

RECIRCULACIÓN DE CONDENSADOS PARA AUMENTAR LA EFICIENCIA
ENERGÉTICA DE LA CALDERA Y DISMINUIR EL CONSUMO DE AGUA EN LA
PLANTA PARMALAT DE CHÍA (CUNDINAMARCA)

Angie Lorena Jerez Cruz

Trabajo de Grado para optar el título de Ingeniería Ambiental
Modalidad Pasantía

Directora

NIDIA ELENA ORTIZ PENAGOS

Codirectora Parmalat

MARIA FERNANDA MONTAÑO BERNAL

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
LÍNEA DE INVESTIGACIÓN TECNOLOGIAS AMBIENTALES
BOGOTÁ D.C.
2024

TABLA DE CONTENIDO

TABLA DE CONTENIDO.....	2
LISTA DE TABLAS	4
LISTA DE FIGURAS.....	4
LISTA DE ANEXOS.....	4
RESUMEN	5
INTRODUCCIÓN	6
ABSTRACT.....	7
OBJETIVOS	8
Objetivo General.....	8
Objetivos Específicos.....	8
MARCO REFERENCIAL.....	9
Marco Contextual.....	9
Marco teórico	11
Reducción del impacto ambiental:.....	13
Marco conceptual.....	13
Principios de funcionamiento de las calderas industriales.....	13
Marco Legal	16
RESULTADOS.....	¡Error! Marcador no definido.
Fase 1: Reconocimiento del proceso productivo e identificación de puntos críticos para el balance de energía.....	17
Fase 2: Determinación y evaluación de los parámetros fisicoquímicos del agua de alimentación de calderas y salida de condensados.	21

Fase 3: Propuesta del sistema de eficiencia energética mediante la incorporación de un proceso de recirculación de condensados.	23
Determinación analítica del espesor del aislante y de la temperatura sobre el aislante:	25
Simulación mediante programación en Visual Basic para simular el espesor del aislante en función de la temperatura de salida del agua del sistema de recirculación de condensados.	30
Determinación del ahorro de energía que consume la caldera por la recirculación de condensados:	33
Calor en la caldera <i>sin</i> recirculación de condensados.....	34
Aumento en la eficiencia de la caldera	35
Conclusiones	35
Recomendaciones	36
REFERENCIAS.....	36

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Consumo promedio de servicios por día.....	11
Tabla 2. Parámetros de calidad del agua de alimentación de la caldera	15
Tabla 3. Parámetros del agua dentro de la caldera.....	15
Tabla 4. Características caldera 1	18
Tabla 5. Características caldera 2	18
Tabla 6. Características caldera 3	18
Tabla 7. Promedio mensual de los parámetros del agua de alimentación de la caldera	21
Tabla 8. Comparativa parámetros del agua de entrada con los valores de la normativa	21
Tabla 9. Promedio mensual de los parámetros del agua de los condensados	22
Tabla 10. Comparativa parámetros del agua de los condensados con los valores de la normativa	22
Tabla 11. Datos para el sistema de recirculación de condensados	23
Tabla 12. Espesor del aislante en función de la temperatura de salida del agua del sistema de condensados	31
Tabla 13. Interpolación para entalpia del agua de alimentación.....	34
Tabla 14. Interpolación para entalpia del agua de alimentación.....	34

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Personal de producción línea UHT y Fermentados.....	9
Figura 2. Equipo Tetra Therm Aseptic Flex..	10
Figura 3. Equipo Tetra Therm Aseptic VTIS..	10
Figura 4. metodología de desarrollo del proyecto.	17
Figura 5. Caldera 1.....	18
Figura 6. Caldera 2.....	18
Figura 7. Caldera 3.....	18
Figura 8. Medición alcalinidad con fotómetro multiparámetro HI 83399.....	19
Figura 9. Medición dureza con fotómetro multiparámetro HI 83399.....	20
Figura 10. Medición pH con medidor portátil HI 98190.....	20
Figura 11. Medición Oxígeno disuelto con medidor portátil HI 98190.	20
Figura 12. Plano recorrido de la tubería de recirculación del condensado.	24
Figura 13. Relación diámetro nominal con diámetro real y espesor de pared.	25
Figura 14. Sistema de recirculación de condensado.	26
Figura 15. Espesor del aislante en función de la temperatura de salida del agua del sistema de condensados.....	33

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Muestreo diario de parametros.....	39
Anexo 2. ruta propuesta en AutoCAD para ubicar la tubería que podría transportar los condensados.	40
Anexo 3. Tabla de las variaciones en los diámetros de la tubería acero al carbón.....	40
Anexo 4. Código de la simulación en Excel de Visual Basic.....	41

RESUMEN

Parmalat Colombia Ltda del grupo Lactalis se ubica como una de las empresas más destacadas del sector alimenticio en la industria de los lácteos. Una de sus plantas principales se encuentra en el municipio de Chía, Cundinamarca, donde se llevan a cabo distintos procesos productivos que se caracterizan por tener una alta demanda en el consumo de agua y gas.

En el caso específico del equipo de calderas, este se encarga de realizar la distribución del vapor de agua a las diferentes áreas de producción de la planta.

Si se tiene en cuenta la complejidad de los procesos junto con el volumen de producción diario de la empresa, se estima que se consumieron $6,9 \text{ m}^3$ de agua por cada tonelada producida, lo que generó un consumo promedio de $594,4 \text{ m}^3$ de agua y 7.255 m^3 de gas al día para el primer semestre del año 2023.

Aunque pensar en la reducción de estos volúmenes se presenta como una tarea retadora, esta problemática puede ser minimizada aprovechando los condensados por medio de la recirculación de estos hacia la caldera, ya que en este caso estos no son aprovechados después de que cumplen con la distribución del vapor.

Para evaluar la viabilidad de implementar este sistema en la planta se llevaron a cabo 3 fases donde se identificaron los puntos críticos de la operación, posteriormente se definió la línea de distribución de la caldera 2 para la implementación del posible sistema. Se realizó un muestreo y evaluación de los parámetros fisicoquímicos tanto del agua de alimentación de calderas, como a la salida de condensados; finalmente se propuso un sistema de eficiencia energética mediante la incorporación de un proceso de recirculación de condensados, del cual se obtuvo como resultado un aumento de la eficiencia de la caldera de hasta un 10,71% generando ahorros por consumo de gas de hasta \$32'606.002 al mes

Palabras Clave: Recirculación de condensados, eficiencia, distribución de vapor, calderas, parámetros fisicoquímicos, energía térmica.

INTRODUCCIÓN

La industria alimentaria se ubica como uno de los sectores más contaminantes a nivel del agua. Debido a esto ha surgido la necesidad en las industrias de adoptar planes y metodologías que les permitan hacer un uso eficiente del agua (Galeano. P, 2020).

En el caso de la planta de producción de Parmalat, llevar a cabo la producción de productos lácteos, junto con sus derivados, requiere de altos volúmenes de agua, por lo que el consumo de este insumo es elevado. Otro aspecto a destacar es el consumo energético que requieren las calderas para mantener la salida constante de vapor de agua cerca de los 135°C; lo cual se traduce en una problemática ambiental fuerte donde se dan impactos como el agotamiento del recurso hídrico y los recursos no renovables por la necesidad de combustibles que impulsan el trabajo de la caldera. Por lo que resulta necesario aplicar conceptos de economía circular junto con estrategias de mejoras en la eficiencia energética de los procesos (Galeano. P, 2020).

La recirculación de los condensados permite disminuir la cantidad de agua consumida en general por la planta, junto con la reducción de los costos del gas, pago por consumo de la misma y aumento de la eficiencia energética de la caldera.

De este modo se logra “promover que las empresas adopten medidas que les permitan alcanzar los objetivos y metas enmarcados en el desarrollo sostenible, fortalecer el área ambiental, reducir costos, ayudar al medio ambiente y ser más competitivas a nivel empresarial” (Galeano. P, 2020).

ABSTRACT

Parmalat Colombia Ltda. of the Lactalis group is one of the most important companies in the dairy industry in the food sector. One of its main plants is located in the municipality of Chía, Cundinamarca, where different production processes are carried out that are characterized by a high demand in water and gas consumption.

In the specific case of the boiler equipment, it is in charge of distributing steam to the different production areas of the plant.

Taking into account the complexity of the processes together with the company's daily production volume, it is estimated that 6.9 m³ of water were consumed for each ton produced, which generated an average consumption of 594.4 m³ of water and 7,255 m³ of gas per day for the first half of the year 2023.

Although the reduction of these volumes is a challenging task, this problem can be minimized by using the condensates by recirculating them to the boiler, since in this case they are not used after the steam distribution is completed.

To evaluate the feasibility of implementing this system in the plant, 3 phases were carried out where the critical points of the operation were identified and the distribution line of boiler 2 was defined for the implementation of the possible system. A sampling and evaluation of the physicochemical parameters of the boiler feed water and condensate outlet was carried out; and finally an energy efficiency system was proposed by incorporating a condensate recirculation process from which it was obtained as a result that by implementing this type of system the boiler efficiency can be increased up to 10.71% generating savings in gas consumption of up to 32[^] 606,002 per month.

Keywords: Condensate recirculation, efficiency, steam distribution, boilers, physicochemical parameters, thermal energy.

OBJETIVOS

Objetivo General

Proponer un sistema de recirculación de condensados para el aumento de la eficiencia energética de la caldera y disminución del consumo de agua en la planta de producción de Parmalat ubicada en Chía (Cundinamarca).

Objetivos Específicos

- Obtener la cantidad de condensados generados en la planta y de la cantidad de agua y gas consumidos en la caldera.
- Evaluar los parámetros físico-químicos del agua de los condensados (temperatura, pH, dureza y alcalinidad) para evaluar su calidad y compararla con la requerida para calderas con el fin de determinar si el tratamiento actual es apropiado o si es necesario realizar ajustes para que los condensados sean aptos para su recirculación a la caldera.
- Dimensionar el sistema de recirculación de condensados: selección del material del aislamiento térmico y del protector del aislante, determinación del espesor del aislante.
- Determinar el aumento de la eficiencia energética y disminución del consumo de agua en la planta por la implementación del sistema de recirculación de condensados propuesto.

MARCO REFERENCIAL

Marco Contextual

El grupo Lactalis nace en el año 1933 fundado por Andrés Besnier, donde tuvieron como primera ubicación Laval, Francia, como una pequeña empresa quesera que tenía un consumo diario de 35L de leche. Con el tiempo la empresa fue diversificando su producción incluyendo en su catálogo variedades de quesos, natas mantequillas y diferentes presentaciones de los envases de su leche.

Para el año 1970 ya dominaban el mercado lechero del atlántico, y es para el año 2011 que llegan a Colombia con la adquisición de la empresa Parmalat Ltda. De la cual siguen conservando su nombre de marca comercial. En el año 2011 en sus registros figuraba una recolecta de 14,5 mil millones de litros de leche al año y una operación en 34 países con 192 fábricas.

Actualmente la planta ubicada en Chía cuenta con la operación de tres líneas de producción, leche UHT, productos fermentados y leche en polvo.



Figura 1. Personal de producción línea UHT y Fermentados. Fuente: Autora

Para la producción de leche UHT se lleva a cabo el proceso de Pasteurización el cual tiene como principio elevar la temperatura de la leche hasta 135°C como lo establece los lineamientos de la casa matriz en Francia, y posterior disminuir su temperatura para garantizar la inocuidad del alimento. Este proceso lo llevan a cabo por medio de dos equipos, los cuales generalmente trabajan en alterno a excepción de las ocasiones que el volumen a trabajar amerita de ambos.

