



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES
DE INGENIERÍA, PUEI**

**Diagnóstico energético del
sistema de vapor en una
fábrica de alimentos**

TESINA

Que para obtener el grado de

**Especialista en Ahorro y Uso Eficiente
de la Energía**

P R E S E N T A

Ing. Erika Lucía Martínez Obregón

DIRECTOR DE TESINA

M.I. Guillermo Sánchez Liévano



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2021



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos y dedicatoria

Dedico este trabajo a las víctimas mortales del COVID-19, en especial al señor Jesús González, cuyo apoyo para la elaboración de este trabajo es invaluable y a quien extrañaré toda la vida.

Gracias al proyecto CONACYT 246077 "Formación de recursos humanos para la sustentabilidad energética en la Facultad de Ingeniería de la UNAM", al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología y a la Especialidad en Ahorro y Uso de la Energía por los recursos facilitados para el desarrollo del presente estudio.

Agradezco infinitamente a mi madre por su fe en mí, su paciencia, su apoyo y su ejemplo. A mis hermanos y a mi padre por su apoyo. A José Luis por el acompañamiento técnico y emocional a lo largo de esta travesía. Esto no habría sido posible sin ustedes.

Gracias al Mtro. Guillermo Sánchez Liévano por los conocimientos compartidos, por el tiempo y empeño que puso para dirigir mi trabajo. Al ingeniero José Luis González y a los maestros Iván Urzua, Héctor Mora y Verónica Flores por las aportaciones de conocimientos y perspectivas. Al Mtro. Augusto Sánchez Cifuentes por la confianza y por todas las oportunidades que me ha brindado para continuar con mi formación profesional.

Gracias a todos los docentes de la especialidad, por sembrar en mí la semilla de la duda en cada uno de los temas vistos, por compartir sus conocimientos y su experiencia.

Contenido

Índice de figuras	5
Índice de tablas	6
Introducción	7
Planteamiento del problema	9
Justificación	9
Objetivo general.....	9
Objetivos particulares	9
Marco contextual	9
Situación actual	10
Capítulo I. Marco teórico conceptual.....	12
1.1 Eficiencia de una caldera.....	12
1.2 Eficiencia de combustión	15
1.3 Concepto de caballo caldera y derrateo de una caldera.....	16
1.4 Factor de evaporación.....	17
1.5 NOM – 085 – SEMARNAT – 2011.....	18
1.6 Purgas de superficie y de fondo.....	19
1.7 Proceso de pasteurización	20
1.8 Método CIP	21
Capítulo II. Desarrollo metodológico.....	24
2.1 Descripción del sistema.....	24
2.2 Información recopilada en sitio	25
2.3 Facturación	26

2.4 Usos y consumos del gas natural	28
2.5 Sistema de generación de vapor	31
2.5.1 Condiciones de operación	31
2.5.2. Agua de alimentación	34
2.5.3. Purgas en la caldera	36
2.5.4. Eficiencia de la caldera	37
2.5.5. Eficiencia de combustión de la caldera	37
2.5.6 Factor de evaporación	38
2.5.7 Derrateo de la caldera	39
2.5.8 Tuberías.....	40
2.6 Usos y consumos del vapor	46
2.6.1 Usos del vapor.....	46
2.6.2. Demanda de vapor por usuario.....	50
2.6.3. Perfil de consumo de vapor	54
Capítulo III. Propuestas de mejora	63
3.1 Indicadores del desempeño energético	63
3.2 Sustitución de caldera	64
3.3 Calibración de equipos de medición instalados	66
3.4 Reparación de la línea de retorno de condensados	66
3.5 Perfil de eficiencia de la caldera	67
3.6 Plan de seguimiento al desempeño energético	68
Capítulo IV. Conclusiones	70
Referencias.....	73

