un intercambiador. Las condiciones que se conocen son las condiciones de salida de las corrientes de aire (temperatura y humedad absoluta) y la humedad del producto también a la salida de cada zona. Con esta información se calculan los flujos de aire requeridos en cada zona.

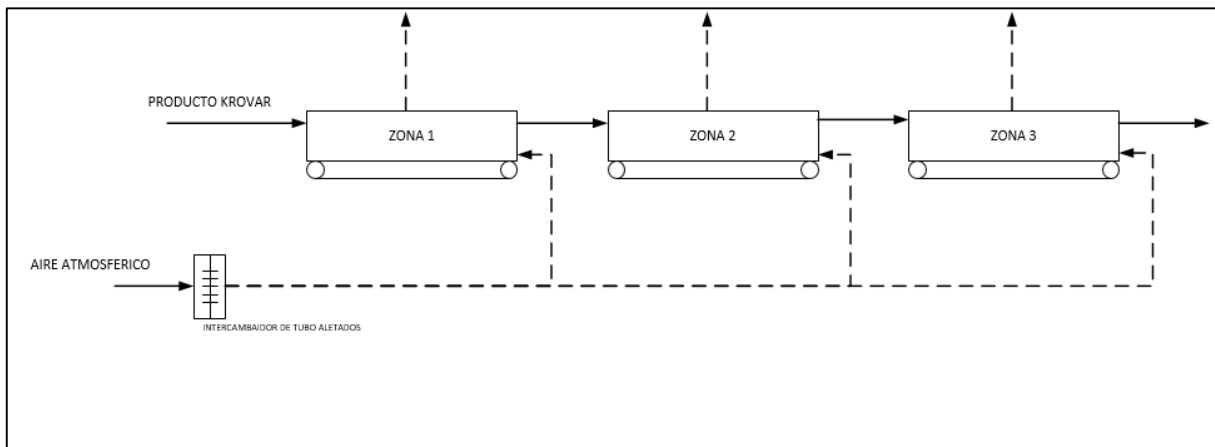


Ilustración 2. Representación del proceso del secador de lecho vibrofluidizado

Considerando cada zona de forma individual se tiene la siguiente base de cálculo



Ilustración 2. Esquema de secador

En la [Error! No se encuentra el origen de la referencia.1](#) se muestra el balance de masa para el secador vibrofluidizado:

Ecuación 1. Balance de masa del secador

$$S_S X_I + G_S Y_I = S_S X_O + G_S Y_O$$

donde

G_S = Flujo de aire en Base seca (kg aire/h)

S_S = Flujo de sólido en Base seca (kg sólido/h)

X_I = Humedad absoluta en el sólido en la entrada del secador (kg de agua/kg sólido seco).

X_O = Humedad absoluta en el sólido en la salida del secador (kg de agua/kg sólido seco).

Y_I = Humedad absoluta en el aire a la entrada del secador (kg de agua/ kg aire seco)

Y_O = Humedad absoluta en el aire a la salida del secador (kg de agua/ kg aire seco)

El Balance de Energía se muestra en la [Error! No se encuentra el origen de la referencia.2](#):

Ecuación 2. Balance de Energía del secador

$$S_S H_{SI} + G_S H_{GI} = S_S H_{SO} + G_S H_{GO}$$

donde la Entalpía del sólido está dada en la [Error! No se encuentra el origen de la referencia.3](#):

Ecuación 3. Entalpía del sólido

$$H_S = C_{PS}T_i + XC_{PA}T_i$$

donde

C_{PS} = Capacidad Calorífica del producto sólido (0.9629kJ /kg °C)

C_{PA} = Capacidad Calorífica del agua (4.18 kJ /kg °C)

La Entalpía del aire húmedo está dada por la *¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.4*:

Ecuación 4. Entalpía del gas

$$H_G = (1.005 + 1.884Y)T_i + \Delta Y$$

donde

Δ = Entalpía de Evaporización del agua (2,502 kJ /kg)

Al combinar los balances de materia y energía es posible determinar la humedad de salida del aire y su flujo. Por lo que primero se igualan los valores del flujo del aire en ambos balances obteniéndose la *¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.5*, la cual con el apoyo de Solver en Excel, se dejó como incógnita el valor de la humedad y se determinó:

Ecuación 5. Igualdad de ambos balances

$$G_S = S_S \frac{(X_0 - X_1)}{(Y_0 - Y_1)} = S_S \frac{(H_{SO} - H_{S1})}{(H_{G1} - H_{G0})}$$

Finalmente se obtuvo la cantidad de calor que se disipaba desde el seno del secador hacia el ambiente. La transferencia de calor se da primeramente mediante convección, por parte del seno del fluido (aire caliente) hacia la pared del secador, posteriormente existe transferencia de calor por conducción a lo ancho de la pared del secador y el calor por radiación que se disipa al ambiente al ser tan pequeño, es despreciable, ya que el secador se encuentra en un cuarto cerrado al ambiente.

La *¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.6* muestra que la sumatoria de ambos calores da el flujo de calor total:

Ecuación 6. Calor total de disipación

$$Q_{T1} = Q_{convección} + Q_{conducción}$$

Donde los calores son obtenidos de la siguiente forma:

Calor de Conducción

Este sigue la fórmula de la [¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.7](#) la cual representa la Ley de Fourier:

Ecuación 7. Ley de Fourier

$$Q_{conducción} = -kA \frac{dT}{dz} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta Z}$$

donde:

k = Constante de la conductividad térmica del material (acero inoxidable 17 W/m°C) (Welty et al., 2002)

A_{zona} = Área de cada sector del secador (1.236 m²)

ΔZ = Grosor de la pared del secador (0.0508 m)

ΔT = Temperatura media logarítmica con respecto a la pared en el interior y el exterior

Ecuación 8. Temperatura media logarítmica

$$\Delta T = \frac{T_a - T_b}{\ln T_a / T_b}$$

donde:

T_a = Temperatura en el interior de la pared del secador (95 °C)

T_b = Temperatura en el exterior de la pared del secador (20 °C)

Calor convectivo

Éste es obtenido con la [¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.0](#):

Ecuación 9. Calor convectivo

$$Q_{convección} = hA\Delta T$$

donde:

A = Área total del secador

El área de transferencia del secador por convección abarca la parte superior e inferior de éste, ya que los ductos de aire caliente van de abajo hacia arriba, para esta área se consideró la suma de área de las tres diferentes cámaras del secador: 3.708 m^2)

ΔT = Es la diferencia entre la temperatura media logarítmica con respecto a la temperatura del aire y del sólido a la entrada del secador y la temperatura de la parte interior de la pared. Por lo que primero se obtiene la temperatura media logarítmica sólido con la ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.9. En este caso las temperaturas serían las siguientes:

T_a = Temperatura de entrada del aire al secador (100 °C)

T_b = Temperatura de entrada del sólido al secador (20 °C)

El coeficiente de convección h es obtenido de la correlación con el número Nusselt

Ecuación 10. Número de Nusselt

$$Nu = \frac{hDe}{k_T}$$

Primero se obtiene el número de Nusselt, el cual depende del número de Reynolds y Prandlt. Se utilizan las correlaciones de Sieder- Tate (McCabe, Smith, & Harriot, 2007) dependiendo del valor que sea obtenido para cada número adimensional, de tenerse las siguientes condiciones:

$$Re > 10,000 \text{ y } 0.7 > Pr > 7,000$$

Se utiliza la siguiente ecuación para obtener el número Nusselt:

Ecuación 11. Correlación de Sieder-Tate

$$Nu = Re^{0.8} Pr^{Tb} \left[\frac{\mu_b}{\mu_w} \right]^{0.14}$$

Dónde:

$$Re = \frac{Le\rho v}{\mu}$$

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k_T}$$

Siendo:

Le = Longitud de cada sección del secador (1.015 m)

ρ = Densidad del aire a la temperatura de 100 °C (1.0159 kg/m³) (Perry, 1984)

μ = Viscosidad del aire a la temperatura de 100 °C (2.2x10⁻⁰⁵ Pa.s) (Perry, 1984)

v = Velocidad del flujo de aire (kg/h)

C_p = Capacidad calorífica a 100°C del aire (1.05×10^3 J/ kg K)

k_T =Conductividad térmica del aire a 100°C (3.19×10^{-02} W/m K) (Perry, 1984)

μ_b =Viscosidad del aire a Temperatura promedio (1.78×10^{-05} Pa.s) (Perry, 1984)

μ_w = Viscosidad del aire a la temperatura de la pared del secador (2×10^{-05} Pa.s) (Perry, 1984)

De =Diámetro equivalente (0.76 m)

Ecuación 12. Diámetro equivalente

$$De = \frac{2ab}{a + b}$$

El diámetro equivalente se obtiene ya que el perímetro del secador no es circular. Éste diámetro permite utilizarlo como equivalencia para representar este perímetro, es decir, la circunferencia del círculo equivale al perímetro no circular.

Para la obtención de la velocidad del aire se utilizó el flujo de aire a la entrada del secador, la cual fue obtenida en el balance de masa y energía en la sección 5.1.1. Con el apoyo de su densidad y el área de transferencia de calor convectivo, es decir, el área respectiva a cada cámara, fue que se obtuvo la velocidad:

$$v = G_s * \frac{1}{\rho} * \frac{1}{A_{conv.}}$$

Finalmente, ya con ambos calores, se sumaron como se muestra en la **Ecuación 134**, obteniéndose el calor total que se disipa en el secador.

Este calor se añadió al calor requerido para el secado del herbicida, obteniéndose el total del calor utilizado para el secador de lecho vibrofluidizado:

Ecuación 13. Calor total en el secador

$$Q_{T2} = Q_{para\ el\ secado\ del\ sólido} + Q_{convectivo} + Q_{conductivo}$$

donde

$Q_{para\ el\ secado\ del\ sólido}$: es el calor necesario para remover la humedad de las partículas sólidas

$Q_{convectivo}$: es el calor que se disipa de forma conectiva desde el seno del secador hacia el medio ambiente

$Q_{conductivo}$: es el calor que se transfiere a lo largo del grosor de la pared del secador

Siendo la suma de estos el calor necesario para deshidratar el sólido es la suma de las diferentes formas de energía que se presentan en la cámara de secado (Entalpías del gas).

5.1.2 BALANCE DE ENERGÍA ENTRE EL AIRE DEL SECADOR Y EL VAPOR SUMINISTRADO

El balance de energía puede expresarse como se muestran en la **Ecuación 14** :

Ecuación 14. Balance de energía

$$\Delta H + \Delta E_K + \Delta E_p = Q - W_s$$

De tal manera que tomando las consideraciones pertinentes, como un medio cuasi-estático en donde las diferencias de velocidades de entrada y salida del vapor pueden ser despreciadas ($\Delta \dot{E}_K = 0$), la diferencia de la altura entre la entrada y la salida del vapor no es lo suficientemente grande, y por lo tanto, se desprecia ($\Delta \dot{E}_p = 0$), así como no existen partes mecánicas que aporten u ocasionen la perdida de energía ($\dot{W}_s = 0$), entonces el balance puede expresarse como Ec (15.A):

$$Q = m\Delta H \quad \text{Ec. (15.A)}$$

Para los serpentines que son quienes transfieren el calor del vapor hacia el aire el balance se muestra de la siguiente manera:

Ecuación 15. Balance de calor requerido por aire y calor cedido por vapor

$$\text{Calor requerido por el aire } (Q_{\text{aire}}) = \text{Calor cedido por el vapor } (Q_v)$$

$$Q_{\text{aire}} = Q_v \quad \text{Ec. (16.A)}$$

donde cada calor es obtenido por:

Ecuación 16. Calor del aire

$$Q_{\text{aire}} = mC_p\Delta T|_{\text{aire}} + mC_p\Delta T|_{\text{agua}}$$

Ecuación 17. Calor de vapor

$$Q_v = m_{\text{vapor}}\Delta H_{\text{vap}}$$

Ya que con el balance que se realizó en la sección 5.1.1 se obtuvo la cantidad de calor requerida por el aire y en la **Ecuación 16** se está determinando que el calor requerido por el aire es la misma cantidad que la cedida por el vapor, se puede tomar el valor del calor requerido por el aire y de la ecuación del calor del vapor se despeja m_{vapor} para así poder obtener la cantidad de vapor requerido para calentar el aire que se utiliza en el secador de lecho vibrofluidizado:

Ecuación 18. Masa del vapor

$$m_{vapor} = \frac{\Delta H}{Q_{v\ vapor}}$$

donde:

ΔH : Entalpía del vapor

$Q_{v\ vapor}$: Calor latente de vaporización

Es importante mencionar que el secador opera en los tres turnos que tiene la planta, es decir, 24 horas al día y su producción es de 300 días al año. Cálculos que son requeridos para obtener la cantidad de vapor producido en toneladas por año.