El primer equipo es un Tetra Therm Aseptic Flex para tratamiento térmico tubular que se encarga de calentar y enfriar la leche sin llegar a tener algún contacto directo con esta, por medio de su mecanismo tubular que permite el flujo de la leche, mientras el vapor caliente realiza la transferencia de calor al pasar alrededor por otra tubería.



Figura 2. Equipo Tetra Therm Aseptic Flex. Fuente: Lekkerkerker. (s.f.).

El segundo equipo se trata de un Tetra Therm Aseptic VTIS que a diferencia del otro equipo si genera un contacto directo con la leche, ya que su metodología de calentamiento funciona por medio de la inyección de vapor directa. Posterior a esto la leche es llevada a los tanques asépticos para ser distribuida a las diferentes maquinas empacadoras.



Figura 3. Equipo Tetra Therm Aseptic VTIS. Fuente: Lekkerkerker. (s.f.).

Sin embargo, detrás de esta cadena de producción no se puede pasar por alto el trabajo de las calderas de la planta las cuales son las encargadas de la generación de todo el vapor que se distribuye en las distintas áreas. La planta de Parmalat Chía (Lactalis) Cuenta con dos calderas piro tubulares Colmaquinas una de 200BHP, otra de 400BHP y una Caldera Power Master de Respaldo de 200BHP.

De acuerdo a sus registros del año 2023 se estima que la producción fue de 51.312,6 Toneladas de productos, lo cual derivo en un consumo aproximado de:

Tabla 1. Consumo promedio de servicios por día.

SERVICIO	CONSUMO	
ENERGIA	16,787	<i>kW/día</i>
GAS NATURAL	7.255	<i>m³/día</i>
AGUA POTABLE	594,399	<i>m³/día</i>

Fuente: Autor

Marco teórico

La industria lechera se caracteriza por no utilizar agua como materia prima para la elaboración de sus productos, pero esto no significa que no exista un consumo de agua significativo, ya que dentro de su proceso productivo sí la requiere en un rango que supera de 1 a 4 veces el volumen de leche que entra en la industria (Lucas. S y García. R, 2018)

Una de las problemáticas relacionadas en la empresa con el uso del agua es el desaprovechamiento de los condensados que se encargan de llevar a cabo el proceso de pasteurización, los cuales actualmente solo cumplen con la función de elevar la temperatura y se dejan perder como emisiones al aire de vapor de agua o como agua cruda que posteriormente es entregada en las líneas de alcantarillado. Es por esta razón que se plantea aprovechar la recirculación de los condensados.

Según la Guía Básica de Calderas Industriales Eficientes publicada por la Consejería de Economía y Hacienda, Organización Dirección General de Industria, Energía y Minas (2013), se señala que la contaminación y consumo energético de las calderas que en la mayoría de escenarios se ubican como uno de los puntos más críticos tanto por el consumo elevado de agua, como el de energía, por ello resulta vital tomar medidas que permitan la disminución del consumo de agua y que promuevan el ahorro y uso eficiente de la energía, mejorando la competitividad de las plantas de producción.

Una mejora de la eficiencia energética se puede entender como la reducción de los consumos de energía por medio de la implementación de nuevos procesos y estrategias en aquellos procesos productivos que tienden a consumir altos niveles de energía y a su vez genera grandes cantidades de emisiones degradantes del medio ambiente; es por ello que, a partir de la optimización de los procesos y la adecuada implementación de las tecnologías se puede asegurar un desarrollo más eficiente que reduzca los consumos y costos por pago de servicios en las industrias (Aceituno D. S, 2011).

En el estudio realizado a la Planta de Beneficio y Desprese de Avidesa Mac Pollo S.A para el desarrollo de un proyecto de producción más limpia se propuso la recirculación de los vapores de agua que se generan en el área de matanza de la empresa donde en términos económicos se obtuvo que por cada m³ de vapor que se recircule se ahorran \$6457 COP que en términos individuales no representa un gran valor pero al ser escalado a volúmenes industriales alivia en las industrias los porcentajes de costos por servicios junto con la disminución del consumo de agua, gas y emisiones atmosféricas (Gutiérrez. S. A, 2019).

Un estudio llevado a cabo por la universidad de Manizales adelantado en los ingenios azucareros, donde se buscaba optimizar los procesos en la fabricación de azúcar, promoviendo el uso adecuado, disposición y tratamiento de las aguas por medio de la recirculación y reúso de aguas residuales generadas en la planta, demostró que su metodología podría representar ahorros significativos en uso de agua por circuito y en los cuales en promedio podrían llegar a presentar ahorros de hasta 45 millones de pesos por cada cien hectáreas procesadas (Gordillo. V. H, 2022).

Una tesis para la universidad de la Salle realizada por Lucia Hernández donde se maneja el ahorro y uso eficiente del recurso agua en una empresa dedicada a la fabricación de aceites y grasas vegetales de Bogotá, expone como objetivo principal reducir los consumos y usos excesivos de agua dentro de las diferentes procesos productivos del proceso, en su metodología plantea el control y seguimiento de los contadores de agua con la intención de determinar los puntos críticos de consumo, evalúa la producción de vapor, el uso del agua de calderas, la posibilidad de la recirculación de condensados y el estado de las tuberías de transporte de agua y vapor en torno a sus recubrimientos térmicos (Hernández. A, 2007).

El aporte de este estudio evidencia el interés y la viabilidad de los sistemas de reúso y/o reciclaje como estrategias óptimas y eficientes para la mejora de las industrias y la reducción de los impactos relacionados con el agotamiento de los recursos hídricos.

Finalmente, la tesis de la ingeniera Erika Viviana Prieto Bautista de la universidad Santo Tomas plantea como objetivo el incremento de la eficiencia energética de las calderas de la planta Gloria Colombia en Cogua por medio de la recirculación de los condensados que se generan en el proceso productivo de la planta. En su metodología realiza los respectivos balances para reconocer puntos críticos y el volumen que debe ser manejado, posterior a eso procede a determinar el estado de los parámetros fisicoquímicos del agua de los condensados y la recirculación del condensado. Como resultado obtuvo un aumento de la eficiencia de 1,31% generando ahorros significativos en los consumos hídricos y energéticos de la operación unitaria de la caldera (Bautista. V. P, 2017).

Teniendo en cuenta que la eficiencia energética es la capacidad que tiene un sistema para realizar una función con el mínimo consumo de energía posible. Este tipo de mejoras resulta crucial de implementar en los diferentes sistemas de las empresas ya que puede contribuir a beneficios como:

- Reducción de costos operativos: Al mejorar la eficiencia energética se puede reducir los costos operativos debido a la reducción directa de la disminución del consumo de energía, lo que conduce a ahorros significativos a largo plazo (Chambers, A. y Nakicenovic, N, 2008)

- Incremento de la competitividad: Las empresas que logran una mayor eficiencia energética pueden reducir sus costos de producción, lo cual les permite ser más competitivas en el mercado. (Chambers, A. y Nakicenovic, N, 2008)
- Cumplimiento de Normativa: En países desarrollados e incluso Colombia a las empresas se les exige cumplir con ciertos estándares de eficiencia energética, reducción del gasto de recursos naturales y mejoras sostenibles al largo plazo. Al mejorar estos aspectos contribuyen a cumplir con las regulaciones y evitan multas o sanciones (Sovacool, B. K. (Ed.). 2011).

Reducción del impacto ambiental:

- Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI): disminuye el consumo de combustibles fósiles, como el petróleo, el gas natural y el carbón, que son las principales fuentes de emisiones de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxidos de nitrógeno (NO_x). Al reducir el consumo de estos combustibles, se reduce la cantidad de GEI liberados a la atmósfera, lo que contribuye a mitigar el cambio climático y un aire más limpio y saludable para las comunidades locales reduciendo los impactos negativos en la salud humana. (Ang, B. W., y Choong, W. L. 2011).
- Conservación de recursos naturales: La eficiencia energética implica un uso más eficaz de los recursos implicados en la generación de energía como el gas y el agua. Al reducir el consumo se conservan los recursos naturales y se minimiza la extracción y producción de energía, lo que a su vez reduce la presión sobre los ecosistemas y los hábitats naturales. (United Nations Environment Programme (UNEP). 2017).

Marco conceptual

Principios de funcionamiento de las calderas industriales

Las calderas industriales son equipos diseñados para generar vapor o agua caliente mediante la aplicación de calor a un fluido de trabajo. Los principales tipos de calderas utilizadas en la industria son:

- Calderas de vapor: Estas calderas utilizan la combustión de fuentes fósiles, biomasa o residuos para generar calor que se transfiere al agua para producir vapor a alta presión. El vapor generado se utiliza para alimentar turbinas de vapor en plantas de energía, procesos industriales o calefacción (Ganapathy, V. (2003).
- Calderas de agua caliente: En estas calderas, el agua se calienta directamente mediante la incineración de combustibles o mediante intercambiadores de calor, sin producir vapor. El agua

caliente resultante se utiliza para calefacción en edificios, procesos industriales o aplicaciones comerciales. (Stultz, S. C., y Kitto, J. B. (1992)

Algunos de los factores que pueden afectar la eficiencia de una caldera que se traduce en la influencia en las pérdidas de energía y consumos más altos de agua y combustibles son:

- **Combustión:** La eficiencia de la combustión es crucial para maximizar la eficiencia de la caldera. Factores como la calidad del combustible, la mezcla aire-combustible y la temperatura de la llama pueden afectar la eficiencia de la combustión (Landi. Q. A, 2020)
- **Pérdidas de calor:** Las pérdidas de calor a través de la chimenea, las paredes de la caldera y otras superficies pueden reducir la eficiencia global de la caldera. Minimizar estas pérdidas mediante el aislamiento adecuado y el control de la ventilación puede mejorar la eficiencia energética (Torres, J. E. (2022).

El principio de recirculación de condensados es una práctica común en sistemas de calderas industriales que consiste en recuperar y recircular el condensado generado por el proceso de condensación del vapor. Este condensado, que es agua caliente, se devuelve al sistema de calderas para su reutilización como agua de alimentación (Calle, G., & Pozo, C. (2016).

Cuando el vapor se condensa en el sistema, libera su energía en forma de calor al condensarse en agua. Esta agua de condensado, se recoge y se devuelve al sistema de calderas en lugar de descargarse como efluente. La recirculación de condensados tiene varios beneficios, como el ahorro de agua, la mejora de la eficiencia energética y la reducción de los costos de operación (Calle, G., & Pozo, C. (2016).

De acuerdo a la investigación realizada por (Rodríguez, H. A. (2023) el agua de ingreso al sistema de condensados y el agua recirculada deben cumplir con ciertos parámetros fisicoquímicos para garantizar un funcionamiento eficiente y prolongar la vida útil del sistema. Algunos de los parámetros importantes incluyen:

- **pH:** El pH del agua de condensado debe estar dentro de un rango específico para evitar la corrosión de los componentes metálicos del sistema. Por lo general, se recomienda un pH ligeramente alcalino para reducir la corrosión (Rodríguez, H. A. (2023).
- **Conductividad eléctrica:** La conductividad eléctrica del agua de condensado es un indicador de la concentración de sales disueltas. Un aumento en la conductividad puede indicar la presencia de contaminantes, como sales minerales, que pueden causar incrustaciones y otros problemas en el sistema (Rodríguez, H. A. (2023).
- **Oxígeno disuelto:** El oxígeno disuelto en el agua de condensado puede causar corrosión en los componentes metálicos del sistema. Por lo tanto, se deben tomar medidas para minimizar la entrada de oxígeno al sistema y controlar su concentración en el agua de condensado (Rodríguez, H. A. (2023).