Índice de figuras

Figura 1. Interpretación gráfica del concepto de caballo caldera. Elaboración propia.	16
Figura 2 Niveles máximos permisibles de emisión de los equipos existentes a la entrada en vigor de la NOM (NOM – 085 – SEMARNAT – 2011, 2012)......	19
Figura 3. Esquema de sistema CIP. Tomado de (SagaFluid, s.f.)	23
Figura 4. Esquema del sistema de vapor analizado. Elaboración propia.	24
Figura 5. Puntos de medición en el sistema. Elaboración propia.....	25
Figura 6. Consumo mensual y acumulado de gas natural en 2018 y 2019. Elaboración propia	27
Figura 7. Distribución del consumo anual de gas, 2019. Elaboración propia	31
Figura 8. Placa de datos de la caldera analizada. Elaboración propia.....	31
Figura 9. Esquema del sistema de generación de vapor. Elaboración propia	32
Figura 10. Cabezal de distribución de vapor. Elaboración propia	33
Figura 11. Ciclo de arranque y paro del sistema de alimentación de agua a la caldera. Elaboración propia.	35
Figura 12. Pasteurizador del área de helados. Elaboración propia	47
Figura 13. Bowl, planta de aderezos. Elaboración propia	48
Figura 14. Esquema térmico de punto de consumo. Elaboración propia	50
Figura 15. Perfil general de demanda de vapor. Elaboración propia	55
Figura 16. Perfil de demanda de vapor en el área de helados. Elaboración propia .	57
Figura 17. Perfil de demanda de vapor en el área de aderezos. Elaboración propia	¡Error! Marcador no definido.
Figura 18. Perfil de demanda de vapor en el área de mantequillas. Elaboración propia	61

Índice de tablas

Tabla 1. Mediciones en el sistema de vapor Elaboración propia.....	26
Tabla 2. Resumen de los datos de facturación de gas natural en 2018. Elaboración propia	27
Tabla 3. Resumen de los datos de facturación de gas natural en 2019. Elaboración propia	28
Tabla 4. Resumen anual de la facturación de gas natural. Elaboración propia	28
Tabla 5. Consumo de gas por usuario en 2019. Elaboración propia con datos registrados por la planta.....	29
Tabla 6. Comparación entre el consumo reportado en las facturas de gas y el registrado por la planta. Elaboración propia	30
Tabla 7. Resumen del registro de ciclos de operación de la bomba. Elaboración propia	36
Tabla 8. Extracto de mediciones de gases de combustión. Elaboración propia	38
Tabla 9. Resumen del análisis de pérdidas de calor en tuberías principales. Elaboración propia	41
Tabla 10. Capacidad calorífica a presión constante de las sustancias procesadas. Elaboración propia con datos de (Rodríguez Guzmán, 1993)	51
Tabla 11. Cálculo del consumo de vapor en pasteurizador del área de helados. Elaboración propia	52
Tabla 12. Demanda de vapor por punto de consumo. Elaboración propia	53
Tabla 13. Consumo de vapor diario por usuario. Elaboración propia.....	62
Tabla 14. Análisis de la propuesta de sustitución de la caldera. Elaboración propia.	65

Introducción

El presente trabajo forma parte de las acciones de mejora energética y ambiental implementadas por la organización a la que pertenece el sistema de vapor analizado. Dicha organización tiene un compromiso con la minimización de sus consumos de gas natural y la reducción de sus emisiones de CO₂ y han identificado que estos objetivos están estrechamente ligados con el sistema de vapor de la planta.

El propósito del presente trabajo es caracterizar el sistema de vapor actual. Esto permitirá que las propuestas de mejora puedan evaluarse y elegirse con un análisis sólido, y logren implementarse sin comprometer las operaciones esenciales de la planta.

Este análisis incluye a la energía térmica consumida en el sistema de vapor. No se analiza la energía térmica usada en otros sistemas, como el de calentamiento de agua para procesos o servicios (regaderas, comedor), aunque el análisis de facturación considera todos los consumidores de gas dentro de la organización. Tampoco se incluyen los consumos de energía eléctrica asociados a la operación del sistema de vapor.

El desarrollo de este trabajo incluyó los trabajos de campo y gabinete necesarios para obtener y analizar la información del sistema.