5.1.3 BALANCE DE MASA Y ENERGÍA PARA OTROS SERVICIOS DE LA PLANTA

Adicional al consumo del vapor para el secador de lecho vibrofluidizado, se tienen otros servicios dentro de la planta los cuales requieren el calentamiento de agua, por lo que se realizó un balance de energía similar al mostrado en la *¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.*, quedando de la siguiente manera:

Ecuación 19. Balance de calor requerido de agua y calor cedido del vapor

$$\text{Calor requerido por el agua } (Q_{agua}) = \text{Calor cedido por el vapor } (Q_v)$$

$$Q_{agua} = Q_v$$

donde cada calor es obtenido por:

$$Q_{agua} = m_{agua} C_p \Delta T |_{agua}$$

$$Q_v = m_{vapor} (1.05 + 1.88 H_{vap}) \Delta T$$

Esta ecuación es equivalente a la anteriormente utilizada pero para este caso en particular se debe a que es una derivación de la fórmula y es utilizada específicamente para el sistema agua-vapor.

donde:

m_{agua} = Cantidad de agua (300 kg/h)

C_p = Capacidad calorífica del agua a temperatura ambiente (1 cal/ g°C)

ΔT = Cambio de temperatura del agua (30°C)

H_{vap} = Entalpía de vaporización a 7 kg/cm² de presión (2,068.57 kJ/kg)

ΔT = Cambio de temperatura del vapor (34.2°C)

Se realiza la igualdad despejándose el valor de la cantidad de vapor requerido.

$$m_{vapor} = \frac{(1.05 + 1.88H_{vap})\Delta T}{Q_v}$$

Tomándose en cuenta que este servicio es utilizado 70 días al año, y se obtiene en cantidades de toneladas al año.

5.2 ANÁLISIS ECONÓMICO

Para poder comparar ambas opciones del suministro de vapor; mediante el uso de las calderas y la línea de vapor, se hizo una evaluación para de cada una de las opciones, dependiendo de sus necesidades y los gastos que cada una incurriría.

5.2.1 CALDERAS

Debido a que las calderas ya se están utilizando desde hace más de 30 años en la planta de DuPont®, se recopiló la información del costo de éstas:

- Mantenimiento
- Salario de calderistas
- Costo del combustible
- Monitoreo de los gases de combustión

Con los cuales se calculó cuánto se gasta anualmente con ellos.

5.2.2 LÍNEA DE VAPOR

La instalación de la línea de vapor suministrada por un tercero es una posibilidad, por lo que se realizó su evaluación económica y técnica. Desde el punto de vista económico, para tener un mejor análisis de la conveniencia de la inversión a evaluar, se realizó mediante un flujo de efectivo con el cual se muestra el ahorro que se obtendría si se opta por esta opción. El flujo de efectivo permite ver donde se está ganando o gastando el dinero en un periodo a otro. (Seider, Seader, & Lewin, 2009)

Este estado financiero incluye tres diferentes flujos:

- Flujos operativos: están relacionados al día a día de la empresa (salarios, materia prima, ventas, gastos, etc.)

- Flujo de inversión: es la adquisición o venta de un activo fijo (compra venta de maquinaria, equipos, patentes, etc.)
- Flujo de financiamiento: son las transacciones de deuda y capital (deudas, aumento en capital, préstamos, etc.)

Siendo el flujo neto de efectivo un indicador de la cantidad de efectivo que tiene la empresa disponible para los accionistas y para pagar sus inversiones en activos fijos y variables. Este es obtenido con la *¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.* **Ecuación 20:** (Briseño, 2006)

Ecuación 20. Flujo de Efectivo

$$FE = Utilidad neta + Depreciación (cargos que no son efectivos)$$

Cuando se toma la decisión de realizar o no una inversión se debe realizar un análisis para determinar si el proyecto es rentable y si es la mejor alternativa que se tiene, se puede determinar si este proyecto generará el mejor rendimiento o si la recuperación de la inversión está dentro de lo aceptable.

El valor presente neto es un valor que resulta de la diferencia de la inversión inicial y los flujos descontados con una tasa de rendimiento mínima esperada, la cual es una tasa de rendimiento para ver si se cumplen las expectativas del proyecto. Esta tasa puede ser representada por la tasa de inflación.

De obtener un valor igual a 0 esto quiere decir que se están cumpliendo las expectativas del proyecto ya que la tasa de rendimiento mínima es aceptada. De ser mayor a cero, quiere decir que no solo se cumple la tasa de rendimiento mínima, si no que se generará un excedente, por lo que si se tiene un valor negativo, se debe rechazar el proyecto, ya que no está cumpliendo las expectativas del proyecto. La **Ecuación 22** muestra como debe ser obtenido el valor presente neto:

Ecuación 21. Valor Presente Neto

$$VPN = \frac{FLE_1}{(1+TREMA)^1} + \frac{FLE_2}{(1+TREMA)^2} + \frac{FLE_3}{(1+TREMA)^3} \dots + \frac{FLE_n+VR}{(1+TREMA)^n}$$

donde:

FLE_n = Flujo libre de efectivo

$TREMA$ = Tasa de Rendimiento Mínima Aceptada

VR = Valor de Rescate

n = Número de periodos

El valor de rescate es la cantidad de dinero que es recuperado al momento de vender los activos que fueron invertidos al inicio del proyecto, este valor sólo se toma en cuenta con fines de evaluación en un proyecto, ya que si no es considerado se estaría asumiendo que los activos quedan abandonados y dejan de ser productivos. Este valor es obtenido con la siguiente expresión:

Ecuación 22. Valor de rescate

$$VR = (\text{Activos totales} - \text{Flujo del último periodo}) - \text{Pasivos totales}$$

La tasa interna de retorno es la tasa de descuento a la que el VPN es igual a cero, si esta es mayor a la TREMA debe ser aceptado el proyecto, ya que significa que el rendimiento de la empresa es mayor al mínimo esperado, una TIR alta significa que se están teniendo flujos altos en relación a la inversión, haciendo a la inversión rentable. Para su obtención se hace la **Ecuación 22. Valor de rescate** y hacer prueba y error variando el valor de TREMA hasta obtener el valor igual a cero.

El análisis de flujo de efectivo ayuda a definir el desempeño económico de una empresa de manufactura, la cual depende de las ganancias y pérdidas de dinero a lo largo de la vida del proyecto. No considera únicamente el factor del tiempo si no también incluye la depreciación y otros subsidios que deben ser considerados.

La depreciación vista de forma tradicional es tratada como un gasto de manufactura, sin embargo, esta termina regresando a los inversores de la misma forma después de los impuestos. La depreciación es limitada a un total no mayor que la original total inversión de capital.

Normalmente para decidir si una opción de inversión para un proyecto es conveniente y atractiva se habla de tres diferentes términos:

- **TIR tasa interna de retorno:** puede ser visto como un simple índice de tiempo de la utilidad ya que depende de cuando se realiza la inversión y cuando se realizan los ingresos.
- **DFE Flujo de efectivo descontado:** este es utilizado para reflejar el interés directo en la inversión, por lo que es práctico para la comparación con otras posibilidades de inversión.
- **VPN Valor presente neto:** el cual indica el valor de las ganancias que se tienen en ese momento en particular.

6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 BALANCE DE MATERIA Y ENERGÍA

6.1.1 BALANCE DE MASA Y ENERGÍA DEL AIRE EN EL SECADOR

El balance para la obtención de cantidad de flujo de aire, y el calor que es requerido se realizó en una plantilla de Excel, se separaron las tres diferentes zonas del secador como se muestra en el **ANEXO V**.

En la **Figura 10** se muestran las variables conocidas del sistema, mientras que en la **Figura 11** se muestran los datos que se obtuvieron con los balances.

Tabla 10. Variables conocidas del sistema. Datos de Dupont® obtenidos en Julio 2017

Variables conocidas	Zona		
	#1	#2	#3
X_I (kg _{agua} /kg _{sólidoseco})	0.17	0.1	0.04
X_O (kg _{agua} /kg _{sólidoseco})	0.1	0.04	0.01
Y_I (kg _{agua} /kg _{aireseco})	0.0115	0.0115	0.0115
$T_{I-Sólido}$ (°C)	20	35	55
$T_{O-Sólido}$ (°C)	35	55	70
T_{I-Aire} (°C)	100	100	100
T_{O-Aire} (°C)	30	60	90
S_I (kg _{sólido} /h)	300	300	300
S_O (kg _{sólido} /h)	300	300	300

Tabla 11. Variables desconocidas del sistema

Variables desconocidas	Zona		
	#1	#2	#3
Y_O (kg _{agua} /kg _{aireseco})	0.0396	0.0272	0.0153
G_I (kg _{aire} /h)	747.618	1146.149	2341.743
G_O (kg _{aire} /h)	747.618	1146.149	2341.743

Finalmente, en la *¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.*2 se muestran los resultados que se buscaban con el balance de masa y energía del secador, como lo son; la cantidad de aire requerido para poder secar los 300 kg de sólido/ hora que son suministrados al secador, la cantidad de vapor que debe ser generado para calentar dicho flujo de aire y la cantidad de energía requerida para el sistema.

Tabla 12. Resultados de balance de masa y energía

Flujo total de aire (kg/h)	4,235.51
Energía para llevar de 25 a 100°C (kJ/h)	445,430.71
Energía requerida para evaporar el agua (kJ/h)	216
Flujo de vapor requerido (ton al año)	1,552.099

6.1.2 DETERMINACIÓN DE LA ENERGÍA DISIPADA POR EL SECADOR

El secador al no ser 100% hermético, trasfiere cierta cantidad de energía hacia el medio ambiente, para su cálculo se consideró el calor convectivo que se tiene desde el seno del secador, es decir, el centro de éste hacia la pared de secador, al cual se le sumo el calor conductivo que es disipado a través de la pared.

Convección

Para el calor convectivo se realizó un balance distinto en cada zona del secador ya que las corrientes de aire y temperaturas a la salida de cada cámara son diferentes. A continuación se muestran las diferentes tablas con los resultados obtenidos.

En la **Tabla 13** se tienen los valores de las diferentes zonas, para la obtención del número Reynolds y Prandl. Los siguientes datos se obtienen a la temperatura de 100°C del aire.