- **Alcalinidad:** La alcalinidad es un indicador de la capacidad para neutralizar ácidos. Un nivel adecuado de alcalinidad es crucial para prevenir la corrosión en los componentes metálicos del sistema (Divas R, B. (2020).
- **Dureza del agua:** La dureza del agua se refiere a la concentración de sales de calcio y magnesio disueltas en el agua. Los niveles altos de dureza pueden provocar incrustaciones en los intercambiadores de calor y otros componentes del sistema, lo que reduce la eficiencia del intercambio de calor y aumenta los costos de mantenimiento (Divas R, B. (2020).

El agua de alimentación de una caldera debe cumplir con ciertos parámetros de calidad para garantizar el correcto funcionamiento, prolongar la vida útil de la caldera y prevenir problemas como la corrosión, incrustaciones y arrastre de sólidos. A continuación, se describen los parámetros más importantes que deben controlarse en el agua de alimentación de una caldera:

Tabla 2. Parámetros de calidad del agua de alimentación de la caldera

Parámetro	Rango recomendado	Impacto en la operación de la caldera
Dureza	0 ppm	Incrustaciones
pH	8.5 – 9.5	Corrosión e incrustaciones
Alcalinidad	10 – 50 ppm	Corrosión e incrustaciones
TDS	< 1000 ppm	Incrustaciones y arrastre de sólidos
Conductividad	50 – 100 μ S/cm	Corrosión e incrustaciones
Sílice	< 0.02 ppm (alta presión)	Incrustaciones en calderas y turbinas
Oxígeno disuelto	0 ppm	Corrosión
Fosfatos	20 – 40 ppm	Control de dureza, prevención de incrustaciones
Cloruros	< 300 ppm	Corrosión
Aceites y grasas	0 ppm	Reducción de eficiencia y sobrecalentamiento

Fuente: (ASME. (2020).

Los requerimientos del agua dentro de la caldera también son fundamentales para asegurar un funcionamiento eficiente y seguro. El agua dentro de la caldera debe ser tratada adecuadamente para remover impurezas y sólidos que puedan dañar los equipos y afectar la calidad del vapor. A continuación, se describen los principales requerimientos del agua en una caldera:

Tabla 3. Parámetros del agua dentro de la caldera

Parámetro	Límite recomendado	Impacto en la operación
Dureza (CaCO ₃)	0 ppm	Prevención de incrustaciones
Sólidos disueltos totales (TDS)	2000-3500 ppm (baja presión)	Control de incrustaciones y arrastre
pH	10.5-11.5	Protección contra corrosión e incrustaciones
Conductividad	< 3000 μ S/cm (baja presión)	Indicador de concentración de sólidos
Sílice	< 0.02 ppm (alta presión)	Prevención de depósitos en

		calderas y turbinas
Oxígeno disuelto	0 ppm	Eliminación del riesgo de corrosión
Fosfatos	20-40 ppm	Prevención de incrustaciones
Cloruros	< 300 ppm	Minimización de la corrosión

Fuente: [ASME], 2020)

Marco Legal

El ministerio de minas y energía dispone mediante la **resolución 40773 del 29** de diciembre del 2023 el reglamento técnico de instalaciones térmicas (RETSIT) el cual tiene como objetivo establecer los diferentes requisitos a los que se deben regir todas las instalaciones de carácter térmico, como el montaje de tuberías y la producción y distribución de vapor. Garantizando que la realización de estos procesos se realice de manera directa, silenciosa y eficiente. (Ministerio de minas y energía. (2023).

“Todo esto dando conformidad con la **Ley 697 de 2001**, en la cual se busca fomentar el uso racional y eficiente de la energía, como la promoción de la utilización e implementación de energías alternativas que permita una alineación con lo propuesto en el marco de la Convención de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, el Protocolo de Kioto y el Acuerdo de París, esto con el fin de promover la reducción de emisiones de efecto invernadero y de las sustancias agotadoras de la capa de ozono en instalaciones de sistemas térmicos” (Ministerio de minas y energía. (2023).

El diseño, instalación, operación y mantenimiento de las calderas industriales en Colombia están sujetos a varias normativas técnicas que garantizan la seguridad y eficiencia de estos equipos. Estas normas son aplicables a la implementación de un sistema de recirculación de condensados, ya que este sistema interactúa directamente con la caldera y su ciclo de vapor.

La norma ASME (American Society of Mechanical Engineers) - Sección I: Calderas de Potencia: establece criterios para los materiales, los procedimientos de fabricación y los requisitos de inspección y prueba, que deben cumplirse en la implementación de sistemas que afecten el funcionamiento de la caldera, como la recirculación de condensados.

La NTC 5667-1 es una norma colombiana que regula el tratamiento del agua para calderas, con el objetivo de evitar la corrosión, incrustaciones y otros problemas que puedan afectar el rendimiento y seguridad del sistema. El agua recirculada desde los condensados debe cumplir con los criterios de calidad del agua establecidos por esta norma. Esto implica implementar sistemas de filtración y tratamiento que aseguren que el agua de retorno no dañe la caldera ni reduzca su eficiencia.

Finalmente, para el muestreo de los parámetros fisicoquímicos del agua de alimentación de la caldera la norma **NTC-ISO 5667-3** establece los procedimientos y equipos adecuados para realizar el muestreo tanto del agua como del vapor en las calderas, incluye instrucciones para el muestreo del agua de ingreso de la caldera y el agua de caldera. Además, detalla los métodos para el muestreo de vapor, que en conjunto con la **ISO 50001** permite establecer un plan de

acción energética para implementar las mejoras identificadas. Este plan incluye la asignación de recursos, la definición de responsabilidades y la creación de cronogramas para las actividades de mejora.

DESARROLLO DE LA PASANTÍA

Para garantizar el cumplimiento de los objetivos del proyecto, en la metodología se plantearon tres fases de desarrollo para llevar a cabo con éxito el estudio de este, tal como se muestra en la figura 4

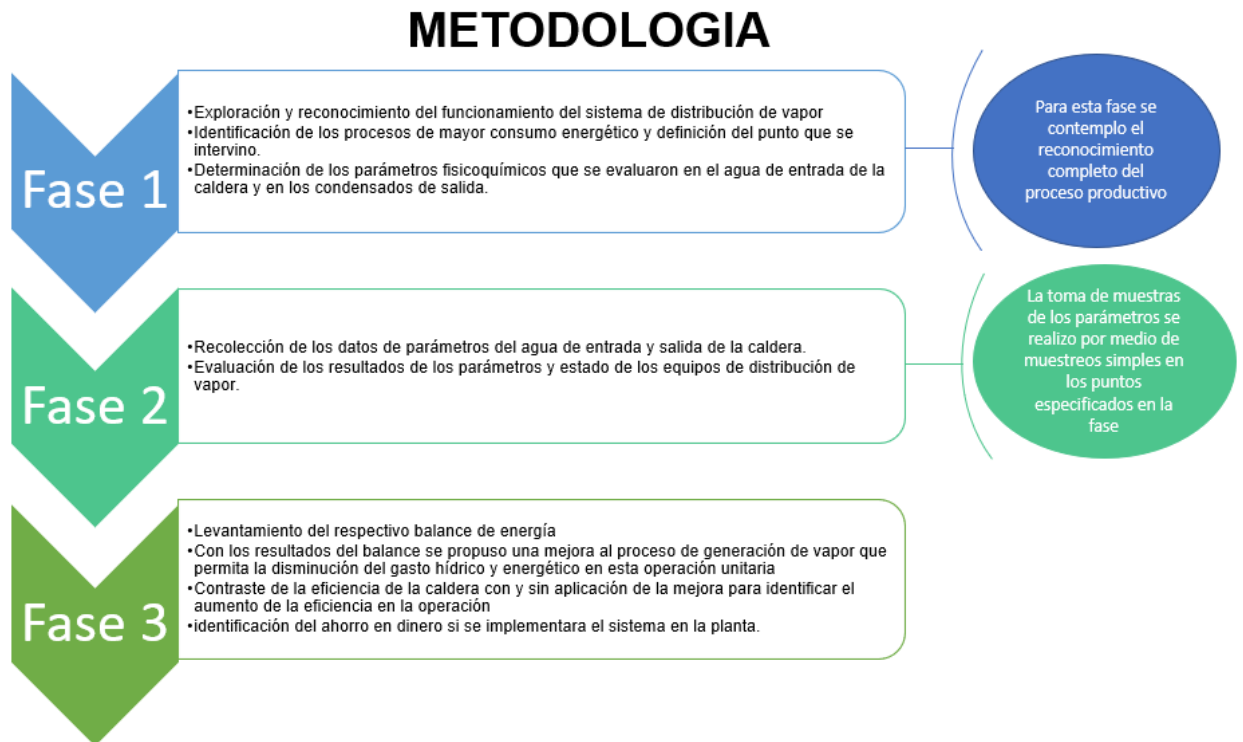


Figura 4. metodología de desarrollo del proyecto. Fuente: Autora

Fase 1: Reconocimiento del proceso productivo e identificación de puntos críticos para el balance de energía.

Se realizó un recorrido de reconocimiento dentro de la planta donde se logró identificar en mayor detalle el proceso productivo, junto con la ubicación espacial de cada uno de los equipos, el funcionamiento de las líneas de distribución de vapor y reconocer los puntos críticos de consumo.

Entre los hallazgos se encontró que en la planta actualmente cuenta con tres procesos principales de producción los cuales son UHT, fermentados y polvo; de estas áreas se derivan ciertas operaciones que son las que demandan un mayor consumo de vapor como lo son:

- Pasteurización

- CIP (Cleaning in place) de cada área
- Evaporación
- Secado

La distribución de vapor se encuentra a cargo del área de servicios industriales donde se encuentran 3 calderas completamente funcionales, sin embargo, actualmente solo se encienden dos calderas de la planta cuando la totalidad de las áreas está operando, quedando la más antigua como de respaldo por si se presenta alguna falla sobre las dos principales. Las características de cada caldera se relacionan a continuación

Tabla 4. Características caldera 1

CALDERA 1	
Capacidad	200 BHP
Año de fabricación	2009
Marca	Colmaquinas
Presión de trabajo	150 PSI
Presión de diseño	200 PSI
Tipo de caldera	Pirotubular
Combustible Primario	Gas natural
Modelo	CH3-200-150-3LG/G

Fuente: Autora



Figura 5. Caldera. Fuente: Autora

Tabla 5. Características caldera 2

CALDERA 2	
Capacidad	200 BHP
Año de fabricación	1995
Marca	Power Master
Presión de trabajo	150 PSI
Presión de diseño	200 PSI
Tipo de caldera	Pirotubular
Combustible Primario	Gas natural
Modelo	3WBS-200-150

Fuente: Autora



Figura 6. Caldera 2. Fuente: Autor

Tabla 6. Características caldera 3

CALDERA 3	
Capacidad	400 BHP
Año de fabricación	2022
Marca	Colmaquinas
Presión de trabajo	250 PSI
Presión de diseño	300 PSI
Tipo de caldera	Pirotubular
Combustible Primario	Gas natural



Figura 7. Caldera 3. Fuente: Autor

Modelo	CH3-400-300- GN-No.2/GN
--------	----------------------------

Fuente: Autora

También se encontró que una práctica corriente es que los equipos de evaporación, secado y el CIP del área de polvo se alimenten con vapor a 220 PSI proporcionado por la caldera 3 y el resto de la planta opere a 120 PSI de la caldera 2. Ya que 120 PSI es una presión suficiente para transportar y alimentar el resto de procesos productivos de la planta.