En lo que se refiere a los trabajos de campo, se realizaron mediciones, toma de lecturas y entrevistas. En el cuarto de máquinas, se midieron la temperatura y humedad ambiente, el flujo de agua a la entrada de la caldera y la composición de los gases de combustión, se registraron los ciclos de inyección de agua a la caldera, los flujos de vapor generado, las presiones de operación de la caldera y del cabezal principal y las temperaturas de la superficie exterior de la caldera, además se solicitó información de operación y mantenimiento. En las zonas de producción se tomó lectura de las presiones de operación de los cabezales y de los equipos que contaban con manómetro, se midieron las temperaturas de entrada y salida del vapor y de las sustancias calentadas en cada punto de consumo, y se solicitó información acerca de

las características de operación de cada punto de consumo. Como datos históricos, se solicitó la facturación de gas natural de al menos 12 meses y el registro de consumos de gas para cada consumidor de la planta.

En el trabajo de gabinete se analizaron los datos medidos y la información proporcionada por el personal de la planta. Se analizó la facturación y se comparó contra los consumos de gas reportados para los usuarios de la organización. En este punto también se determinó el costo promedio y el poder calorífico promedio del gas natural. En lo que respecta a la caldera, se analizaron las mediciones de flujo de entrada para extrapolarlas y obtener el agua de entrada promedio al día. Se determinó también la eficiencia térmica de la caldera por el método directo. Para los puntos de consumo de vapor, se establecieron sus condiciones de operación (temperatura y flujo de producto a calentar, así como presión y temperatura del vapor) para calcular el flujo de vapor requerido. Con las bitácoras de producción de la planta se elaboró el perfil de demanda de vapor y se determinó el consumo para el día analizado.

Se describen aquí los distintos procesos en los que se usa el vapor dentro de la planta, de forma que puedan identificarse los requerimientos en los usos de energía térmica.

Para lograr completar el proceso descrito anteriormente se revisaron documentos relacionados con los usos del vapor dentro de la organización, con la operación y métodos de cálculo de la eficiencia en calderas, y con la elaboración de balances de energía.

El aporte más significativo del presente trabajo es el perfil de demanda de vapor, elaborado a partir de las estimaciones de demanda de vapor realizadas en cada uno de los puntos de consumo, y de la producción durante el periodo analizado. Dicho perfil permite establecer la demanda máxima, mínima y promedio de vapor a lo largo de un día de operación, estimar el consumo total por usuario y comparar la necesidad de vapor de la planta con la capacidad de la caldera actual.

Planteamiento del problema

El sistema de vapor existente fue diseñado para condiciones de operación diferentes a las actuales, cambiando sus parámetros de comportamiento y su eficiencia energética.

Justificación

La planta prevé cambio en sus procesos que eventualmente sustituirán el consumo de vapor, los procesos actuales usan el sistema para calentamiento de materias primas que podrán utilizar tecnologías diferentes. El diagnóstico del sistema actual permitirá definir las necesidades térmicas de cada proceso y coadyuvar al cambio tecnológico en los procesos involucrados.

Objetivo general

Proponer acciones de mejora del desempeño energético para el sistema de vapor de una planta de producción de alimentos, basadas en la caracterización de sus componentes en un día de producción ordinaria.

Objetivos particulares

- Determinar el consumo de energía en los componentes del sistema de vapor de la planta
- Establecer el perfil de demanda de vapor de la planta
- Generar propuestas de mejora energética para el sistema

Marco contextual

El vapor ha sido un recurso muy popular en el sector de la transformación desde la revolución industrial, que en buena medida también fue impulsada por el vapor. Desde entonces y hasta la época actual, sus usos se han difundido y pueden encontrarse en industrias de todos tipos.