Tabla 13. Datos del aire a 100°C. Datos de Dupont® obtenidos en Julio 2017. Propiedades del aire a 100°C de "Perry's Chemical Engineer's Handbook" R. Perry, 6ª Edición.

Datos	
Zona #1, 2 y 3	
De (m)	0.761
ρ (kg/m ³)	0.935

μ (Pas)	2.17×10^{-05}
A (m ²)	1.236
C _p (J/kgK)	1.01×10^{03}
K _T (W/mK)	3.17×10^{02}
Pr	0.69

Tabla 14. Datos variables de cada zona del secador

	Datos		
	Zona		
	#1	#2	#3
u (m/h)	646.709	991.448	2025.666
G (kg/h)	747.618	1146.150	2341.743

Tabla 15. Resultados del número Reynolds

Re	Resultados		
	Zona		
	#1	#2	#3
	5,888.97	9,025.12	18,439.58

Posteriormente, se obtuvo el número Nusselt, con el cual se puede obtener el valor del coeficiente de convección:

Tabla 16. Resultados número Nusselt y coeficiente de convección

Nu _{De} h (W/m²K)	Resultados		
	Zona		
	#1	#2	#3
	20.19	28.42	49.4
	0.84	1.18	2.06

Finalmente, tomando en cuenta las temperaturas de entrada y salida del aire en cada una de las zonas, se obtuvo la temperatura media logarítmica, con la cual ya se podría obtener el calor convectivo en cada una de las zonas.

Tabla 17. MLDT de cada zona

	Datos		
	Zona		
	#1	#2	#3
$T_{\text{EntradaAire}} (^{\circ}\text{C})$	100	100	100
$T_{\text{SalidaAire}} (^{\circ}\text{C})$	20	35	55
MLDT (K)	318.29	306.08	292.73

Con los datos previos, se utilizó la **Ecuación 9. Calor convectivo**, obteniéndose el total de calor por convección:

Tabla 18. Calor total convectivo

	Resultados		
	Zona		
	#1	#2	#3
Q (kJ/h)	0.00009	0.000124	0.000206
Q_{TotalConvección} (kJ/h)			0.000423

Conducción

Mientras que para el calor disipado por conducción se utilizó la ley de Fourier. En la cual se requerían los siguientes datos:

Tabla 19. Datos para calor conductivo

Datos	
$k(\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C})$ (Perry, 1984)	17
$A_{\text{zona}}(\text{m}^2)$	1.24
ΔZ (m)	0.0508
T_a ($^{\circ}\text{C}$)	95
T_b ($^{\circ}\text{C}$)	20

Obteniéndose la temperatura media logarítmica, y el calor total por conducción:

Tabla 20. Calor total por conducción

Resultados

MLDT (°C)	48.13
$Q_{\text{por zona}}$ (kJ/h)	0.00553
$Q_{\text{totalConducción}}$ (kJ/h)	0.0166

Por lo que si se regresa a la **Ecuación 6. Calor total de disipación** se obtiene el calor total disipado en el secador:

$$Q_{\text{total}} \text{ (kJ/h)} = 0.01702$$

6.1.3 BALANCE DE MASA Y ENERGÍA PARA OTROS SERVICIOS DE LA PLANTA

La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.21** muestra los valores que se tenían para este sistema:

Tabla 21. Datos para calentamiento del agua

Datos	
Vapor	
H (kJ/kg)	2,069
ΔT (°C)	34.197
Agua	
m (kg/h)	300
C_p (cal/ g°C)	1
ΔT (°C)	30

La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra los resultados de este balance:

Tabla 22. Resultados de calentamiento del agua

Resultados	
Q_{agua} (cal/h)	9,000,000
Q_{agua} (kJ/ h)	37,600,000
Q_{vapor} (kJ/ h)	19,994,833.87
m_{vapor} (kg/h)	282.598

Por lo que a partir de ambos requerimientos de vapor; para el secador de lecho vibrofluidizado; 1,552.098, y los otros servicios de la planta que requieren del calentamiento de agua; 282.598, y con la consideración que la pérdida de calor por la

disipación que se lleva a cabo dentro del secador es mínima; se concluye que se requiere un total de **1,834.697** toneladas de vapor al año.

6.2 CALDERAS

6.2.1 EVALUACIÓN DE CALDERAS

La evaluación de las calderas se dividió en dos secciones; primero se tomó en cuenta el ámbito técnico, en el cual se evaluaron todos los requerimientos que tienen las calderas para su operación y mantenimiento, de igual forma se consideró qué medidas se tienen para resguardar su seguridad. Posterior a este análisis se realizó el segundo análisis, el cual fue económico.

En el **ANEXO VI** se muestra el layout de la caldera.

Mantenimiento

El mantenimiento de las calderas consta de diferentes tratamientos que se les realizan, primeramente está el tratamiento que se le da al agua que es utilizada para la generación del vapor, el cual es extensivo debido a que se busca incrementar la pureza del agua, asegurando una alta efectividad en la producción de vapor saturado.

El tratamiento consta de tres diferentes etapas; tratamiento interno, la de depuración del exceso de oxígeno y el tratamiento de los condensados, todos con el fin de evitar la corrosión del material de la caldera, formación de depósitos en el fondo de éstas y tener una transferencia de calor óptima.

En la cámara de agua de las calderas se puede presentar corrosión por picaduras debidas al oxígeno que se encuentre disuelto en el agua de alimentación, por lo que es importante hacer uso de los de aireadores, los cuales reducen la cantidades del oxígeno cerca de 7ppb, al igual que el acondicionador de oxígeno para controlar sus cantidades.

La revisión periódica de las calderas es mandataria para encontrar que estos componentes se encuentren por debajo de sus límites.

Las calderas también pueden presentar corrosión en la cámara de gas, estas pueden ser por diferentes razones; ataque por cantidades significativas de ácido sulfúrico en la tubería, cabezales, etc. Esto se da cuando la temperatura del gas de combustión es enfriada al punto de Rocío (menor a 270°F), por lo que al realizar el mantenimiento o las revisiones periódicas de esta cámara, se tiene que considerar que sea realizada de manera rápida ya que si no al ser enfriada, provoca corrosión dentro de la cámara.

Seguridad

Mientras que para la seguridad de las calderas por experiencias previas, ya se tienen ciertos estándares los cuales ayudan a la prevención de incidentes, menores y mayores.

Primeramente es importante determinar las distancias adecuadas que deben existir entre la ubicación de las calderas con respecto a las unidades de producción que podrían ser afectadas si estas llegarán a tener una explosión, se deben tomar medidas para minimizar el potencial e impacto de cualquier posible explosión por ellas, y evitar cualquier contacto con sustancias tóxicas.

Como riesgos principales por la combustión y generación de vapor son los fuegos, explosiones y quemaduras, debido a contacto con superficies calientes o lesiones por impacto debido a la falla de las partes a presión o componentes de la tubería.

DuPont® cuenta ya con estándares y procedimientos con los cuales regulan qué medidas deben tener para asegurar el funcionamiento apropiado de las calderas con el menor número de riesgos. Ya que la sustancia que se trata en las calderas es el vapor saturado, y es tratado en un recipiente a alta presión, se pueden llegar a tener una gran cantidad de energía debido a la compresibilidad y las altas temperaturas a las que se opera. Es posible que se experimente un líquido hirviendo expandido por la explosión de vapor (BLEVE) si es que se tiene una falla en su contención. Volviéndose un peligro por la posibilidad de actuar como un proyectil.

Las calderas tienen distintos interlocks de seguridad, los cuales son importantes de mantener sus chequeos periódicos en forma, asegurando el funcionamiento de cada uno de ellos, todo con el fin de evitar incidentes y minimizar el riesgo de todos los peligros que pueden conllevar.

Todos los interlocks son importantes, pero cabe mencionar que se debe prestar mayor atención a los siguientes: en el quemador; se debe revisar que la chispa generada por el combustible y el oxígeno este en un ambiente con presión baja y que el suministro de combustible sea bien atomizado, siempre se debe tener en cuenta el tamaño de la flama que se mantiene. Para el combustible por su inflamabilidad cuenta con diferentes sistemas, todos atribuyen a la prevención de que el tanque de su almacenamiento sea expuesto, que el bombeo de este se realice con la fuerza necesaria y no excesiva, evitar exceso de aire dentro del cuerpo de la caldera, se debe mantener una temperatura constante por lo que se cuenta con válvulas que no permiten el decremento de la temperatura, asegurando la energía que calienta el vapor. De igual manera la presión y la cantidad a la que el combustible es suministrado debe ser regulado y controlado, al igual que su flujo.

Por otra parte se debe mantener controlado el nivel del agua, por lo que se tiene un interlock de bajo nivel de agua, con el fin de asegurarse que no se tenga poca agua, se

instalan dos interlocks, uno de nivel y otro de seguridad. Este es muy importante en las calderas ya que si el nivel de agua decrece el límite permitido, el cuerpo de la caldera se comienza a sobrecalentar, la cual la puede dañar, y si las temperaturas sobrepasan su temperatura de diseño, inclusive puede llegar a implosionar.

Finalmente, para el cuidado de las calderas se utiliza un sistema automático y controlado que incrementa o disminuye la cantidad de vapor que es generado, la cantidad de condensados que se tienen almacenados en los tanques, y la liberación de gases que son emitidos durante la combustión y su temperatura, con el fin de cumplir la normatividad*.

En los tanques de los condensados es importante el control de los flotadores al igual que la presión que se maneja dentro de estos. Se debe contar con una válvula de seguridad la cual, al detectar el exceso de presión éste desaloje el exceso.

En cuanto a los operadores es muy importante que ellos utilicen el equipo de protección personal que requieren para su manejo. En ocasiones se pueden llevar a cabo lavados con ácidos por lo que su planeación y manipulación debe ser hecha adecuadamente para que el personal evite todo tipo de contacto con los químicos.

El equipo de protección personal básico son las botas de seguridad, lentes, uso de mangas largas y caretas faciales. El operador debe tener cuidado en el área de la chimenea, ya que se exponen a un lanzamiento de carbón pulverizado, barrido de cenizas o escorias que estén sobre esta. (DuPont, 2017)

El operador puede estar expuesto a diferentes fuentes de fugas que generen quemaduras, éstas pueden ser: por fugas de vapor, por el contacto con el equipo que no esté propiamente aislado, emisiones inesperadas de vapor o de agua del sistema o de las válvulas de alivio, de venteo, trampas de vapor o drenes también son formas potenciales a ocasionar una lesión grave.

Las fugas previamente mencionadas, tendrían altas velocidades debido a la alta presión a la que está el sistema de la caldera, para combatir con algún tipo de fuga no se pueden utilizar guantes de algodón, poliéster o capas ligeras de ropa de Nomex ya que no serían suficientes, es más recomendable el uso de ropa con varias capas de Kevlar y Nomex, las cuales permiten el contacto directo con la fuga por 3-5 segundos y las quemaduras serían de 1er y 2º grado. [Standards Technical Network Contacts]

Económico

Para la parte económica de las calderas se tomaron dos factores importantes de éstas, primeramente el costo de su mantenimiento, el cual se hizo un breve análisis de los requerimientos de éstas y como segundo factor se tomó su vida útil.

Las calderas fueron adquiridas en el año de 1986, por lo que ya tienen aproximadamente 30 años de uso, a lo largo de los años para mantener la funcionalidad de las calderas, se ha cambiado el material refractario y su instrumentación, sin embargo, éstas ya están llegando al final de su vida útil.

De considerarse la compra de otra caldera, el costo sería aproximadamente \$250-300M USD, lo cual implica una fuerte inversión, y el costo de su operación seguiría siendo elevado.