Durante el tiempo de la práctica se logró evidenciar que, aunque el procedimiento evaporación y secado demandan una mayor cantidad de vapor en contraste con las demás operaciones de producción, su frecuencia de trabajo en la semana es mucho menor que los tiempos de trabajo de las demás áreas (que en condiciones normales operan 24/7). Es por tanto que el punto de estudio para la recirculación de condensados se concentrara solo en la línea de distribución de vapor de la caldera número 2 lo cual abarcaría únicamente la recirculación del condensado proveniente de las áreas de UHT y Fermentados.

Para la evaluación de los parámetros fisicoquímicos se siguieron las especificaciones plasmadas en la NTC-ISO 5667-3 en la cual establece los siguientes criterios para los parámetros:

- Alcalinidad: Se evaluó por medio de un muestreo puntual cada 24 horas.
- Dureza: Al igual que la alcalinidad se tomó por un muestreo puntual diario.
- Oxígeno disuelto, temperatura y pH: Se tomaron en el lugar igualmente con una muestra puntual por día con ayuda de los respectivos equipos disponibles en la planta.

Las muestras se evaluaron en el laboratorio del área ambiental disponible en la planta de Chía, Cundinamarca, utilizando los métodos de análisis colorimétrico con fotómetro multiparámetro HI 83399 para la alcalinidad y la dureza con el método 130.1 recomendado por la EPA como se muestra en las figuras 8 y 9, mientras que el pH y la temperatura se tomaron con el medidor portátil HI 98190 de la marca Hanna instruments (figura 10) y el oxígeno disuelto con el medidor portátil HI98193 Hanna instruments con una frecuencia de muestreo diaria en cada punto durante los seis meses de la duración de la práctica.



Figura 8. Medición alcalinidad con fotómetro multiparámetro HI 83399. Fuente: Autora



Figura 9. Medición dureza con fotómetro multiparámetro HI 83399. Fuente: Autora



Figura 10. Medición pH con medidor portátil HI 98190. Fuente: Autora



Figura 11. Medición Oxígeno disuelto con medidor portátil HI 98190. Fuente: Autora

Fase 2: Determinación y evaluación de los parámetros fisicoquímicos del agua de alimentación de calderas y salida de condensados.

En la primera fase del proyecto se establecieron los parámetros a evaluar para el agua de ingreso de la caldera N°2 y la salida de los condensados de las áreas de fermentados y UHT. Estos muestreos se realizaron de manera puntual con una frecuencia diaria durante los seis meses que duro la práctica entre el periodo de diciembre del 2022 a junio 2023.

El registro de estos muestreos diariamente se encuentra consolidados en el anexo A. Para practicidad del análisis de la calidad del agua de alimentación de la caldera y la salida del condensado se generaron dos tablas con los valores promedio mes a mes por cada parámetro.

En el caso del agua de alimentación de las calderas los parámetros estudiados se muestran en la tabla 7 con el promedio mes a mes.

Tabla 7. Promedio mensual de los parámetros del agua de alimentación de la caldera

AGUA DE ALIMENTACIÓN				
Mes	pH	Dureza	Alcalinidad	Oxígeno disuelto
		Ppm	Ppm	mg/L
Diciembre	6,98	78,03	23,85	6,49
Enero	7,38	34,40	20,57	6,90
Febrero	7,22	30,21	20,21	6,70
Marzo	7,29	40,41	22,97	6,48
Abril	7,42	53,90	22,52	6,26
Mayo	7,40	67,77	22,03	6,10

Fuente: Autora

Tabla 8. Comparativa parámetros del agua de entrada con los valores de la normativa

PARAMETRO	NORMA	RANGO DE INGRESO
Ph	8,5 – 9,5	6,98 – 7,22
Dureza	0 ppm	30,2 – 78,03
Alcalinidad	10 – 50 ppm	20,21 – 23,85
Oxígeno disuelto	0 mg/L	6,10 – 6,90

Fuente: Autora

Al comparan los rangos de cada parámetro con lo que indica la norma como muestra la tabla 8, se logra evidenciar que de los parámetros el único que se encuentra dentro del rango permisible de alimentación de la caldera es la alcalinidad, mientras que los parámetros de dureza y oxígeno disuelto se encuentran por encima del límite y el pH se ubica por debajo del requerido para trabajar en adecuadas condiciones.

De igual manera se realizó el mismo monitoreo para el agua de salida de los condensados, obteniendo los resultados que se muestran en la tabla 9

Tabla 9. Promedio mensual de los parámetros del agua de los condensados

AGUA DE CONDENSADOS				
Mes	pH	Dureza	Alcalinidad	Oxígeno disuelto
		ppm	ppm	mg/L
Diciembre	7,86	12,72	8,93	1,81
Enero	7,31	30,70	20,35	6,16
Febrero	7,21	29,75	19,89	6,58
Marzo	7,28	39,10	22,45	6,50
Abril	7,43	51,34	22,48	6,28
Mayo	7,67	49,59	19,42	5,86

Fuente: Autora

Tabla 10. Comparativa parámetros del agua de los condensados con los valores de la normativa

PARAMETRO	NORMA	RANGO DE INGRESO
pH	10,5 – 11,5	7,21– 7,86
Dureza	0 ppm	12,72 – 51,34
Alcalinidad	10 – 50 ppm	8,93 – 22,48
Oxígeno disuelto	0 mg/L	1,81 – 6,58

Fuente: Autora

Como se puede observar en la tabla 10 para el agua de los condensados al igual que la de la alimentación no se está cumpliendo con los valores límite de los parámetros del pH, la dureza y el oxígeno disuelto

En el caso del pH estos valores por debajo del límite indican la necesidad de adicionar algún agente con características básicas que permita controlar esta variable relevante para un correcto funcionamiento de la caldera ya que un pH entre los rangos actuales que maneja la planta de 7,98 a 7,86 se vuelve un ambiente ideal para que se presenten precipitaciones de distintos metales como calcio, hierro y magnesio, que se caracterizan por generar incrustaciones; por el contrario valores de pH mayores tienden a disolver estos precipitados reducen el riesgo de formación de incrustaciones en las tuberías.

De manera similar, los valores de dureza también se encuentran por encima de los valores permisibles, lo cual combinado con los valores actuales de pH elevan la probabilidad de generación de incrustaciones en las calderas debido a la presencia de calcio y magnesio que son los responsables de aguas duras; para ese tipo de casos la mejor recomendación sería implementar resinas de intercambio iónico cargadas con iones de sodio (Na⁺) donde el agua dura pasa a través de la resina, los iones de calcio y magnesio se intercambian por los iones de sodio, eliminando los minerales responsables de la dureza. Este es el método más común y efectivo para la reducción de la dureza del agua, ya que produce agua blanda ideal para sistemas de calderas y su mantenimiento solo requiere de una regeneración periódica de la resina con sal. (Powerhouse. (s.f).

Con respecto a los valores que registran de oxígeno disuelto se debe entrar a evaluar las razones que pueden elevar las concentraciones en el agua como lo puede ser el enfriamiento del vapor

que cuando se condensa, puede disolver gases del aire, incluyendo oxígeno, especialmente si hay una baja presión o temperatura en el sistema. (Nalco,2009).

También se debe entrar a revisar si el sistema no está completamente sellado, puede haber infiltración de aire que introduce oxígeno disuelto en el agua de condensado, otro aspecto a evaluar es la oxidación de los materiales de la tubería, lo cual se vuelve un bucle ya que a mayor concentración de oxígeno disuelto mayor oxidación, y una tubería con oxidación aumenta la presencia de óxidos en el agua. (Nalco,2009).

Fase 3: Propuesta para el aumento de la eficiencia energética de la caldera mediante un sistema de recirculación de condensados.

Al finalizar la fase 1 y 2 establecidas anteriormente, se procedió al planteamiento de un sistema de mejora de eficiencia energética por medio de la implementación de un proceso de recirculación de condensados que minimicen los consumos hídricos y energéticos y además reduzca los costos de inversión por servicios.

Para dimensionar el sistema de tubería con aislamiento térmico que garantice la menor pérdida de energía del agua de los condensados para ser recirculados a la entrada de la caldera se tomaron los datos registrados en la tabla 11 necesarios para realizar el balance de energía.

Tabla 11. Datos para el sistema de recirculación de condensados

Longitud de tubería de acero al carbón (m)	93
Diámetro interno (in)	4,163
Espesor tubería (cm)	0,856
Caudal de condensados (kg/s)	0,127
Conductividad de tubería de acero al carbón(W/(m*°k))	50
Conductividad de aislante de poliuretano expandido (W/(m*°k))	0,024
Conductividad de protector de aislante (Aluminio térmico de 0,5 mm)	270
Temperatura sobre el protector de aislante (°C)	15
Temperatura de agua al ingreso de la tubería de recirculación de condensados (°C)	60
Menor temperatura del tanque de condensados para realizar la simulación en Visual Basic (°C)	56
Mayor temperatura del tanque de condensados para realizar la simulación en Visual Basic (°C)	59

Fuente: Autora

Se definió una longitud de tubería de 93 m con la ayuda de AutoCAD (mapa disponible en el anexo B) donde con un mapa base de la planta, se trazó el recorrido por el cual se podría ubicar la tubería para el transporte de los condensados tal como se muestra en la figura 12 demarcado en color amarillo; con la ruta ya trazada se acotaron las distancias del recorrido la cuál indicó una sumatoria de 93m desde la salida de los condensados tanto en UHT como en fermentados, hasta el punto donde quedaría ubicada la recirculación del condensado de la caldera 2.



Figura 12. Plano recorrido de la tubería de recirculación del condensado. Fuente: Autora

Para determinar el diámetro y material que se podría utilizar en la tubería se decidió mantener la referencia de las tuberías ya usadas en la planta para los demás procesos, esto con la intención que permita brindar una misma sintonía de insumos y repuestos en la planta; esta corresponde a tubería de 4 pulgadas de acero al carbón cedula 80. Para saber el diámetro exacto de esta se recurrió a la tabla estándar de medidas que se muestra en la figura 13 donde con la medida nominal de 4 pulgadas se restaba a la media real de la tubería el espesor de pared del tubo y se obtenía el valor exacto del primer diámetro. (tabla completa en el anexo C)

Diámetro Nominal		Diámetro Exterior		Espesor de Pared		Identificación		Peso del Tubo		Área de La Superficie Exterior en mt2 por metro lineal de tubería
NPS	DN	Real		Pulgadas	Milímetros	Weight	Schedule	lb/pie	kg/m	
Pulgadas in.	Milímetros mm.	(in.)	mm.	(in.)	(mm.)	Class				
				0.125	3.18	-	-	5.84	8.71	0.359
				0.156	3.96	-	-	7.24	10.78	
				0.188	4.78	-	-	8.66	12.91	
				0.219	5.56	-	-	10.01	14.91	
				0.237	6.02	STD	40	10.79	16.07	
4	100	4.500	114.30	0.250	6.35	-	-	11.35	16.90	
				0.281	7.14	-	-	12.66	18.87	
				0.312	7.92	-	-	13.98	20.78	
				0.337	8.56	XS	80	14.98	22.32	
				0.438	11.13	-	120	19.00	28.32	
				0.531	13.49	-	160	22.51	33.54	
				0.674	17.12	XXS	-	27.54	41.03	

Figura 13. Relación diámetro nominal con diámetro real y espesor de pared. Fuente: Vemacero

la información con respecto al caudal del condensado en estas áreas se tomó de los registros consignados por el área de servicios industriales donde tenían por media un caudal de 0,127 kg/s.