Aunque actualmente se han diseñado sistemas que pueden lograr efectos similares a los del vapor utilizando electricidad e incluso energías alternas, el vapor sigue siendo muy popular. Algunas de las ventajas que presenta son la versatilidad, el bajo riesgo que implica su uso en el área de producción, en comparación con otras sustancias (combustibles o fluidos térmicos), su disponibilidad sin importar la hora del día, la rapidez con la que libera energía y la velocidad de respuesta para realizar ajustes en los procesos. Incluso su popularidad representa una ventaja, ya que no es difícil hallar empresas que instalen y den mantenimiento a los sistemas de vapor. Estas ventajas influyen de forma directa y positiva en la productividad y rentabilidad de las empresas, sin embargo, los sistemas de vapor también representan altos costos de instalación, operación y mantenimiento, por lo que su uso debe limitarse a los procesos que presenten ventajas reales y significativas al usarse, y el sistema debe diseñarse para cubrir la demanda de la planta, ni más ni menos.

Situación actual

El sistema de vapor analizado pertenece a una fábrica de alimentos y helados. Hasta hace algunos años, la fábrica tenía líneas de producción de mantequillas, aderezos y helados y paletas heladas, productos que requieren energía térmica en distintos pasos de su proceso productivo. En los últimos años, la empresa transfirió las líneas de mantequillas a otro fabricante e implementó un sistema de sustitución de vapor por agua caliente, realizando dicha sustitución en algunos de los puntos de consumo que así lo permiten, de modo que su consumo de vapor se ha reducido y seguirá haciéndolo por políticas ambientales internas.

El energético que se utiliza para proveer energía térmica a la planta es el gas natural. Este recurso se utiliza en el sistema de generación de vapor, en el sistema de agua caliente y en usos menores como comedores y regaderas.

El sistema de vapor se encuentra instalado en una planta ubicada en el valle de México. La planta opera desde hace más de 20 años y el sistema tiene el mismo tiempo de antigüedad. Debido al tamaño de la empresa, la planta opera las 24 horas del día, los 365 días del año. Para ello se utiliza un esquema de 3 turnos laborales, de modo que los paros de operación en la planta son mínimos.

El sistema de generación de vapor de la planta cuenta con dos calderas de 600 CC, que operan de forma alternada para satisfacer la demanda de vapor. Cada una de las calderas cuenta con tanques suavizadores, deareador y sistema de control. La generación de vapor se realiza de forma centralizada, esto quiere decir que el generador de vapor está conectado a un cabezal principal, del cual se desprenden tres líneas: una que va hacia helados, otra que va hacia aderezos y mantequillas y una tercera que alimenta al deareador. A lo largo del sistema se encuentran instalados algunos medidores de flujo y presión.

Dentro de la planta de helados, el vapor se utiliza para pasteurizar el producto y para realizar el desmolde de paletas heladas. En la planta de aderezos, el vapor se utiliza para pasteurización de producto, elaboración de cátsup y calentamiento de agua para lavados CIP (Clean in place) y COP (Clean out of place). En la planta de mantequillas el vapor se usa para pasteurización, calentamiento de materias primas y de agua para lavados. Todos los puntos de consumo de vapor mencionados se comportan como intercambiadores de calor, en ninguno de ellos el vapor se utiliza de forma directa.

Capítulo I. Marco teórico conceptual

Los sistemas de vapor son elementos industriales que involucran múltiples áreas de la ingeniería para su operación: materiales, dinámica de fluidos, termodinámica y control por mencionar algunas. Por su parte, las distintas aplicaciones del vapor pueden ser tan rudimentarias o desarrolladas como la planta lo requiera y pueda costearlo. En este capítulo se revisarán los conceptos teóricos y técnicos de mayor relevancia que están involucrados con el desempeño energético del sistema analizado.

1.1 Eficiencia de una caldera

Una caldera es un dispositivo que permite elevar la temperatura de grandes masas de agua a partir de la energía liberada por la quema controlada de un combustible, con lo que se puede generar agua caliente, vapor saturado o vapor sobrecalentado. Tienen una gran popularidad en la industria debido a las ventajas del uso del vapor, esto hace necesario contar con parámetros que permitan comparar entre un equipo y otro, de modo que se pueda elegir aquella que sea más adecuada a las necesidades de cada planta.