Los mantenimientos se llevan a cabo mensualmente y semestrales representan el 0.004% del costo total anual de estos, el cual es mínimo.

En la *¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.* se muestra el desglose de gastos de las calderas, la primer columna muestra en que se está gastando, la segunda es el precio unitario de cada uno de los gastos, mientras que la última columna representa el costo de la cada descripción por año.

Tabla 23. Gastos anuales de las Calderas. Datos de Dupont® obtenidos en Julio 2017

DESCRIPCIÓN DE BIEN O SERVICIO	CANTIDAD	CALDERAS	
		PRECIO UNITARIO (USD)	TOTAL (USD)
Matto. Caldera mensual	12	\$ 288.889.00	\$ 3,466.67
Mtto. Caldera semestral	2	\$ 555.56	\$ 1,111.11
Diesel	70000L/año	0.83\$/L	\$ 58,333.33
Monitoreo de gases combustibles	1	\$ 527.78	\$ 527.78
Costo Fijo (Calderistas)	3	\$ 16,111.11	\$ 48,333.33
Calibración de válvulas	P/D		
Tratamiento Químico	P/D		
			\$111,772.22

6.2.2 RESULTADOS

En cuanto a la seguridad requerida en las calderas, se debe de contar con cierto número de equipos de seguridad para asegurar el funcionamiento correcto de éstas y así evitar cualquier accidente que se pueda generar.

Los operadores deben utilizar el equipo de protección personal básico, adicional careta y guantes debido al manejo del tipo de material, sin embargo, en caso de presentarse fugas de vapor, es requerido el incremento de protección tanto en el material del overol como en el grosor de los guantes, con el fin de evitar quemaduras mayores.

Los escenarios simulados reportan radios de afectación relativamente cortos, sin embargo dada la geografía circundante tienen el potencial de causar daño a equipos de proceso aledaño. El escenario de explosión de vapor reporta radios de afectación mayores que el escenario de explosión de diésel, inclusive si se hacen consideraciones adicionales sobre el grado de confinamiento de la explosión de diésel.

Las mayores zonas de alto riesgo y amortiguamiento obtenidas son de 26.4 y 44.1 metros respectivamente.

El mantener las calderas actuales implica costos elevados, principalmente por el consumo del combustible, el cual es diésel, ya que éste representa el 52% del gasto de las calderas, de igual forma los costos por operación, específicamente la mano de obra, representa el 42% del total de las calderas.

Mientras que el considerar la compra de un nuevo equipo el precio varía entre los 250-300M\$, por lo que representaría una inversión muy elevada para la planta. Cabe mencionar que los costos de operación para la caldera nueva seguirían siendo altos, y las medidas de seguridad tendrían que ser las mismas que para las actuales, por lo que el riesgo de su uso seguiría siendo elevado.

6.3 LÍNEA DE VAPOR

6.3.1 EVALUACIÓN DE LÍNEA DE VAPOR

Para la línea de vapor de igual forma se realizó una evaluación técnico económico, donde se obtuvo el arreglo que se requeriría para suministrar vapor de la empresa colindante a la planta, se evaluó la facilidad con la que ésta podría llevarse a cabo, las medidas de seguridad que se requeriría y el costo que tendría su instalación.

Se consideró la necesidad de la planta, la cual era encontrar la forma de obtener vapor mediante un tercero, la opción de recibir el servicio por la planta colindante partió al verse que la empresa vecina tenía un excedente de su producción de vapor. Por lo que se consideró la instalación de una conexión mediante tubería dónde la empresa colindante se haría cargo de la instalación de su línea hasta llegar a la batería de la de DuPont®, ahí se

conectaría el cabezal de la línea de vapor la cual se conectaría más adelante dentro de la planta con la tubería de suministro de vapor que alimenta al secador y los demás servicios requeridos para el suministro de vapor dentro de la planta. Siendo el layout de la trayectoria de la línea de vapor el que se muestra en el **ANEXO III**.

DuPont® es una empresa que cuenta con muchos estándares y procedimientos para diferentes tipos de proyectos, en este caso cuentan con uno para la instalación y ampliación de tuberías en la planta, inclusive tienen el tipo de material y las especificaciones a cubrir. Estos estándares se han creado a lo largo de los años de la empresa y se basan en normas universales, para esta se apoyan en la norma de la American Standard Institute y la American Society of Mechanical Engineers (ANSI /ASME) las cuales cuentan diferentes áreas soportando la características que se esperan tener en las instalaciones de las empresas, para este caso se basan en dos campos específicos:

- B31.1 (1989) Power Piping
- B31.3 (1990) Chemical Plant and Petroleum Refinery Piping

En las cuales vienen los requisitos para la instalación de tuberías en la planta.

La empresa que realizó el levantamiento para la línea de vapor considera estas normas, siendo las siguientes especificaciones las más importantes para su diseño:

- Presión de diseño: esta no puede ser menor a la presión en las condiciones más severas de presión y temperatura.
- Temperatura de diseño: es la temperatura del metal que represente la condición más severa de presión y temperatura, como en este caso cuenta con aislamiento externo, la temperatura de diseño para la tubería debe ser la máxima temperatura que lleve el fluido.
- Cargas por la presión de diseño: es la carga que se genere por la presión más severa, ya sea interna o externa. Las cargas pueden ser por peso (peso muerto, efectos locales debido a reacciones en los soportes, etc.), cargas dinámicas (efecto del viento, sísmicas, por impacto u ondas de presión; golpe de ariete, caídas bruscas de presión, etc.)
- Espesor de la pared: el mínimo de cualquier tubo que se verá sometido a cierta presión tanto interna como externa, el cual está en función del esfuerzo permisible para el material del tubo, también está en función de la longitud del tubo ya que esta influye en su resistencia al colapso del tubo.

Una vez seleccionados el diámetro adecuado, el material de la tubería y su espesor, se debe realizar la disposición económica de las tuberías para el nuevo sistema. Se realizó una evaluación de los posibles problemas a los que se enfrentaría, el tipo de soportes que ya se contaban en la planta o si se requerirían de nuevos.

Se tomó en cuenta la ubicación de los cabezales, del bypass, y de la accesibilidad que se tendría para darle mantenimiento a la tubería.

Como subproducto del transporte de vapor siempre se obtiene cierto porcentaje de condensado, con el apoyo de una calculadora de la Compañía Especialista en Vapor, se obtuvo la cantidad de condensados que se estarían obteniendo en este sistema. En el **ANEXO VII** se muestra el programa y la cantidad que se estaría obteniendo de éste, siendo 15.1392 kg/h la pérdida de vapor a lo largo de la tubería. Ésta cantidad de condensado que se perdería es considerado para la cantidad real que se estaría suministrando a la planta, por lo que se sumó éste porcentaje al requerido.

Seguridad

Se realizó un estudio de la ruta de las tuberías, para hacer su traza económica, se buscó minimizar los extremos muertos y bolsillos en el sistema, ya que esto dificulta el drenaje del sistema. Se maximizó el uso de los soportes existentes en la planta, con el fin de reducir el costo de soportería, se aseguró que la capacidad de carga fuera elevada, para que no tuviera problemas en sostener la nueva tubería.

Para la seguridad de la línea de vapor se tienen las mismas medidas que para la caldera, el mayor riesgo que se podría tener es fuga de vapor, o contacto directo con las tuberías, sin embargo, se aisló toda la tubería con fibra de vidrio de 1.5" para evitar incidentes de este tipo, y ya que sería un proyecto nuevo se esperaría no tener mayor desgaste en la tubería, de la misma forma se considera el mantenimiento a la tubería para mantenerla limpia.

Se realizó un análisis con las posibles variaciones que se podrían tener del suministro externo en comparación al que se obtiene mediante las calderas, y se anotó las observaciones que se tendría en cada caso.

Económico

Para la evaluación económica de la línea de vapor, primero se estimó un intervalo de inversión con el cual se pudiese cubrir el costo y poder llevar a cabo el proyecto de la instalación total de la línea.

Partiendo de la necesidad de la planta; la instalación de la línea de vapor hasta la batería de la planta, dónde se tendría la conexión con el cabezal de la línea de vapor de la empresa colindante, más las pertinentes consideraciones técnicas y de seguridad, es decir, qué tipo de material se requeriría para el transporte del vapor saturado, las necesidades de este material, los accesorios que se tendrían que colocar en la línea; para su manejo y seguridad, se solicitó a una empresa tercera que realizara el levantamiento de la línea de vapor, con todos sus requerimientos, para evaluar que costo tendría la instalación de la línea de vapor.

La información de la línea se muestra en *¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.* la cual se compartió con el proveedor externo para que pudiera hacer el levantamiento, el cual se muestra un breve resumen en el **ANEXO VIII**.

Posterior a la obtención del presupuesto que se tendría para el proyecto; \$ 40M USD, y la estimación del levantamiento para la instalación para la línea nueva de suministro de vapor, se contactó a la empresa colindante para que se diera la obtención de un aproximado del precio que se tendría el suministro de vapor por ellos. El precio que se obtuvo fue mediante una fórmula que tienen ellos para la producción de este insumo:

$$\$V = 225 + (3.189 * \$GJ)$$

Siendo

$\$V$ = Costo del vapor para venta en pesos por tonelada (sin IVA)

225 = Constante fija, la cual fue ajustada por términos de crédito, ésta incluye fijo de operación (mantenimiento, energía eléctrica, tratamiento de agua, depreciación y otros)

3.189 = Factor de consumo energético GJ de gas natural para producir 1 tonelada de vapor a 14 kg/cm² y 198°C, considerando una eficiencia teórica de 85%

$\$GJ$ =Costo de factura de gas del mes de Julio 2017 (5.2 USD))

Por lo que se hizo la consideración de la necesidad del consumo de la planta de un aproximado de 1,834.697 toneladas por año, sin embargo se tiene que considerar la pérdida que se tendrá cada hora por el porcentaje de condensados, anualmente se perderán 108 toneladas de vapor por condensado, cantidad que se le suma a la requerida por la planta, ya que se acordó que se facturaría el total suministrado, entonces se debe incluir el porcentaje de condensados para obtener el costo del vapor:

$$\$V = 523.49 \text{ por ton vapor}$$

El cual es representado en pesos.

Bajo la consideración de que se requieren 1,942.7 toneladas anuales, el costo total del suministro de vapor es de \$56.499M USD, tomando en cuenta los condensados previamente presentados.

Para todos los cambios de moneda entre dólares y pesos se estableció que la compra del dólar está a \$18MX.

Teniendo en cuenta estos datos, se realizó un análisis de la inversión para este proyecto, dónde se evaluó el tiempo que tomaría para tener la recuperación total de la inversión y validar la factibilidad de ésta.

Para complementar el análisis previo, se realizó un segundo análisis, donde se tomó en cuenta el gasto que tiene en la actualidad por el uso operativo de las calderas, al cual para hacer su comparación, se le resto el gasto implicado por el uso de la línea de vapor, éste

análisis se tomó a largo plazo, en el cual se demostró el ahorro que se tendría al hacer uso de este nuevo sistema.

Se elaboró una tabla que incluyera ambos factores; la inversión total del proyecto y el tiempo de recuperación, y el ahorro que se tendría por la sustitución de las calderas por la línea de vapor a lo largo de 10 años, con el fin de englobar ambos factores y demostrar el beneficio a largo plazo.

La tabla Costo- Beneficio está en el **ANEXO IX** el cual muestra el desglose de los factores, y con este se pudo determinar en cuanto tiempo se recuperaría la inversión inicial y validar la viabilidad del proyecto, ver la ganancia/ pérdida de éste, y así poder determinar si el proyecto es rentable.