Para la determinación del espesor del aislante, se realizó una simulación mediante programación en Visual Basic variando la temperatura de salida del agua de recirculación de condensados, de tal manera que, a menor pérdida de temperatura a través de la tubería, se requiere mayor espesor de aislante.

Se seleccionó como aislante poliuretano expandido por tener una conductividad térmica muy baja (0,024 W/(m*|°K), permitiendo conservar la mayor parte de la energía térmica del agua que fluye por una tubería de 93 m de longitud. Esta longitud fue determinada a partir del plano generado en Autocad con los datos de distancias tomados en la planta.

Determinación analítica del espesor del aislante y de la temperatura sobre el aislante:

La determinación del calor que pierde el agua cuando fluye por la tubería de recirculación de condensados, se determina mediante la siguiente ecuación:

$$Q_{cond} = \dot{m} * C_{p_{agua}} * (T_A - T_B)$$

Donde:

Q_{cond} es el calor que pierde el agua desde la temperatura de entrada a la tubería (T_A) hasta la temperatura de salida de la tubería (T_B), en W.

\dot{m} es el flujo o caudal másico del agua de los condensados (0,127 Kg/s)

$C_{p_{agua}}$ es el calor específico del agua líquida (4184 J/(Kg*°C).

T_A es la temperatura de entrada del agua a la tubería de recirculación (60°C)

T_B es la temperatura de salida del agua de la tubería de recirculación que se simulará desde 56°C hasta 59°C en el programa.

A continuación, se presenta la determinación del calor perdido por el agua para una temperatura $T_B = 59\text{ }^\circ\text{C}$

$$Q_{cond} = \dot{m} * C_{p_{agua}} * (T_A - T_B)$$

$$Q_{cond} = 0,127 \frac{kg}{s} * 4184 \frac{J}{kg^\circ C} * (60\text{ }^\circ\text{C} - 59\text{ }^\circ\text{C})$$

$$Q_{cond} = 531,368\text{ W}$$

Para determinar el espesor del aislante, se utilizará la Ley de Fourier para transferencia de calor por conducción para cilindros en serie. El sistema de recirculación de condensados consta de 3 cilindros concéntricos como se muestra en la figura 14.

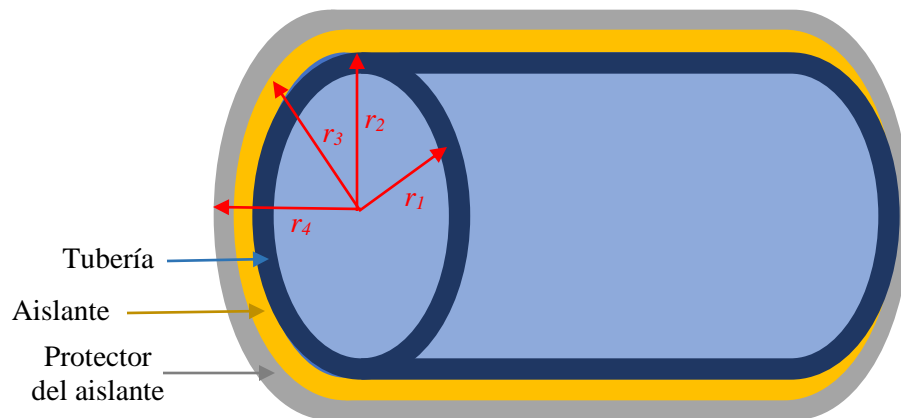


Figura 14. Sistema de recirculación de condensados. Fuente: Autora

r_1 : radio interno de la tubería de recirculación de condensados (5,287 cm.)

r_2 : radio interno de la tubería de recirculación de condensados, cm.

r_3 : radio exterior del aislante a partir del centro de los cilindros concéntricos, cm.

r_4 : radio exterior del protector del aislante de aluminio térmico a partir del centro de los cilindros concéntricos, cm.

T_1 : temperatura promedio del agua de los condensados, $^\circ\text{C}$. Corresponde al promedio entre T_A y T_B .

T_2 : temperatura promedio del agua de los condensados, $^\circ\text{C}$

T_3 : temperatura promedio del agua de los condensados, $^\circ\text{C}$

T_4 : temperatura exterior sobre el protector del aislante, 15°C debido a que se toma ligeramente mayor que la temperatura promedio ambiente de Chía que es 13°C .

K_1 : conductividad térmica del acero al carbón que corresponde al material de la tubería, $\text{W}/(\text{m}^\circ\text{K})$.

K_2 : conductividad térmica del aislante de poliuretano expandido ($0,024\text{ W}/(\text{m}^\circ\text{K})$).

K_3 : conductividad térmica del protector del aislante de aluminio térmico ($270\text{ W}/(\text{m}^\circ\text{K})$).

La ecuación correspondiente a la Ley de Fourier de transferencia de calor por conducción para cilindros en serie es la siguiente (Yunus Cengel. Transferencia de calor y masa):

$$Q_{cond} = \frac{T_1 - T_4}{R1 + R2 + R3}$$

Donde R1, R2 y R3 son las resistencias a la transferencia de calor por conducción desde el interior de la tubería, a través de cada uno de los materiales del acero al carbón, el aislante y el protector, hasta el exterior.

$$R = \frac{\ln\left(\frac{r_{externo}}{r_{interno}}\right)}{2 * \pi * L * K_{material}}$$

La resistencia R1 corresponde a la del acero, R2 a la del aislante y R3 a la del protector. De estas, la mayor y de elevada significancia es la del aislante, debido a que su baja conductividad genera una elevada resistencia al flujo de calor. Por el contrario, la resistencia al flujo de calor R3 del protector del aislante, al ser de aluminio térmico con elevada conductividad genera una resistencia insignificante que puede omitirse del denominador por ser del orden de millonésimas, mientras que la resistencia del aislante es del orden de centésimas. Por consiguiente, se puede omitir R3 en el denominador de la siguiente ecuación:

$$Q_{cond} = \frac{T_1 - T_4}{\frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2 * \pi * L * K_1} + \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2 * \pi * L * K_2}}$$

$$T_1 = \frac{TA + TB}{2}$$

$$T_1 = \frac{60\text{ }^\circ\text{C} + 59\text{ }^\circ\text{C}}{2}$$

$$T_1 = 59,5\text{ }^\circ\text{C}$$

$$r_1 = 2,0815\text{ in} * \frac{2,54\text{ cm}}{1\text{ in}}$$

$$r_1 = 5,287\text{ cm}$$

$$r_2 = r_1 + \text{espesor}$$

$$r_2 = 5,287\text{ cm} + 0,856\text{ cm}$$

$$r_2 = 6,143\text{ cm}$$

$$Q_{cond} = \frac{T_1 - T_4}{\frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2 * \pi * L * K_1} + \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2 * \pi * L * K_2}}$$

$$r_3 = r_2 * e^{\left[\left(\frac{T_1 - T_4}{Q_{cond}} - \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2 * \pi * L * K_1}\right) * 2 * \pi * L * K_2\right]}$$

$$r_3 = 6,143 \text{ cm} * e^{\left[\left(\frac{59,5^\circ\text{C} - 15^\circ\text{C}}{531,368 \text{ W}} - \frac{\ln\left(\frac{6,143 \text{ cm}}{5,287 \text{ cm}}\right)}{2 * \pi * 93 \text{ m} * 50 \text{ W/mK}}\right) * 2 * \pi * 93 \text{ m} * 0,024 \text{ W/mK}\right]}$$

$$r_3 = 19,879 \text{ cm}$$

$$\text{Espesor aislante} = r_3 - r_2$$

$$\text{Espesor aislante} = 19,879 \text{ cm} - 6,143 \text{ cm}$$

$$\text{Espesor aislante} = 13,736 \text{ cm}$$

La determinación de la temperatura T3 sobre el aislante tomando una temperatura TB de 59°C usando nuevamente la ley de Fourier se muestra a continuación:

$$Q_{cond} = \frac{T_1 - T_3}{\frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2 * \pi * L * K_1} + \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2 * \pi * L * K_2}}$$

$$T_3 = T_1 - Q_{cond} \left(\frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2 * \pi * L * K_1} + \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2 * \pi * L * K_2} \right)$$

$$T_3 = 59,5^\circ\text{C} - 531,368 \text{ W} \left(\frac{\ln\left(\frac{6,143 \text{ cm}}{5,287 \text{ cm}}\right)}{2 * \pi * 93 \text{ m} * 50 \text{ W/mK}} + \frac{\ln\left(\frac{19,879 \text{ cm}}{6,143 \text{ cm}}\right)}{2 * \pi * 93 \text{ m} * 0,024 \text{ W/mK}} \right)$$

$$T_3 = 15,00014^\circ\text{C}$$

Se observa que la temperatura T3 obtenida de 15°C sobre el espesor del aislante es muy cercana a la temperatura externa sobre el sistema de recirculación de condensados, lo que muestra que el aislante separa la zona de mayor temperatura de 59,5°C del exterior a temperatura ambiente por su baja conductividad térmica.

Con el fin de comprobar que los resultados de la ejecución del programa corresponden con los obtenidos analíticamente a partir de las ecuaciones de transferencia de calor, a continuación, se muestra la determinación del espesor del aislante para una temperatura TB de 56°C que representa una pérdida de temperatura de 4°C de los condensados a través del sistema de recirculación con aislamiento térmico:

$$Q_{cond} = \dot{m} C p_{agua} (T_A - T_B)$$

$$Q_{cond} = 0.127 \frac{kg}{s} * 4184 \frac{J}{kg^{\circ}C} * (60^{\circ}C - 56^{\circ}C)$$

$$Q_{cond} = 2125,472 W$$

$$T_1 = \frac{60^{\circ}C + 56^{\circ}C}{2}$$

$$T_1 = 58^{\circ}C$$

$$r_1 = 2,0815 in * \frac{2.54 cm}{1 in}$$

$$r_1 = 5,287 cm$$

$$r_2 = r_1 + \text{espesor}$$

$$r_2 = 5,287 cm + 0.856 cm$$

$$r_2 = 6,143 cm$$

$$Q_{cond} = \frac{T_1 - T_4}{\frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2 * \pi * L * K_1} + \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2 * \pi * L * K_2}}$$

$$r_3 = r_2 * e^{\left[\left(\frac{T_1 - T_4}{Q_{cond}} - \frac{\ln(r_2/r_1)}{2 * \pi * L * K_1}\right) * 2 * \pi * L * K_2\right]}$$

$$r_3 = 6,143 cm * e^{\left[\left(\frac{58^{\circ}C - 15^{\circ}C}{2125,472 W} - \frac{\ln(6,143 cm / 5,287 cm)}{2 * \pi * 93 m * 50 W/mK}\right) * 2 * \pi * 93 m * 0.024 W/mK\right]}$$

$$r_3 = 8,158 cm$$

$$\text{Espesor aislante} = r_3 - r_2$$

$$\text{Espesor aislante} = 8,158 cm - 6,143 cm$$

$$\text{Espesor aislante} = 2,014 cm$$

De igual manera como se halló la temperatura T3 para el espesor del aislante con 59°C se repite el procedimiento, pero esta vez asumiendo la temperatura Tb de 56°C

$$Q_{cond} = \frac{T_1 - T_3}{\frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2 * \pi * L * K_1} + \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2 * \pi * L * K_2}}$$

$$T_3 = T_1 - Q_{cond} \left(\frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2 * \pi * L * K_1} + \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2 * \pi * L * K_2} \right)$$

$$T_3 = 58^\circ\text{C} - 2125,472\text{ W} \left(\frac{\ln\left(\frac{6,143\text{ cm}}{5,287\text{ cm}}\right)}{2 * \pi * 93\text{ m} * 50\text{ W/mK}} + \frac{\ln\left(\frac{8,158\text{ cm}}{6,143\text{ cm}}\right)}{2 * \pi * 93\text{ m} * 0.024\text{ W/mK}} \right)$$

$T_3 = 14,994^\circ\text{C}$

Al igual que en el primer ejercicio se visualiza que la temperatura T3 obtenida de 14,994°C sobre el espesor del aislante es muy cercana a la temperatura externa sobre el sistema de recirculación de condensados, lo que demuestra que no se requiere de un espesor tan alto como el del primer ejercicio de 13,736 cm para que el aislante cumpla con la función de mantener la notable diferencia entre la temperatura al interior de la tubería con la del exterior del sistema.