Las calderas se pueden clasificar bajo distintos criterios: presión de operación, capacidad de producción, tipo de combustible utilizado, configuración de las áreas de combustión y de calentamiento del agua, entre otros. Los primeros dos criterios son los que suelen ser, a su vez, los criterios de selección más importantes. Una vez que se ha determinado la tecnología adecuada para la aplicación, se encontrarán muchas opciones comerciales que puedan satisfacer los requerimientos de presión y caudal, por lo que se hace necesario contar con otro criterio que permita elegir entre todas esas opciones. La eficiencia o rendimiento de la caldera es uno de los criterios más comunes para realizar dicha selección, pues indica cuál de las opciones tiene un menor costo de combustible para lograr el mismo efecto. Si se toma en cuenta que las calderas son equipos costosos, que no es deseable sustituirlos de forma frecuente y que, con un buen mantenimiento, pueden tener una vida útil de

más de 15 años, seleccionar un equipo con alta eficiencia permitirá mantener bajo control el costo asociado a la producción de vapor.

La eficiencia es un indicador del buen funcionamiento del sistema de vapor, pues muchos de los problemas comunes en las calderas como incrustaciones en las superficies de calentamiento u obstrucciones de los quemadores provocan una menor capacidad de generación de vapor o un aumento en el consumo de combustible. Por ello, es importante dar seguimiento a este parámetro, lo cual se logra estableciendo un método de medición, registro y análisis e instalando y dando mantenimiento a los instrumentos de medición necesarios para tomar las lecturas necesarias.

El concepto de eficiencia o rendimiento en calderas hace referencia a la definición termodinámica de eficiencia: El cociente de la salida deseada y la entrada requerida. En este caso, la salida deseada es relativamente fácil de cuantificar: el incremento de la entalpía del agua suministrada, pero en el caso de la entrada requerida la cuantificación es un poco más compleja, pues dependerá de los límites definidos para el análisis. Esta entrada puede considerar únicamente la energía química suministrada por el combustible, extenderse hasta la energía térmica presente en el agua de alimentación, el combustible y el aire suministrados o incluso ir más allá y cuantificar la energía eléctrica necesaria para el bombeo del agua y el soplado de aire de combustión. Es por ello que la definición del método de medición, registro y análisis es tan importante en el seguimiento de la eficiencia como parámetro.

Existen diversos organismos técnicos que han emitido sus métodos de cálculo de la eficiencia de calderas. En el caso de las calderas que usan gas natural como combustible, uno de los métodos que ha logrado una mayor aceptación a nivel mundial es el propuesto por la Sociedad Estadounidense de Ingenieros Mecánicos (ASME, por sus siglas en inglés)

La norma ASME PTC 4 - 2008 Fired Steam Generators¹ propone dos métodos que son conceptualmente diferentes para evaluar el rendimiento del generador de vapor. El primero se denomina Eficiencia del combustible, que se resume en la siguiente ecuación:

$$EF = \frac{Q_{\text{útil}}}{E_{\text{combustible}}} * 100 = \frac{Q_{\text{útil}}}{PC} * 100$$

Donde:

EF es la eficiencia del combustible², en %

$Q_{\text{útil}}$ es el calor útil producido, en kJ

PC es el poder calorífico del combustible, en kJ

Como puede observarse, este método no cuantifica la energía eléctrica que puede estar relacionada en el proceso de generación de vapor, sino que únicamente considera la energía química suministrada por el combustible.

El segundo método para evaluar el rendimiento se denomina Rendimiento de caldera y se expresa en la siguiente ecuación:

$$EGr = \frac{Q_{\text{util}}}{E_{\text{total entrada}}} * 100 = \frac{Q_{\text{util}}}{PC + B} * 100$$

Donde:

EGr es el rendimiento de la caldera³, en %

B son los créditos de entrada, en kJ

Los créditos de entrada se componen por: Aire seco de entrada, Humedad en aire de entrada, Calor sensible del combustible, Sulfuración, Equipo auxiliar de potencia,

¹ Este código provee reglas e instrucciones para realizar pruebas de desempeño en generadores de vapor que consumen combustibles fósiles. Éstos incluyen generadores de vapor que funcionan con carbón, petróleo y gas, así como generadores de vapor que consumen otros hidrocarburos.