A continuación se desglosa los factores incluidos en dicho flujo:

1. Gasto total de las calderas, el cual cubre la sumatoria del costo variable (utilidades; diésel) y sus costos fijos (mantenimiento y los costos operativos por mano de obra). Estos gastos se consideraron como el ahorro que ahora se generaría en la planta, ya que se dejarían de tener.
2. Posteriormente como costos variables para la línea de vapor se tiene el costo del vapor suministrado por la planta colindante, este puede variar dependiendo del costo del consumo de gas natural.
3. Para los costos fijos se hizo un aproximado del mantenimiento que se le requeriría dar a la línea de vapor, esta tendría que ser anualmente incluiría la limpieza de la línea de vapor, revisión de medidores, válvulas y manómetros.

Para todos los costos previamente mencionados se consideró que cada periodo se tendría un incremento de 3-5%, ya que este valor es el promedio de incremento de la inflación al año en México.

4. La depreciación no es obtenida directamente, ya que se obtuvo al realizar la multiplicación de la inversión inicial por un porcentaje que tiene DuPont ya establecido, éste es utilizado para todos los equipos comprados por ellos. El cual ya indica el porcentaje descontado por año, estos valores abarcan hasta los 6 años, posteriormente se consideró una depreciación variable y que va disminuyendo con los años para hacer un valor más real.
5. En cuanto a la tasa impositiva que la empresa utiliza, es del 38%
6. La Tasa Interna de Retorno fue obtenida mediante los ahorros obtenidos en el primer año, \$56.5M USD, comparándose contra la inversión. Por lo que se obtiene

una TIR del 27% mientras que la tasa de descuento o tasa de rendimiento mínima aceptada utilizada por DuPont® es del 12%

7. Finalmente se realizó el análisis de flujo de efectivo, con el que ya se obtuvo el flujo de efectivo descontado y el valor presente neto. Con estos también se podría ver el tiempo de recuperación de la inversión del proyecto.

6.3.2 RESULTADOS

La instalación de la línea de vapor es relativamente sencilla, debido a que no se requiere de un sistema muy elaborado, y para su operación también se puede manipular de manera sencilla y segura.

La seguridad de la línea de vapor también requiere de medidas contra instrumentación a altas temperaturas, se tiene que tener cierta atención en las condiciones de la línea para evitar rupturas y fugas de ésta. De tenerse fugas es importante contar con el equipo de protección personal necesario.

Para llevar a cabo el proyecto se cuenta con un presupuesto de 40M DLLS\$ los cuales de acuerdo al análisis y la evaluación que se realizó, se encontró que la inversión del proyecto sería recuperada tras el primer año de su instalación. Volviéndose un proyecto muy factible y conveniente para la planta.

También con la tabla de Costo-Beneficio y el flujo de efectivo se pudo obtener el valor presente neto el cual al final de los 10 años éste tiene la cantidad de 202.98M\$ haciendo rentable al proyecto. En cuanto a la TIR, ya que ésta es mayor que la tasa de descuento (27% > 12%) el proyecto es atractivo y aprobado.

Al ser comparados los gastos anuales que se tienen por parte de las calderas, contra el gasto del consumo con la línea de vapor se demuestra que aproximadamente se tendría el ahorro de 51M\$, siendo casi la mitad del costo de la caldera.

En la **Tabla 24** se muestra con mayor claridad los costos de cada valor previamente discutido y el porcentaje que representa en su total:

Tabla 24. Comparativa de costos y su ahorro

	\$ (Mil DLLS)	Teniéndose
Costo Operación de Calderas	111	46% de
Costo de Operación de línea de vapor	60.19	ahorro de
Ahorro	51	gastos actuales en las calderas

7 CONCLUSIONES

- El gasto total de para la operación de las calderas mostrado en la **Tabla 23. Gastos Anuales de la Caldera. Datos de Dupont® obtenidos en Julio 2017** resulta ser elevado debido a la suma del mantenimiento que se le debe de dar mensual y semestralmente, adicional al costo de operación el cual incluye el sueldo de los calderistas y el consumo de combustible.
- Tras ver los resultados del análisis realizado para la evaluación de seguridad de las calderas en el **ANEXO II. Simulación de incidentes mediante Phast** queda clara la importancia de mantener los instrumentos de instrumentos de seguridad con un funcionamiento adecuado, es decir, las válvulas de seguridad, alarmas e interlocks deben de operar satisfactoriamente, sin fallos y estén bien calibrados con el fin de evitar explosiones por caldera o por el tanque del combustible.
- Un punto relevante de la evaluación de seguridad de la caldera, surgió del análisis de consecuencias mostrado en el **ANEXO II. Simulación de incidentes mediante Phast**, dónde se pueden observar los efectos adversos a diferentes presiones que se tendrían tanto dentro como fuera de la planta, en caso de presentarse un evento de explosión en la caldera. Siendo de mayor impacto la explosión de la caldera a la del tanque de Diésel, esto debido a la capacidad de cada uno. Con el uso de la línea de vapor de un externo, la planta elimina la posibilidad de un evento de esta magnitud en sus instalaciones.
- Ambos sistemas requieren de mantenimiento, en la sección **6.2.1 Evaluación de Calderas** y en la sección **6.3.1 Evaluación de Línea de Vapor** se plantean las diferentes necesidades de mantenimiento para cada equipo, siendo el de las calderas más riguroso y exhaustivo, mientras que la línea de vapor puede tener mayor flexibilidad y no requiere de tratamientos químicos.
- Para la evaluación de seguridad que se realizó en la sección **6.2.1 Evaluación de Calderas** y en la sección **6.3.1 Evaluación de Línea de Vapor**, un factor a cuidar para

ambos casos es la temperatura del vapor saturado que se maneja, ya que de no ser aislado de manera adecuada se tendría contacto con la superficie caliente, y de tenerse fugas del vapor también se expondría el personal a quemaduras.

- Con respecto a la evaluación económica, tras haber realizado un análisis de costo beneficio mostrado en el **ANEXO IX. Tabla Costo Beneficio**, el cual considera varios factores; como el costo del combustible (diésel), el costo de mano de obra (calderistas), el tratamiento químico del agua, el mantenimiento del equipo, y otros servicios menores, se encontró que, con el uso de la línea de vapor suministrado por un tercero, y dejar de tener estos costos asociados a la operación de la caldera, el gasto por el uso de vapor para la planta se reduce en un 46%, siendo los principales factores de ahorro para la planta el eliminar el consumo de diésel (\$58,333 USD) y la mano de obra (\$48,333 USD). Por lo tanto la línea de vapores una alternativa atractiva desde el punto de vista económico.
-
- Analizando y englobando todos los factores previamente mencionados, se concluye que para el consumo de 1,552.09 de toneladas de vapor al año para el uso del vapor saturado el cual es utilizado para el secador de lecho vibrofluidizado y los 282.59 toneladas de vapor que son utilizados en los otros servicios de la planta, el proyecto de la instalación de la línea de vapor que se conectaría a la planta colindante es rentable, aún con la consideración de las 108 toneladas de consumo extra por la pérdida de condensados, ya que la recuperación de la inversión se llevaría a cabo en un año, se aseguraría el suministro de vapor requerido, de igual forma el mantenimiento y la operación de ésta es más económico y sencillo al igual que las medidas de seguridad requeridas por las calderas, haciendo este proyecto rentable y conveniente para la planta.

- Analizando y englobando todos los factores antes mencionados, se concluye que para el consumo de 1,552.09 de toneladas de vapor al año para el uso del vapor utilizado para el secador de lecho vibrofluidizado y los 282.59 toneladas de vapor que son utilizados en los otros servicios de la planta, el proyecto de la instalación de la línea de vapor que se conectaría a la planta colindante es rentable, aún con la consideración de las 108 toneladas de consumo extra por la pérdida de condensados, ya que la recuperación de la inversión se llevaría a cabo en un año, se aseguraría el suministro de vapor requerido, el mantenimiento y la operación de ésta es más económico y sencillo al igual que las medidas de seguridad requeridas por las calderas, haciendo este proyecto rentable y conveniente para la planta.

8 BIBLIOGRAFÍA

- Scribd*. (2012). Recuperado el Julio de 2017, de <https://www.scribd.com/document/99543678/Guia-para-el-diseno-de-tuberias-ASME-B31-3>
- ASHRAE*. (2017). Recuperado el 12 de Agosto de 2017, de <https://www.ashrae.org/>
- Compañía Especialista en Vapor TLV*. (2017). Recuperado el Julio de 2017, de <http://www.tlv.com/global/LA/steam-theory/types-of-steam.html>
- DuPont*. (2017). Recuperado el Agosto de 2017, de <http://www.dupont.mx/>
- Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas. Universidad de Chile*. (2017). Recuperado el Junio de 2017, de <http://operaciones.ciq.uchile.cl/PDF/QF/clases/SECADO%20Y%20ACONDICIONAMIENTO%20DE%20AIRE.pdf>
- Manual de Operación de Calderas DuPont. (2017). Toluca.
- Occupational Safety and Health Administration*. (2017). Recuperado el Junio de 2017, de <https://search.osha.gov/search?affiliate=usdoloshapublicwebsite&query=boilers>
- Progressive Energy Services*. (2017). Recuperado el Agosto de 2017, de http://www.pesint.com/files/sist_dist_v.pdf.
- Crane. (1987). *Flujo de Fluidos en válvulas, accesorios y tuberías* (Primera ed.). Estado de México: McGraw-Hill.
- Hill, K. (2006). *ATCP Chile*. Recuperado el Junio de 2017, de http://www.atcp.cl/privado/docs/revistas/1/Rev_159163323931.pdf
- Kern, D. Q. (2013). *Procesos de Transferencia de Calor* (Cuadragésima cuarta ed.). México: McGraw-Hill.
- Kudra, T., & Mujumdar, A. (2009). *Advanced Drying Technologies*. Recuperado el Junio de 2017, de <http://197.14.51.10:81/pmb/AGROALIMENTAIRE/Advanced%20Drying%20Technologies.pdf>
- McCabe, W., Smith, J., & Harriot, P. (2007). *Operaciones unitarias en ingeniería química* (Séptima ed.). México: McGraw-Hill.
- Perry, R. H. (1984). *Perry's Chemical Engineers Handbook* (Sexta ed.). Singapur: McGraw-Hill.
- Puskar, J. (2010). *National Board*. Recuperado el Junio de 2017, de <http://www.nationalboard.org/Index.aspx?pageID=164&ID=439>
- Seider, W., Seader, J., & Lewin, D. (2009). *Product and Process Design Principles* (Tercera ed.). WILEY.
- Treybal, R. E. (1981). *Mass-transfer operations*. Singapore: McGraw-Hill.