Simulación mediante programación en Visual Basic para simular el espesor del aislante en función de la temperatura de salida del agua del sistema de recirculación de condensados.

El programa para la simulación del espesor del aislante en función de la temperatura de salida del agua del sistema de recirculación de condensados, se muestra a continuación y la ejecución en Visual Basic se presenta en el Anexo D:

Function Proyecto()

Dim W As Integer

Dim L, D, es, C, K1, K2, K3, T4, Ta, Tb1, Tb2, pi, r1, r2, Tb, Qcond, T1, r3, espais As Double

L = InputBox("Digite la longitud de la tubería en metros [m]")

D = InputBox("Digite el diámetro interior de la tubería en pulgadas [in]")

es = InputBox("Digite el espesor de la tubería en centímetros [cm]")

C = InputBox("Digite el caudal dentro de la tubería [kg/s]")

K1 = InputBox("Digite la conductividad de la tubería [W/m*K]")

K2 = InputBox("Digite la conductividad del aislante [W/m*K]")

K3 = InputBox("Digite la conductividad del protector del aislante [W/m*K]")

T4 = InputBox("Digite la temperatura sobre el protector del aislante en grados centígrados [°C]")

Ta = InputBox("Digite la temperatura de agua al ingresar en grados centígrados [°C]")

Tb1 = InputBox("Digite la primera temperatura del tanque de condensados en grados centígrados [°C]")

Tb2 = InputBox("Digite la última temperatura del tanque de condensados en grados centígrados [°C]")

Worksheets("Hoja2").Cells(1, 1).Value = "Datos ingresados"

Worksheets("Hoja2").Cells(2, 1).Value = "Longitud de tubería [m]"

Worksheets("Hoja2").Cells(3, 1).Value = "Diametro interno [in]"

Worksheets("Hoja2").Cells(4, 1).Value = "Espesor tubería [cm]"

Worksheets("Hoja2").Cells(5, 1).Value = "Caudal [kg/s]"

Worksheets("Hoja2").Cells(6, 1).Value = "Conductividad de tubería [W/m*K]"

Worksheets("Hoja2").Cells(7, 1).Value = "Conductividad de aislante [W/m*K]"

Worksheets("Hoja2").Cells(8, 1).Value = "Conductividad de protector de aislante [W/m*K]"

Worksheets("Hoja2").Cells(9, 1).Value = "Temperatura sobre el protector de aislante [°C]"

```
Worksheets("Hoja2").Cells(10, 1).Value = "Temperatura de agua al ingreso [°C]"
Worksheets("Hoja2").Cells(11, 1).Value = "Primera temperatura del tanque de condensados [°C]"
Worksheets("Hoja2").Cells(12, 1).Value = "Ultima temperatura del tanque de condensados [°C]"
Worksheets("Hoja2").Cells(2, 2).Value = CDbI(Format(L, "000.000"))
Worksheets("Hoja2").Cells(3, 2).Value = CDbI(Format(D, "000.000"))
Worksheets("Hoja2").Cells(4, 2).Value = CDbI(Format(es, "000.000"))
Worksheets("Hoja2").Cells(5, 2).Value = CDbI(Format(C, "000.000"))
Worksheets("Hoja2").Cells(6, 2).Value = CDbI(Format(K1, "000.000"))
Worksheets("Hoja2").Cells(7, 2).Value = CDbI(Format(K2, "000.000"))
Worksheets("Hoja2").Cells(8, 2).Value = CDbI(Format(K3, "000.000"))
Worksheets("Hoja2").Cells(9, 2).Value = CDbI(Format(T4, "000.000"))
Worksheets("Hoja2").Cells(10, 2).Value = CDbI(Format(Ta, "000.000"))
Worksheets("Hoja2").Cells(11, 2).Value = CDbI(Format(Tb1, "000.000"))
Worksheets("Hoja2").Cells(12, 2).Value = CDbI(Format(Tb2, "000.000"))
```

```
pi = 4 * Atn(1)
r1 = (D / 2) * 2.54
r2 = r1 + es
W = 2
```

For Tb = Tb1 To Tb2 Step 0.1

```
Qcond = C * 4184 * (Ta - Tb)
```

```
T1 = (Ta + Tb) / 2
```

```
r3 = r2 * Exp((((T1 - T4) / Qcond) - ((Log(r2 / r1)) / (2 * pi * L * K1)))) * (2 * pi * L * K2))
```

```
espais = r3 - r2
```

```
Worksheets("Hoja1").Cells(1, 1).Value = "Tb"
```

```
Worksheets("Hoja1").Cells(1, 2).Value = "r3"
```

```
Worksheets("Hoja1").Cells(1, 3).Value = "Espesor aislante"
```

```
Worksheets("Hoja1").Cells(W, 1).Value = CDbI(Format(Tb, "000.000"))
```

```
Worksheets("Hoja1").Cells(W, 2).Value = CDbI(Format(r3, "000.000"))
```

```
Worksheets("Hoja1").Cells(W, 3).Value = CDbI(Format(espais, "000.000"))
```

```
W = W + 1
```

```
Next Tb
```

```
End Function
```

A partir de la ejecución del programa, se obtiene la siguiente tabla de resultados:

Tabla 12. Espesor del aislante en función de la temperatura de salida del agua del sistema de condensados

56	8,158	2,015
56	8,158	2,015
56,1	8,22	2,077

56,2	8,286	2,143
56,3	8,356	2,213
56,4	8,431	2,288
56,5	8,511	2,368
56,6	8,597	2,454
56,7	8,688	2,545
56,8	8,786	2,643
56,9	8,892	2,749
57	9,006	2,863
57,1	9,13	2,987
57,2	9,265	3,122
57,3	9,411	3,268
57,4	9,572	3,429
57,5	9,748	3,605
57,6	9,943	3,8
57,7	10,16	4,017
57,8	10,401	4,258
57,9	10,672	4,529
58	10,978	4,835
58,1	11,326	5,183
58,2	11,727	5,584
58,3	12,191	6,048
58,4	12,735	6,592
58,5	13,381	7,238
58,6	14,159	8,016
58,7	15,114	8,971
58,8	16,31	10,167
58,9	17,845	11,702
59	19,879	13,736

Fuente: Autora

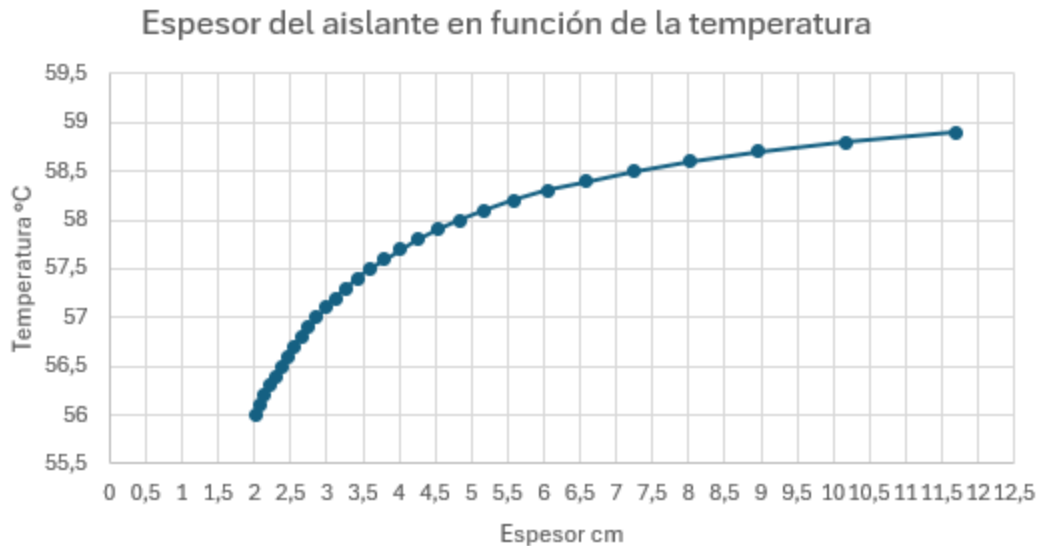


Figura 15. Espesor del aislante en función de la temperatura de salida del agua del sistema de condensados. Fuente: Autora

Se observa en la gráfica 1 que la temperatura de salida del agua de los condensados tiende a un valor constante después de 5,5 cm de espesor de aislante, lo que significa que a pesar de que se incrementa excesivamente el espesor de este, no cambia significativamente esta temperatura.

Se seleccionó un espesor de aislante de 3 cm que en contraste con los resultados del programa es pequeño, genera una pérdida de temperatura de 60°C a 57,1°C que es relativamente baja, permitiendo la conservación de la mayor parte de la energía calórica del agua de los condensados a través del sistema de recirculación.

Determinación del ahorro de energía que consume la caldera por la recirculación de condensados:

Para determinar el aumento de la eficiencia energética de la caldera por la implementación de recirculación de condensados, se determina el ahorro del calor que consume la caldera para producir vapor a partir de los condensados, mediante la siguiente ecuación:

Calor en la caldera con recirculación de condensados

$$\dot{Q}_c = \dot{m} * (h_2 - h_1)$$

Donde:

\dot{m} : Es el flujo o caudal másico del agua de los condensados (0,127 Kg/s)

h_2 : Entalpia del vapor de salida.

h_1 : Entalpia del agua de alimentación

Para determinar h_1 , con recirculación de condensados se utilizan las tablas termodinámicas de agua saturada ya que este es el estado del fluido en el punto B y con una temperatura de 57,1 °C. Para esto, se encuentran datos de temperatura de 50 y 75 °C por lo que es necesario interpolar.

Tabla 13. Interpolación para entalpía del agua de alimentación

Entalpía (kJ/kg)	
Temperatura (°C)	h_f – Líquido saturado
50	340,54
57,1	353,007
75	384,44

Fuente: Autora

$$h_1 = 353,007 \frac{kJ}{kg}$$

Para determinar h_2 , se utilizan las tablas termodinámicas de vapor saturado con una presión de 8,3 bar. Para esto, se encuentran datos de presión de 8 y 8.5 MPa por lo que es necesario interpolar con la entalpía.