² Fuel Efficiency en ingles

³ Gross Efficiency en ASME

Calor sensible en el sorbente, Energía añadida en humedad adicional, es decir que los créditos se componen de la energía eléctrica de los equipos auxiliares y la entalpía de los distintos flujos que ingresan a la caldera.

Dada la imposibilidad de cuantificar todos los elementos incluidos en el concepto Créditos, en el presente trabajo se eligió el método de eficiencia de combustible para determinar el rendimiento de la caldera analizada.

1.2 Eficiencia de combustión

La eficiencia de combustión “Permite conocer que tan bien, el equipo está convirtiendo un combustible específico en energía útil (liberada por el combustible), durante un periodo de operación” (García S.)

La eficiencia de combustión no debe confundirse con la eficiencia térmica del generador de vapor, ya que únicamente cuantifica la generación de calor a partir de la reacción química del combustible.

El método más utilizado para evaluar la eficiencia de combustión es el método de entradas y salidas descrito en la Norma ASME PTC 4.1. Este método cuantifica las pérdidas a través de los gases de chimenea, basándose en la composición de los gases de combustión.

Actualmente, existen muchos analizadores de gases fijos y portátiles que entregan un valor de eficiencia de combustión basado en las lecturas que realiza. Los analizadores que únicamente pueden medir de forma directa el porcentaje de CO_2 hacen un análisis en el que consideran que las únicas pérdidas en la combustión se dan por gases secos, por lo que el resultado es algo limitado mas no inútil pues aporta información acerca del comportamiento de la eficiencia de combustión. Los analizadores que permiten hacer mediciones directas de CO y CO_2 cuentan con un modelo de análisis que cuantifica las pérdidas por combustión incompleta, combustible no quemado y vapor de agua.

1.3 Concepto de caballo caldera y derrateo de una caldera

La empresa fabricante de calderas Powermaster indica que “El C.C. Caballo Caldera es una definición teórica y se define como “la producción de 15.64 kg/h (34.5 lb/h) de vapor saturado desde 100°C (212°F) y a una presión de una atmósfera, utilizando agua de alimentación (en el tanque de condensados) de la misma temperatura. Esto es igual a la transmisión de calor de 8436.56 kcal/h o 33,479 Btu/h. (igual a 9.81 kW).” En la figura 1 se muestra una interpretación gráfica de esta definición.

Este concepto hace referencia a la cantidad de energía que la caldera puede entregar bajo condiciones de operación definidas y controladas. Las condiciones de operación reales de una caldera son muy diferentes a las que menciona el concepto de Caballo Caldera, sin embargo es posible estimar la cantidad real de vapor que puede obtenerse si se conocen los C.C. y las condiciones reales de operación.

Analicemos la definición de Caballo Caldera:

15.64 kg/hr de vapor *unidad de masa saturado la calidad del vapor será igual a uno, por lo que no habrá gotas de agua líquida en el mismo, pero tampoco habrá sobrecalentamiento, esto nos permitirá conocer la entalpía de salida del vapor desde 100 °C y a una presión de una atmósfera el agua que se ingrese a la caldera será agua líquida saturada a la presión a nivel del mar, estos datos nos permiten determinar la entalpía específica del agua de entrada.*