9 ANEXOS

9.1 ANEXO I: SECADOR



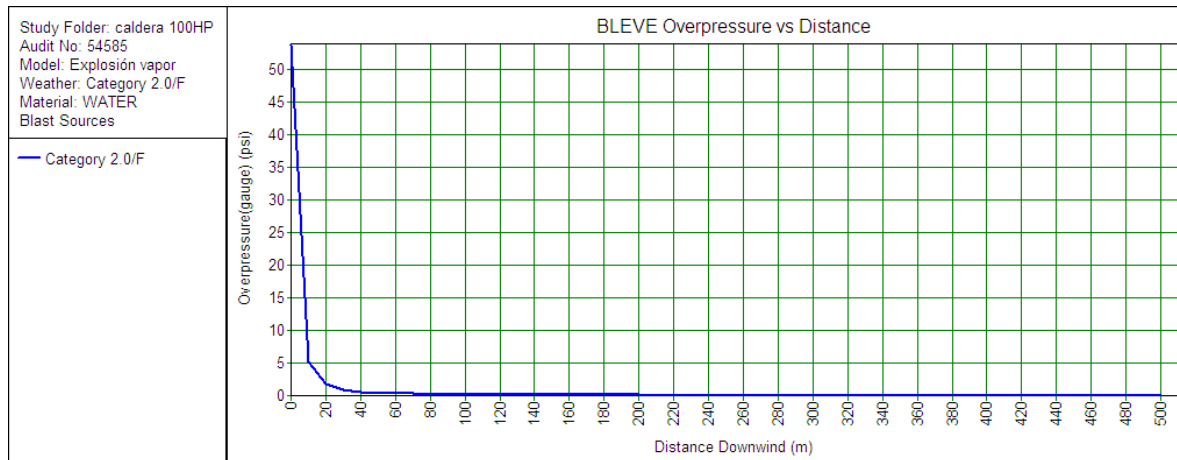
9.2 ANEXO II: SIMULACIÓN DE INCIDENTES MEDIANTE PHAST

Explosión de la caldera:

Para el primer escenario se reportó que la explosión podría generar zonas de alto riesgo y de amortiguamiento de 26.4 y 44.1 m, respectivamente. También se podría dañar equipo de proceso en un radio de 14.3 m.

Cuando se trata de una presión de 0.5 psi la zona de afectación es únicamente dentro del cuarto de calderas. Cuando se simuló el contorno de 1 psi, se pueden derribar muros alcanzando edificios cercanos, representando un riesgo al personal. Finalmente a 3 psi se pueden romper ventanas, representando un peligro para los operadores que trabajen y también para la empresa vecina que se encuentra al oeste.

Primer escenario



Explosión de Diésel

El segundo escenario es considerando la explosión generada por el combustible, ésta generaría zonas de alto riesgo y amortiguamiento de 4.7 y 7.7 m, respectivamente. También se podría dañar equipo de proceso en un radio de 2.3 m.

En este caso se tienen niveles de sobrepresión relativamente elevados que disminuyen pronto y prácticamente a partir de los 20 metros dejan de representar un problema. Sólo el equipo muy cercano tendría potencial de ser afectado, para tener un mejor resultado se corrió un tercer escenario, con las condiciones anteriores pero con el modelo de Explosión de Multienergía el cual permite incorporar factores de confinamiento que modifican proporcionalmente el cálculo de las sobrepresiones y se encontró que las zonas de alto riesgo y amortiguamiento incrementó el radio de afectación; se tuvieron resultados de 7.1 y 12.9 m, respectivamente, con posibilidad de dañar equipo de proceso en un radio de 3.2 m.

En este escenario se ve que los radios de afectación aumentaron un poco, sin embargo, a 1 psi sólo dañaría a la otra caldera y al equipo dentro del cuarto de calderas.

Ya que la cantidad de diésel considerada en la explosión para este escenario está relacionada con el tiempo de barrido previo al encendido de la caldera, por lo que se corrió una cuarta simulación dónde se consideró el caso extremo con un excedente de diésel la cual sería igual a 15 segundos, duración máxima del barrido, se obtuvo que se tendrían zonas de alto riesgo y amortiguamiento de 10.2 y 18.6 m, así como daño a equipo de proceso en un radio de 4.6 m.

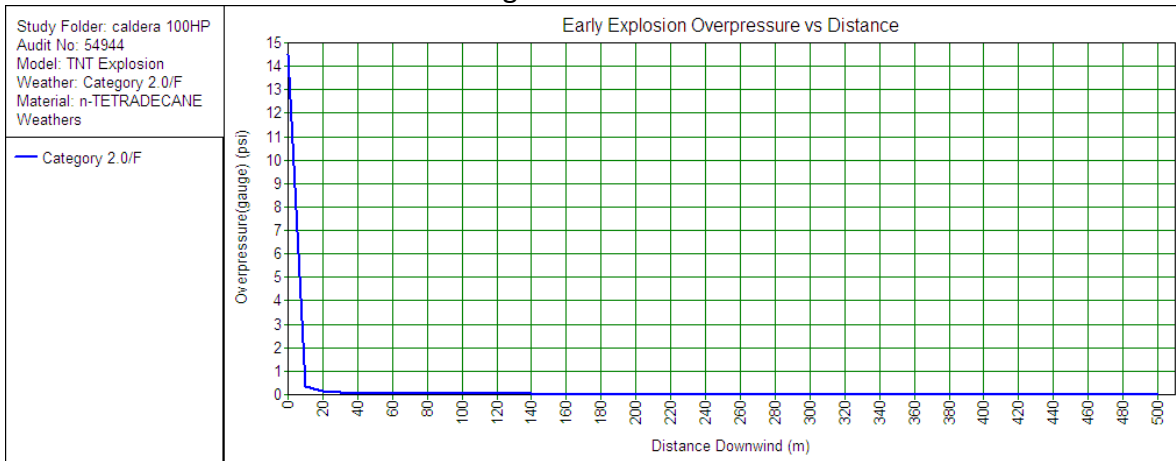
Nuevamente con esta suposición el contorno de 1 psi sigue sin alcanzar a los edificios cercanos por lo que se sigue asumiendo que esta explosión afectaría equipo dentro del cuarto de calderas.

Sin minimizar el riesgo, se entiende debe tener en cuenta que el diésel es inflamable, pudiendo generar un incendio, es importante contar con sistemas de inspección y mantenimiento que garanticen que un evento así no ocurra, incluyendo alarmas que impidan el encendido de la caldera si hubiera vapores de diésel.

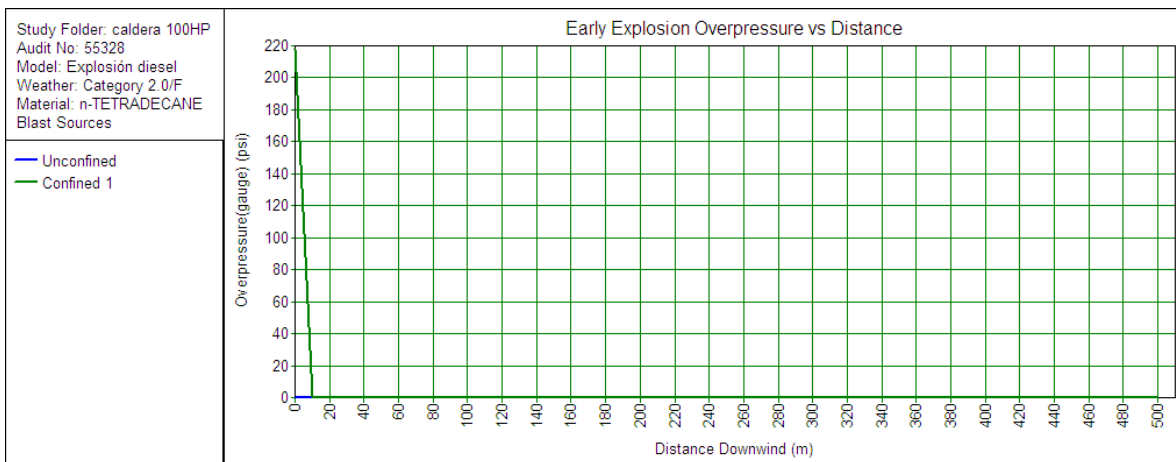
Al igual que con el escenario anterior es conveniente revisar que los equipos y edificios cercanos puedan resistir los niveles de sobrepresión a que pudieran verse expuestos.

Finalmente, se requeriría saber la cantidad de diésel que provocaría una explosión con afectación a los edificios de los alrededores y que tengan potencial de rebasar límites de la propiedad para que con esa cantidad, se determinen acciones preventivas que impidan que tal liberación pueda darse.