Tabla 14. Interpolación para entalpía del agua de alimentación

P (bar)	h_2 (KJ/kg)
8	2768,3
8,3	2769,5
8,5	2770,8

Fuente: Autora

$$h_2 = 2769,5 \frac{kJ}{kg}$$

Reemplazando en la ecuación

$$\dot{Q}_c = 0,127 \frac{kg}{s} * \left(2769,5 \frac{kJ}{kg} - 353,007 \frac{kJ}{kg} \right)$$

$$\dot{Q}_c = 306,89 \text{ kW}$$

Calor en la caldera sin recirculación de condensados

$$\dot{Q}_c = \dot{m} * (h_2 - h_1)$$

$$\dot{Q}_c = 0,127 \frac{kg}{s} * \left(2769,5 \frac{kJ}{kg} - h_1 \right)$$

Sin recirculación de condensados, la temperatura a la que ingresa el agua a la caldera es de 15 °C la cual corresponde a la temperatura en el tanque sin precalentamiento. Directamente se busca esa temperatura en las tablas termodinámicas de agua saturada sin necesidad de interpolar, siendo así:

$$h_1 = 62.982 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{Q}_c = 0,127 \frac{kg}{s} * \left(2769,5 \frac{kJ}{kg} - 62,982 \frac{kJ}{kg} \right)$$

$$\dot{Q}_c = 343,727 kW$$

Aumento en la eficiencia de la caldera

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{c_{sinrecirc}} - \dot{Q}_{c_{conrecirc}}}{\dot{Q}_{c_{sinrecirc}}} * 100$$

$$\eta = \frac{343,727 kW - 306,89 kW}{343,727 kW} * 100$$

$$\eta = 10.71 \%$$

Con el proceso de recirculación de los condensados, se aumenta en un 10,71 % la eficiencia energética de la caldera.

Cálculo del ahorro de energía estimado

Según los registros del primer semestre del año 2023 en la planta se consumen en promedio $7.255 m^3/dia$ de gas natural. Si se contempla la operación durante 30 días por un valor promedio para el primer semestre de $1.398,78 \$ / m^3$.

$$Gasto\ mes = 1.398,78 \frac{\$}{m^3} * 7.255 \frac{m^3}{dia} * 30\ dia$$

$$Gasto\ mes = 304'444.467 \frac{\$}{mes}$$

Si se tiene en cuenta una disminución del 10,71% del consumo de gas el ahorro en dinero aproximado sería:

$$ahorro = \frac{304'444.467 \frac{\$}{mes} * 10,71}{100} = 32'606.002 \frac{\$}{mes}$$

CONCLUSIONES

La implementación de un sistema de recirculación de condensados en la línea de distribución de vapor de la caldera 2 representaría una mejora en la eficiencia superior al 10%, lo cual representaría un ahorro que puede superar los 30'000.000 \$ mensuales por consumo de gas natural dentro de la planta.

Para garantizar que el sistema pueda funcionar de manera adecuada es prioridad incorporar un sistema de tratamiento tanto del agua de alimentación como la de los condensados debido a la presencia de dureza que genera incrustaciones y el nivel de pH por debajo del rango permitido que favorece la presencia de metales en el agua que también generan incrustaciones.

La recuperación de 0,127 kg/s del agua de condensados también representa un beneficio en la PTAR de la planta ya que se estaría reduciendo el volumen de ingreso de agua a tratar en esta, lo cual agilizaría los procesos de tratamiento y también amplía la posibilidad de estudiar el ahorro en costos de tratamiento al reducir el volumen del agua de entrada con temperaturas elevadas características de los condensados.

La simulación en Visual Basic demostró que, aunque se maneje una variación del radio del aislante de un rango entre 1cm y 10cm esta no es directamente proporcional con la pérdida de temperatura, ya que se pudo observar que manejando un espesor de tan solo 3 cm las pérdidas de calor son de apenas 2,9°C.

RECOMENDACIONES

Para el tratamiento de agua de alimentación de la caldera se recomienda la implementación de resinas de intercambio iónico cargadas con iones de sodio acompañada de un adecuado mantenimiento por medio de una regeneración periódica de la resina con sal para reducir las concentraciones de dureza en el agua ya que se presentan como la opción más económica y fácil de implementar en las industrias

De igual manera también resulta importante entrar a revisar dentro de las líneas de alimentación del agua y distribución de vapor si estas presentan algún tipo de fuga o espacio que permite que el oxígeno se cole y aumente las concentraciones de oxígeno disuelto en el agua; acompañado con esto se puede estudiar la posibilidad de implementar un agente secuestrante de oxígeno que permita bajar los niveles de concentración lo más cercano a cero.

REFERENCIAS

Aceituno, D. S. (2011). Eficiencia energética en el sector industrial. Madrid, España: Universidad Carlos de Madrid III.

American Society of Mechanical Engineers. (2020). *Boiler and Pressure Vessel Code (BPVC)*. ASME.

Ang, B. W., & Choong, W. L. (2011). Energy security: Definitions, dimensions and indexes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 233-244.

Bautista, E. V. P. (2017). Aumento en la eficiencia energética en las calderas mediante la recirculación de condensados en la industria Gloria Colombia planta Cogua (Cundinamarca), Bogotá D.C, Colombia.

Cabrera Narváez, A. F., & Castaño Garzón, J. M. (2003). Plan de mejoramiento del proceso productivo de Parmalat Colombia Ltda. Planta Chía. Ingeniería Química.

Calle, G., & Pozo, C. (2016). Producción más Limpia y Eficiencia Energética en una Industria de Lácteos.

Camarán, M. L., Baron, L., & Rueda, M. P. (2011). la responsabilidad social empresarial y los objetivos del desarrollo sostenible (ods). Teorías, Enfoques y Aplicaciones de las Ciencias Sociales (TEACS).

Cengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2007). Transferencia de calor y masa (Vol. 53). McGraw-Hill Interamericana.

Chambers, A. & Nakicenovic, N. (2008). World Energy Outlook 2008. Paris: IEA/OECD. ISBN 978-92-64-04560-6.

Consejería de Economía y Hacienda, Organización Dirección General de Industria, Energía y Minas. (2013). Guía Básica de Calderas Industriales Eficientes. Madrid: Fenercom.

Divas Reynosa, B. (2020). Implementación de un sistema de control de parámetros fisicoquímicos del agua de alimentación de una caldera pirotubular, en una industria procesadora de alimentos (Doctoral dissertation, Universidad de San Carlos de Guatemala).

Duran Juárez, J. M., & Torres Rodríguez, A. (2006). Los problemas del abastecimiento de agua potable en una ciudad media, Guadalajara.

Escobar Rojas, A. F. (2019). Propuesta de un modelo de gestión y control para el abastecimiento de materias primas e insumos para la planta de Parmalat en Chía. Universidad de Ibagué

Galeano Orozco, P. A. (2020). Gestión del agua en la industria alimentaria como estrategia empresarial para disminuir la huella hídrica generada en el desarrollo de su actividad económica.

Ganapathy, V. (2003). Industrial Boilers and Heat Recovery Steam Generators: Design, Applications, and Calculations. CRC Press.

Golato, M. A., Franck Colombres, F. J., Aso, G., Correa, C. A., & Paz, D. (2008). Metodología de cálculo de la eficiencia térmica de generadores de vapor. Revista industrial y agrícola de Tucumán, 85(2), 17-31.

Gordillo Ayala, V. H. (2022). Estrategias para la optimización del uso del agua en una fábrica de azúcar de caña.

Gutiérrez, S. A. (2019). Formulación de alternativas de producción más limpia para la planta de beneficio de Avidesa Mac Pollo S.A.

Hernández, A. (2007). Ahorro y uso eficiente del recurso agua en una empresa del sector de aceites y grasas vegetales de Bogotá. Bogotá: Universidad de La Salle, Facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria.

Industrial Water Treatment: A Comprehensive Guide. (s.f.).

International Energy Agency (IEA). (2015). Energy Efficiency Market Report 2015. OECD/IEA.)

International Association for the Properties of Water and Steam. (2019). *Guidelines on the treatment of water in industrial boilers*. IAPWS.

Landi Quevedo, A. (2020). Propuesta De Procedimiento De Seguridad Para Realizar Mantenimiento Preventivo Del Área De Calderas De Una Cervecería Ubicada En El Norte De Quito. Universidad Internacional SEK.

Lekkerkerker. (s.f.). Tetra Therm Aseptic. Lekkerkerker.

Lucas, S. M., & García, R. S. (2018). El agua en la industria alimentaria. Boletín de la Sociedad Española de Hidrología Médica.

Ministerio de minas y energía. (2023). Resolución 40773. nuevo Reglamento Técnico de Instalaciones Térmicas – RETSIT. Gobierno de Colombia 29 de diciembre.

Naciones Unidas. (2018). La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe.

Nalco Water Handbook. (2009). Oxygen removal in boiler feedwater.

Olaya Correa, S. (2020). La responsabilidad social empresarial y los Objetivos de Desarrollo Sostenible como complemento organizacional.

Pandey, A., & Asif, M. (2022). Assessment of energy and environmental sustainability in South Asia in the perspective of the Sustainable Development Goals. *Renewable and sustainable energy reviews*, 165, 112492.

Plappally, A. K. (2012). Energy requirements for water production, treatment, end use, reclamation, and disposal. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.

Pérez-Reyes, M. E., & Sosa-Morales, M. E. (2013). Mecanismos de transferencia de calor que ocurren en tratamientos térmicos de alimentos. *Temas selectos de Ingeniería de alimentos*, 7(1), 37-47.

Powerhouse. (s.f.). *Industrial boiler water treatment basics*. Powerhouse Boiler Equipment.

Rodríguez Rugeles, H. A. (2023). Monitoreo de parámetros de calidad de condensado recuperado de proceso en una unidad de agua cruda en una refinería.

Ruiz Román, K. L. (2018). Validación De Métodos De Ensayo Para Determinación de pH, Conductividad, Sólidos Sedimentables, Sólidos

ANEXOS

Anexo 1

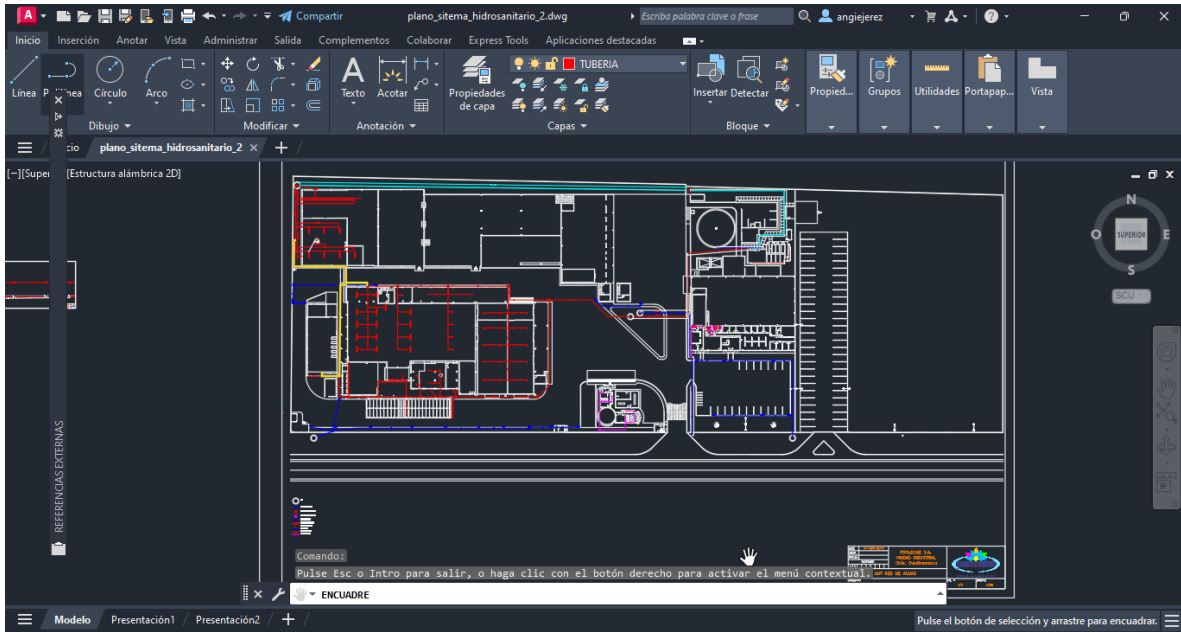
Muestra los valores obtenidos diariamente en el muestreo de cada parámetro de la calidad del agua de alimentación de la caldera y la salida de los condensados.