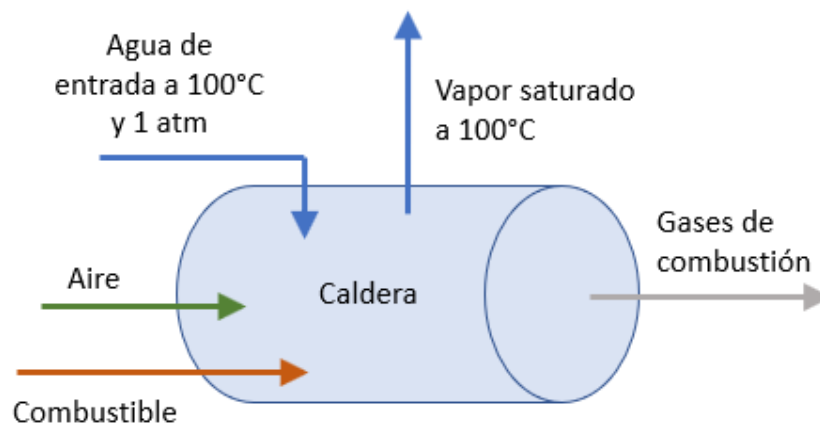


Figura 1. Interpretación gráfica del concepto de caballo caldera. Elaboración propia.

Entalpía específica de entrada: 419.02 kJ/kg

Entalpía específica de salida: 2676.07 kJ/kg

Caballo Caldera = 15.64 kg

$$\begin{aligned} \text{Caballo Caldera} &= 15.64 \frac{\text{kg}}{\text{h}} * (2676.07 - 419.02) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 35,300.267 \frac{\text{kJ}}{\text{h}} \\ &= 9.8 \text{ kW} \end{aligned}$$

La potencia en kW obtenida para el concepto de Caballo Caldera sirve para determinar el flujo másico real de vapor que puede obtenerse de una caldera, en función de los CC nominales y las condiciones a las que operará la caldera.

1.4 Factor de evaporación

La capacidad nominal de las calderas está referida a condiciones de operación específicas, sin embargo, las condiciones de operación reales casi nunca son iguales a las de diseño, lo que influye en la cantidad máxima real de vapor que puede obtenerse. El factor de evaporación permite cuantificar esta diferencia entre la capacidad nominal y la real, permitiendo así determinar la capacidad nominal que un equipo debe tener para cubrir determinados requerimientos reales.

Este factor se define como el cociente de la diferencia de entalpías entre la salida y la entrada del agua, y la diferencia de entalpías asociada a la definición de caballo caldera, es decir, la diferencia de entalpías entre vapor saturado a 100°C y una atmósfera, y agua saturada a 100 °C y una atmósfera.

$$f_e = \frac{h_2 - h_1}{\Delta h_{CC}}$$
$$f_e = \frac{h_2 - h_1 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]}{2257.04 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]}$$

Donde:

f_e es el factor de evaporación

h_2 es la entalpía de salida del agua en condiciones de operación reales

h_1 es la entalpía de entrada del agua en condiciones de operación reales

Δh_{CC} es la diferencia de entalpías asociada al concepto de caballo caldera

Para que este concepto pueda ser de utilidad en el análisis de las calderas, es necesario relacionarlo con la capacidad nominal de estos equipos. Una vez que se ha determinado el factor de evaporación de una caldera, es posible determinar su capacidad máxima real despejando el denominador de la siguiente ecuación:

$$f_e = \frac{\text{Capacidad}_{nominal}}{\text{Capacidad}_{real}}$$

Donde:

$\text{Capacidad}_{nominal}$ es la capacidad de la caldera que se indica en su placa

Capacidad_{real} es la capacidad máxima que la caldera puede tener en las condiciones de operación reales

1.5 NOM – 085 – SEMARNAT – 2011

La NOM – 085 – SEMARNAT – 2011, contaminación atmosférica. Niveles máximos permisibles de emisión de los equipos de combustión de calentamiento indirecto y su medición indica los niveles máximos permisibles de emisión de gases contaminantes para equipos de combustión de calentamiento indirecto que utilizan combustibles convencionales o sus mezclas. Es una norma de carácter obligatorio para estos equipos, con excepción de aquellos cuya capacidad sea menor a 15 CC, las turbinas de gas, equipos auxiliares y equipos de relevo también quedan exentas de cumplir con esta norma.