Segundo escenario

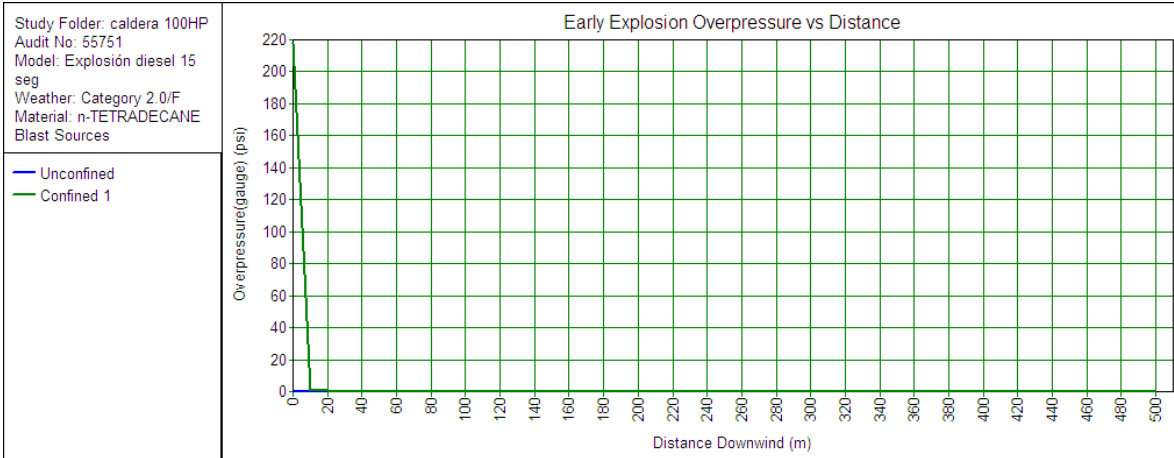


Tercer escenario

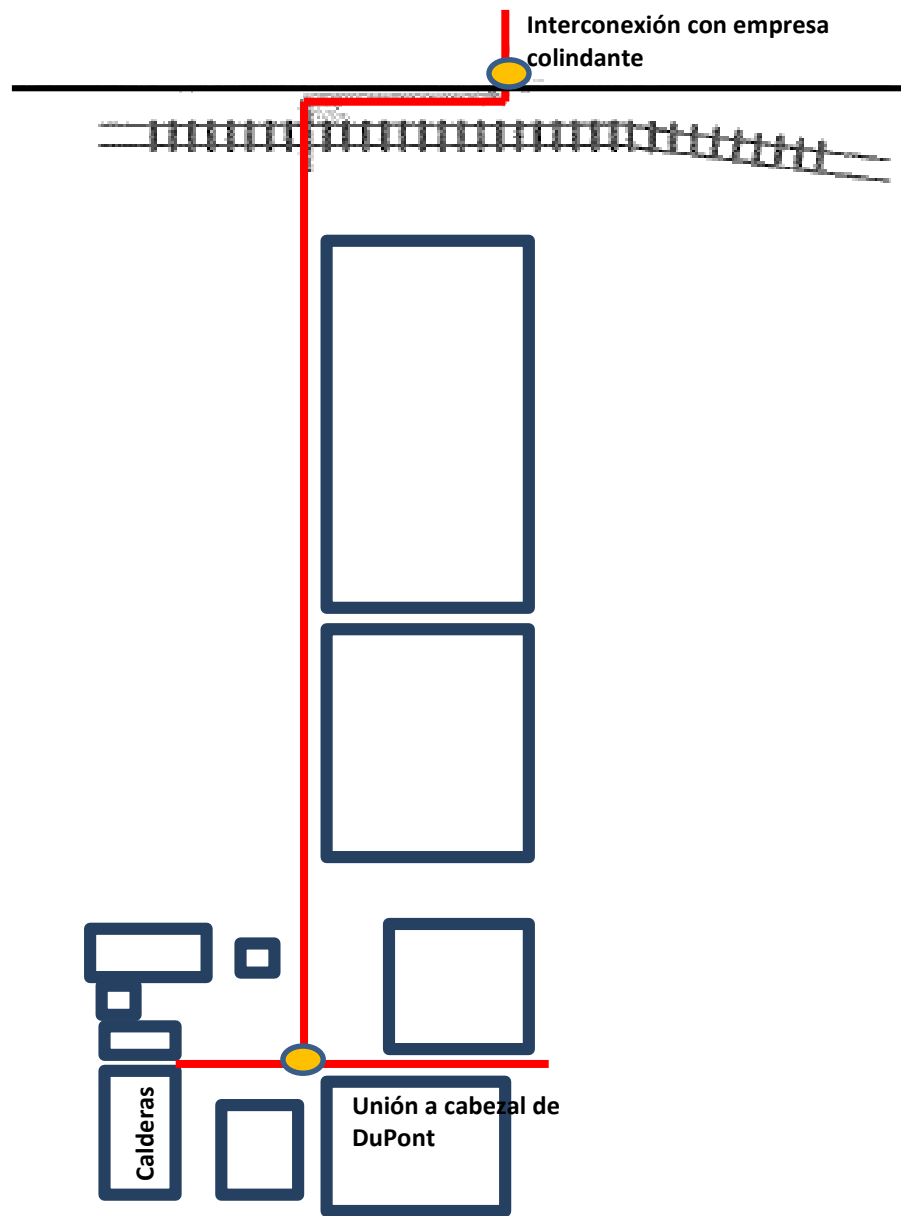




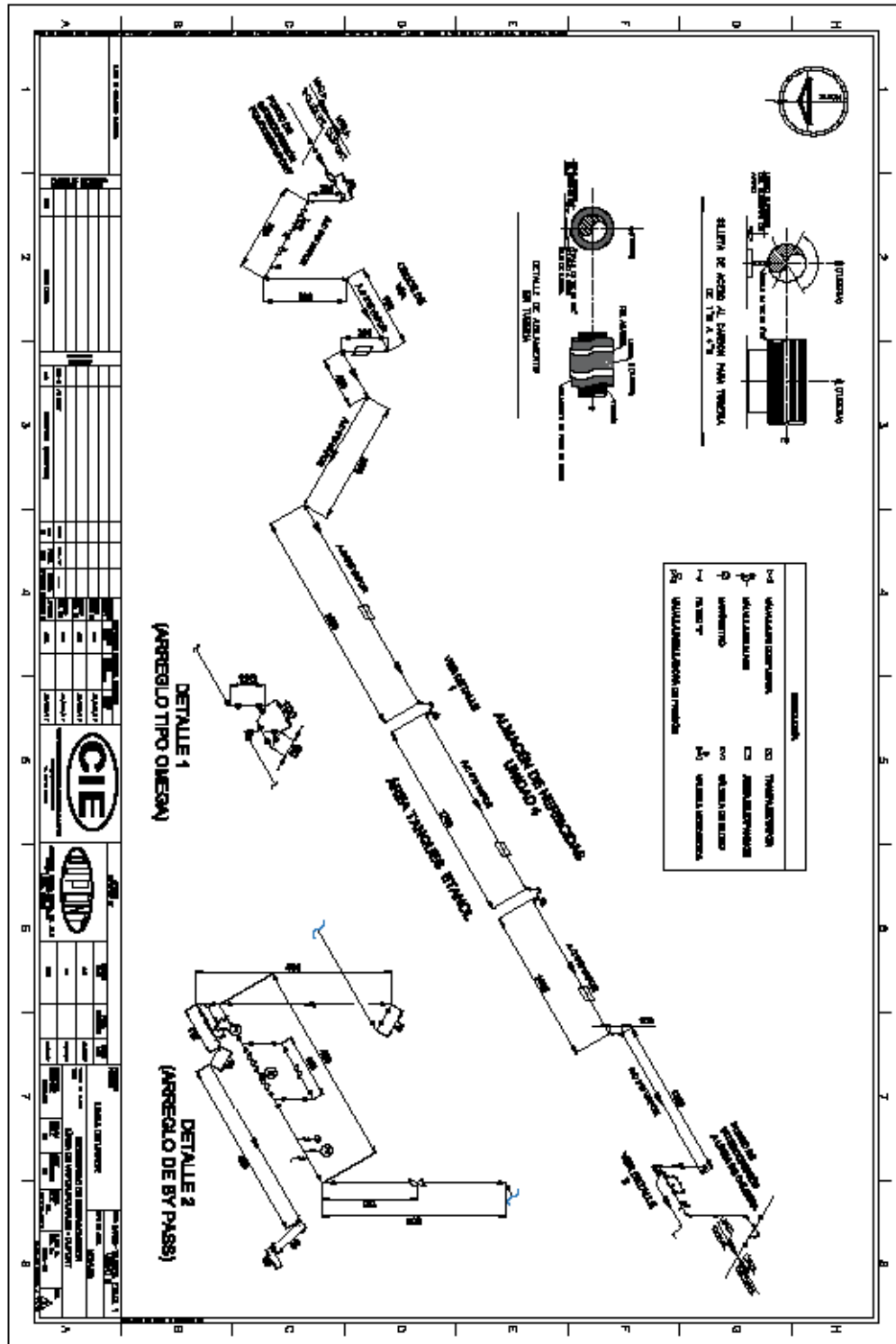
Cuarto escenario



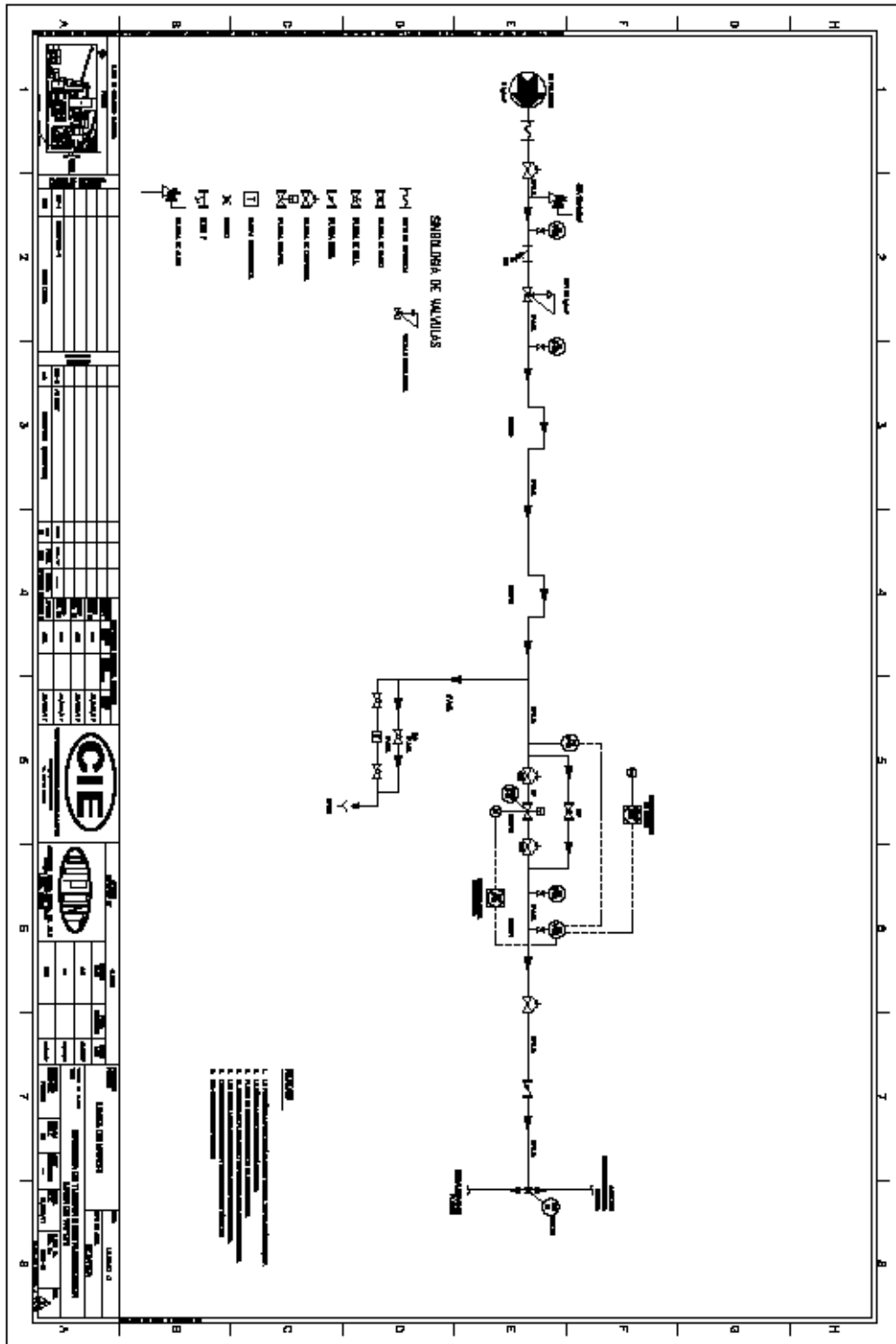
9.3 ANEXO III: LAYOUT LÍNEA DE VAPOR EN PLANTA



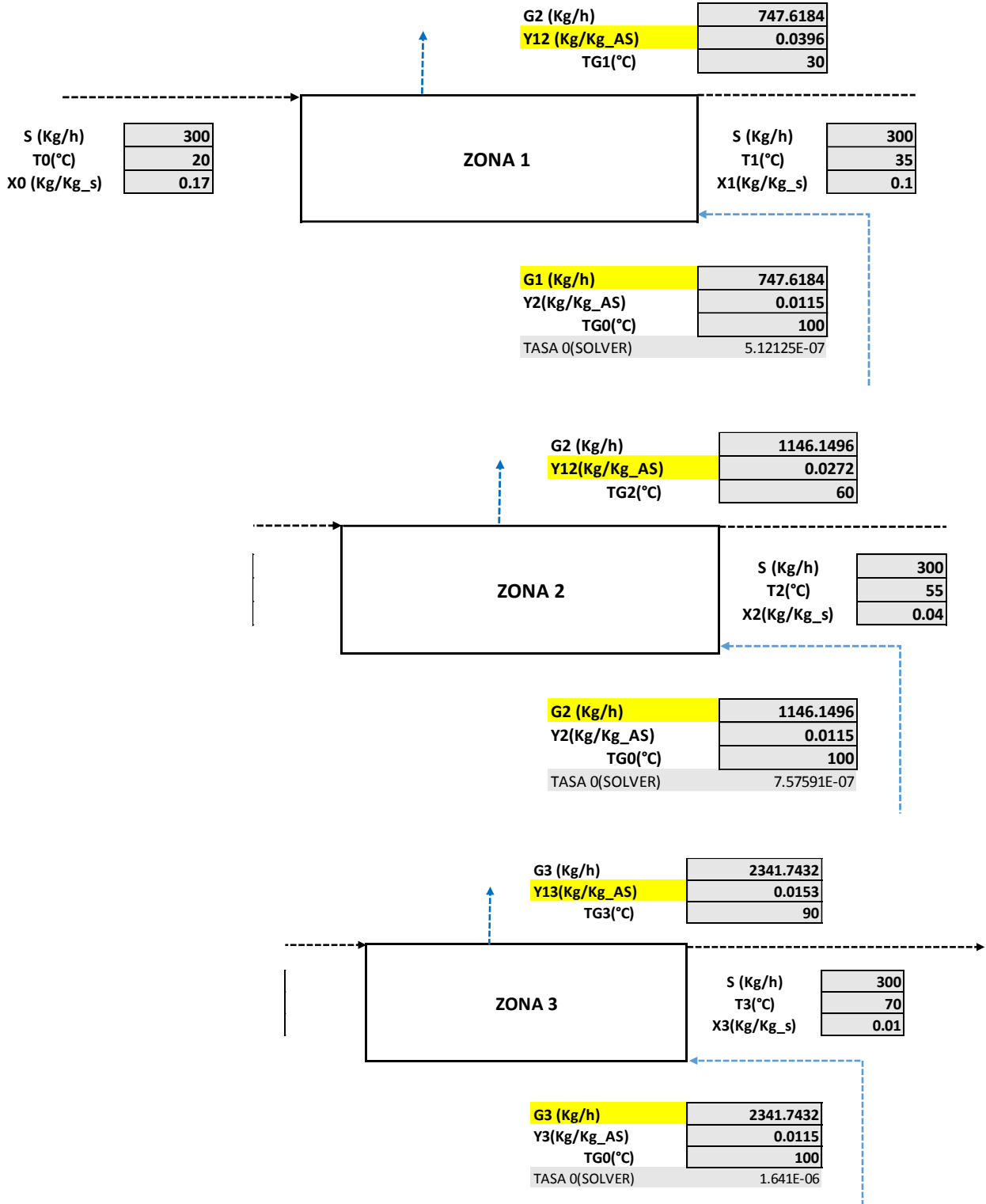
9.4 ANEXO IV: DTI DE LÍNEA DE VAPOR



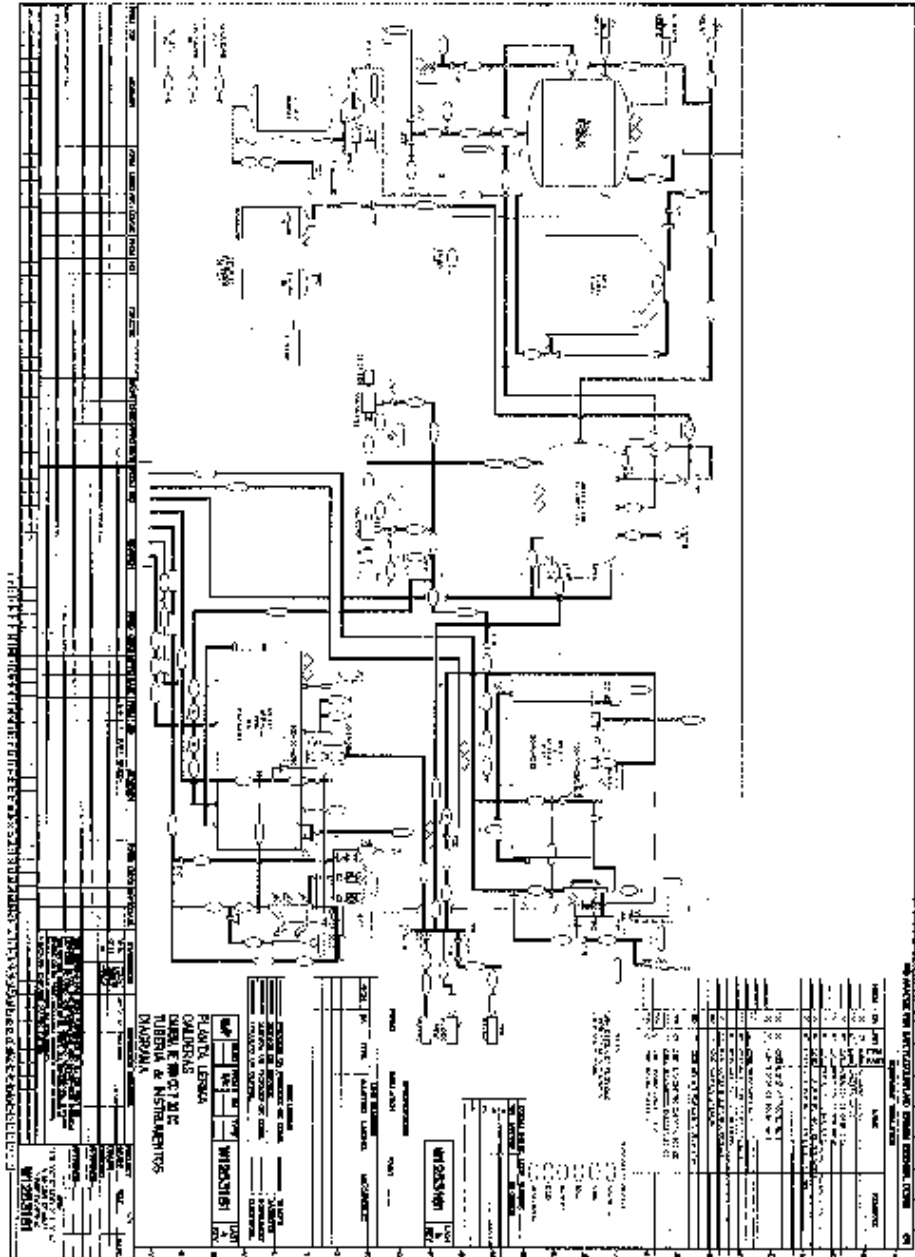
DTI DE LÍNEA DE VAPOR



9.5 ANEXO V: BALANCE DE MASA DEL SECADOR



9.6 ANEXO VI: DTI DE LAS CALDERAS



9.7 ANEXO VII: PÉRDIDA DE VAPOR POR CONDENSADO

TLV. Compañía Especialista en Vapor Español (América Latina)

Productos | Recursos & Herramientas | Entrenamiento | Perfil Corporativo Contáctenos

[Inicio](#) > [Calculador para Ingeniería](#) > Calculadora: Carga de Condensado de la Pérdida de Calor por Radiación en la Tubería

Calculador para Ingeniería

Vapor

Diseño de Tubería

Orificios y Válvulas

Carga de Condensado

De la Tubería al Arranque

Del Calentamiento de un Líquido (Continuo)

Del Calentamiento de un Líquido (Batch)

Del Calentamiento de Aire

De la Pérdida de Calor en la Tubería por Radiación

Punto Stall

Mejora de la Sequedad del Vapor

Efecto de la Mezcla de Aire en el Vapor

Costo Unitario de la Energía y el Vapor

Eficiencia de la Caldera

Recuperación de Condensado

Agua

Calculadora: Carga de Condensado de la Pérdida de Calor por Radiación en la Tubería

Inscribese en la Revista por e-mail!

Introducir Datos Unidades

Grado de Tubería

Tamaño de Tubería

Aislamiento [?]

Presión de Vapor

Espesor de Aislamiento

Longitud de la Tubería [?]

[Mostrar Opciones Avanzadas](#)

Resultados

Carga de Condensado 15.1392

$$Q_r = \frac{2\pi(T_s - T_{am})}{\frac{1}{\lambda} \ln \frac{d_1 + 2L}{d_1} + \frac{2}{\alpha(d_1 + 2L)}}$$

$$m_c = \frac{36Q_r}{\Delta H} * l$$

Dónde

l = Espesor de aislamiento (m)

T_{am} = Temperatura ambiente (°C)

α = Coeficiente de transferencia de calor (W/m²K)

λ = Coeficiente de conductividad térmica (W/mK)

m_c = Carga de condensado (kg/h)

Q_r = Calor radiante (W/m)

d_1 = Diámetro externo de tubería (m)