		PROGRAMA ABASTECIMIENTO DE AGUA							
		AGUA DE ALIMENTACIÓN				AGUA DE CONDENSADOS			
FECHA	pH	Dureza	Alcalinidad	Oxígeno disuelto	pH	Dureza	Alcalinidad	Oxígeno disuelto	
1 de diciembre de 2022	6,9	69,0	21,0	6,1	7,4	59,0	27,0	0,8	
2 de diciembre de 2022	7,1	61,0	20,0	6,4	7,2	13,0	11,0	0,0	
3 de diciembre de 2022	6,9	63,0	31,0	6,1	9,0	0,0	0,0	0,0	
4 de diciembre de 2022	7,0	90,0	30,0	6,8	6,8	29,0	25,0	4,3	
5 de diciembre de 2022	6,8	86,0	6,0	7,8	7,9	11,0	0,0	0,6	
6 de diciembre de 2022	7,0	73,0	21,6	6,6	8,9	22,0	12,0	1,1	
7 de diciembre de 2022	7,0	74,0	21,0	6,7	8,4	15,0	7,0	1,2	
8 de diciembre de 2022	6,9	73,0	24,0	6,5	6,9	14,0	21,0	4,8	
9 de diciembre de 2022	6,9	81,0	23,0	6,1	7,2	9,0	16,0	2,4	
10 de diciembre de 2022	7,0	87,0	28,0	6,4	7,3	6,0	9,0	2,1	
11 de diciembre de 2022	6,7	91,0	23,0	6,2	8,9	0,0	7,0	0,0	
12 de diciembre de 2022	7,1	78,0	20,0	6,1	8,7	0,0	0,0	0,0	
13 de diciembre de 2022	6,9	81,0	22,0	6,8	7,2	11,0	5,0	1,8	
14 de diciembre de 2022	6,9	80,0	21,0	6,5	7,9	9,0	22,0	1,6	
15 de diciembre de 2022	6,7	85,0	28,0	6,4	8,4	25,0	11,0	0,0	
16 de diciembre de 2022	6,7	88,0	30,0	6,3	9,1	0,0	0,0	0,0	

Anexo 1. Muestreo diario de parámetros

Anexo 2

Plano escalado de la distribución de tuberías en la planta en AutoCAD con la ruta propuesta para ubicar la tubería que podría transportar los condensados



Anexo 2. ruta propuesta en AutoCAD para ubicar la tubería que podría transportar los condensados.

Anexo 3

Tabla de las variaciones en los diámetros de la tubería acero al carbón



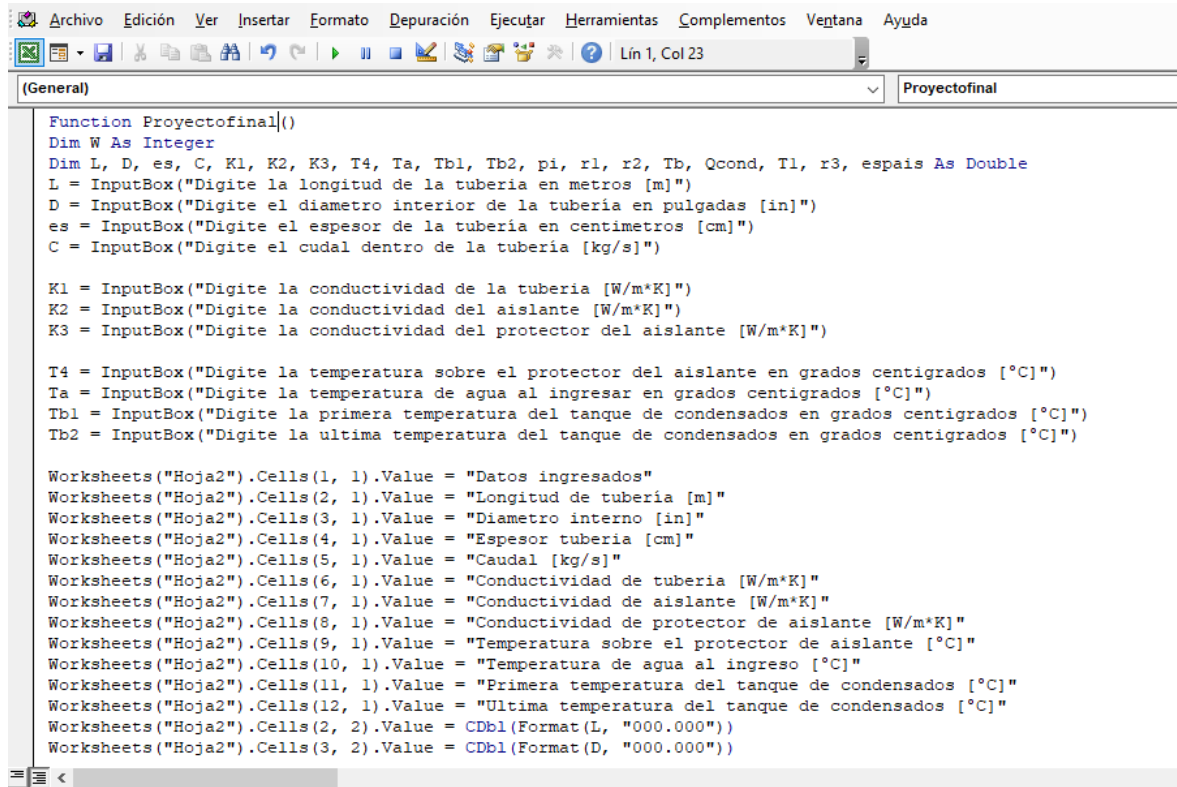
TUBERIA DE ACERO AL CARBONO ASIM A53 / A106 Area de La Superficie del Tubo

Diámetro Nominal NPS		Diámetro Exterior Real		Espesor de Pared		Identificación		Peso del Tubo		Área de La Superficie Exterior en m2 por metro lineal de tubería
Pulgadas in.	Milímetros mm.	(in.)	mm.	Pulgadas (in.)	Milímetros (mm.)	Weight Class	Schedule	lb/pie	kg/m	
1/2	15	0.840	21.3	0.109	2.77	STD	40	0.85	1.27	0.067
				0.147	3.73	XS	80	1.09	1.62	
3/4	20	1.050	26.7	0.113	2.87	STD	40	1.13	1.69	0.084
				0.154	3.91	XS	80	1.47	2.20	
1	25	1.315	33.4	0.133	3.38	STD	40	1.68	2.50	0.105
				0.179	4.55	XS	80	2.17	3.24	
1-1/4	32	1.660	42.2	0.140	3.56	STD	40	2.27	3.39	0.132
				0.191	4.85	XS	80	3.00	4.47	
1-1/2	40	1.900	48.3	0.145	3.68	STD	40	2.72	4.05	0.152
				0.200	5.08	XS	80	3.63	5.41	
2	50	2.375	60.3	0.154	3.91	STD	40	3.65	5.44	0.190
				0.218	5.54	XS	80	5.02	7.48	
2-1/2	65	2.875	73.03	0.203	5.16	STD	40	5.79	8.63	0.229
				0.276	7.01	XS	80	7.66	11.41	
				0.375	9.52	-	160	-	-	
				0.552	14.02	XXS	-	-	-	
3	80	3.500	88.90	0.125	3.18	-	-	4.51	6.72	0.279
				0.156	3.96	-	-	5.57	8.29	
				0.188	4.78	-	-	6.65	9.92	
				0.216	5.49	STD	40	7.58	11.29	
				0.250	6.35	-	-	8.68	12.93	
				0.281	7.14	-	-	9.66	14.40	
0.300	7.62	XS	80	10.25	15.27					

Anexo 3. Tabla de las variaciones en los diámetros de la tubería acero al carbón

Anexo 4

Código de la simulación en Excel de Visual Basic para calcular el espesor del aislante



```
Function ProyectoFinal()  
Dim W As Integer  
Dim L, D, es, C, K1, K2, K3, T4, Ta, Tbl, Tb2, pi, r1, r2, Tb, Qcond, Tl, r3, espais As Double  
L = InputBox("Digite la longitud de la tubería en metros [m]")  
D = InputBox("Digite el diametro interior de la tubería en pulgadas [in]")  
es = InputBox("Digite el espesor de la tubería en centímetros [cm]")  
C = InputBox("Digite el cudal dentro de la tubería [kg/s]")  
  
K1 = InputBox("Digite la conductividad de la tubería [W/m*K]")  
K2 = InputBox("Digite la conductividad del aislante [W/m*K]")  
K3 = InputBox("Digite la conductividad del protector del aislante [W/m*K]")  
  
T4 = InputBox("Digite la temperatura sobre el protector del aislante en grados centigrados [°C]")  
Ta = InputBox("Digite la temperatura de agua al ingresar en grados centigrados [°C]")  
Tbl = InputBox("Digite la primera temperatura del tanque de condensados en grados centigrados [°C]")  
Tb2 = InputBox("Digite la ultima temperatura del tanque de condensados en grados centigrados [°C]")  
  
Worksheets("Hoja2").Cells(1, 1).Value = "Datos ingresados"  
Worksheets("Hoja2").Cells(2, 1).Value = "Longitud de tubería [m]"  
Worksheets("Hoja2").Cells(3, 1).Value = "Diametro interno [in]"  
Worksheets("Hoja2").Cells(4, 1).Value = "Espesor tubería [cm]"  
Worksheets("Hoja2").Cells(5, 1).Value = "Caudal [kg/s]"  
Worksheets("Hoja2").Cells(6, 1).Value = "Conductividad de tubería [W/m*K]"  
Worksheets("Hoja2").Cells(7, 1).Value = "Conductividad de aislante [W/m*K]"  
Worksheets("Hoja2").Cells(8, 1).Value = "Conductividad de protector de aislante [W/m*K]"  
Worksheets("Hoja2").Cells(9, 1).Value = "Temperatura sobre el protector de aislante [°C]"  
Worksheets("Hoja2").Cells(10, 1).Value = "Temperatura de agua al ingreso [°C]"  
Worksheets("Hoja2").Cells(11, 1).Value = "Primera temperatura del tanque de condensados [°C]"  
Worksheets("Hoja2").Cells(12, 1).Value = "Ultima temperatura del tanque de condensados [°C]"  
Worksheets("Hoja2").Cells(2, 2).Value = CDb1(Format(L, "000.000"))  
Worksheets("Hoja2").Cells(3, 2).Value = CDb1(Format(D, "000.000"))
```

Anexo 4. Código de la simulación en Excel de Visual Basic