9.8 ANEXO VIII: ESTIMADO DEL LEVANTAMIENTO PARA LA LÍNEA DE VAPOR

	\$ M USD	Porcentaje del Capital
		Total
Ingeniería	2	5%
Contratistas (materiales e instrumentos)	31.069	78%
Costos indirectos de campo	4.000	10%
Contingencias	2.931	7%
Total Capital	40	100%

9.9 ANEXO IX: TABLA COSTO BENEFICIO

Periodo	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
COSTO DE CALDERA	\$ -	\$ 111.00	\$ 116.55	\$ 122.38	\$ 128.50	\$ 134.92	\$ 141.67	\$ 148.75	\$ 156.19	\$ 164.00	\$ 172.20
COSUMO DE VAPOR (\$/TON)	\$ -	\$ 58.19	\$ 59.94	\$ 61.74	\$ 63.59	\$ 65.50	\$ 67.46	\$ 69.49	\$ 71.57	\$ 73.72	\$ 75.93
COSTO FIJOS	\$ -	\$ 2.00	\$ 2.06	\$ 2.12	\$ 2.19	\$ 2.25	\$ 2.32	\$ 2.39	\$ 2.46	\$ 2.53	\$ 2.61
TOTAL DE GASTOS	\$ -	\$ 60.19	\$ 62.00	\$ 63.86	\$ 65.78	\$ 67.75	\$ 69.78	\$ 71.87	\$ 74.03	\$ 76.25	\$ 78.54
AHORRO	\$ -	\$ 50.81	\$ 54.55	\$ 58.52	\$ 62.72	\$ 67.17	\$ 71.89	\$ 76.88	\$ 82.16	\$ 87.75	\$ 93.66
DEPRECIACIÓN	\$ -	\$ 8.00	\$ 12.80	\$ 7.60	\$ 4.80	\$ 4.80	\$ 2.00	\$ 2.00	\$ 1.60	\$ 1.40	\$ 0.80
GANANCIA ANTES DE IMP	\$ -	\$ 42.81	\$ 41.75	\$ 50.92	\$ 57.92	\$ 62.37	\$ 69.89	\$ 74.88	\$ 80.56	\$ 86.35	\$ 92.86
IMPUESTOS	\$ -	\$ 16.27	\$ 15.87	\$ 19.35	\$ 22.01	\$ 23.70	\$ 26.56	\$ 28.45	\$ 30.61	\$ 32.81	\$ 35.29
GANANCIA DESPUÉS DE IMPUESTOS	\$ -	\$ 26.54	\$ 25.89	\$ 31.57	\$ 35.91	\$ 38.67	\$ 43.33	\$ 46.42	\$ 49.95	\$ 53.53	\$ 57.57
INVERSIÓN	\$ 40.00	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
DEPRECIACIÓN	\$ -	\$ 8.00	\$ 12.80	\$ 7.60	\$ 4.80	\$ 4.80	\$ 2.00	\$ 2.00	\$ -	\$ -	\$ -
FLUJO DE EFECTIVO	\$ (40.00)	\$ 34.54	\$ 38.69	\$ 39.17	\$ 40.71	\$ 43.47	\$ 45.33	\$ 48.42	\$ 49.95	\$ 53.53	\$ 57.57
DCF	\$ (40.00)	\$ 30.84	\$ 30.84	\$ 27.88	\$ 25.87	\$ 24.67	\$ 22.97	\$ 21.90	\$ 20.17	\$ 19.31	\$ 18.54
NPV	\$ (40.00)	\$ (9.16)	\$ 21.68	\$ 49.56	\$ 75.43	\$ 100.10	\$ 123.06	\$ 144.97	\$ 165.14	\$ 184.44	\$ 202.98

La cual tiene los siguientes valores:

Tabla 25. Valores para Flujo de Efectivo

Tasa	Porcentaje
Tasa Impositiva	38%
Incremento anual costo de Calderas	5%
Incremento anual costo de línea de vapor	3%
Tasa de Descuento	12%
TIR	27%