Las características que se consideran para determinar los niveles máximos de emisiones son:

- Capacidad térmica nominal del equipo
- Tipo de combustible
- Ubicación geográfica fija del equipo de combustión
- Estado Ambiente de Referencia

La norma indica niveles máximos permisibles de emisión distintos para los sistemas que ya se encontraban en operación al momento de su entrada en vigor y los que se instalen en fechas posteriores. En la Figura 2 se muestran los valores Niveles máximos permisibles de emisión de los equipos existentes a la entrada en vigor de la NOM. Se marcan en amarillo los niveles aplicados para la caldera que forma parte del sistema de vapor analizado.

CAPACIDAD TERMICA NOMINAL DEL EQUIPO GJ/h	TIPO DE COMBUSTIBLE	HUMO # de mancha	Partículas, mg/m ³			Bióxido de azufre, ppm _v			Oxidos de nitrógeno, ppm _v			Monóxido de carbono, ppm _v		
			ZVM	ZC	RP	ZVM	ZC	RP	ZVM	(₂) ZC	RP	ZVM	ZC	RP
Mayor de 0.53 a 5.3 (Mayor de 15 a 150 CC)	Líquido	3	NA	NA	NA	550	1 100	2 200	NA	NA	NA	400	450	500
	Gaseoso	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	400	450	500
Mayor de 5.3 a 42.4 (Mayor de 150 a 1 200 CC)	Líquido	NA	75	350	450	550	1 100	2 200	190	190	375	400	450	500
	Gaseoso	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	190	190	375	400	450	500
Mayor de 42.4 a 106 (Mayor de 1 200 a 3 000 CC)	Líquido	NA	60	300	400	550	1 100	2 200	110	110	375	400	450	500
	Gaseoso	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	110	110	375	400	450	500
Mayor de 106 a 530 (Mayor de 3 000 a 15 000 CC)	Sólido y Líquido	NA	60	250	350	550	1 100	2 200	110	110	375	400	400	500
	Gaseoso	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	110	110	375	400	450	500
Mayor de 530 (Más de 15 000 CC)	Sólido y Líquido	NA	60	250	350	550	600	2 200	110	110	375	400	400	500
	Gaseoso	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	110	110	375	400	450	500

Figura 2 Niveles máximos permisibles de emisión de los equipos existentes a la entrada en vigor de la NOM (NOM – 085 – SEMARNAT – 2011, 2012).

1.6 Purgas de superficie y de fondo

El agua que entra al sistema de generación de vapor suele ser agua corriente, conocida como agua cruda. El agua cruda contiene partículas sólidas en función del lugar del que se haya extraído y de la calidad de las tuberías por las que se haya transportado. Para mantener el nivel de impurezas en el agua y con ello asegurar la

calidad del vapor y conservar en buen estado todo el sistema de vapor, es necesario incluir en este último algunos procesos de filtrado y remoción de impurezas. El primero de ellos es el suavizado, que disminuye el contenido de Sólidos Totales Disueltos (entre ellos calcio y magnesio) en el agua. El método más común para suavizar el agua es hacerla pasar a través de resinas de intercambio iónico que atrapan los iones de calcio y magnesio. El suavizador se instala antes de la caldera y de los deaeradores, cuando éstos últimos existan. De este modo, protege al sistema desde antes que el agua se convierta en vapor.

Sin embargo, el agua corriente no solo contiene iones de calcio y magnesio, por lo que el suavizado no es suficiente para conservar en buen estado el sistema de vapor. Cuando el agua pasa de líquido a vapor, dentro de la caldera la concentración de sólidos disueltos se incrementa pues la caldera está diseñada para evitar que dichos sólidos salgan junto con el vapor, por lo que se acumulan en la superficie del agua líquida y eventualmente se precipitan hacia el fondo de la caldera. En el primer caso, la purga de superficie permite reducir la cantidad de sólidos disueltos que flotan en el agua, pues expulsa el agua de la superficie que contiene los sólidos y obliga a la caldera a ingresar agua con una menor concentración. Por su parte, la purga de fondo ayuda a reducir la presencia de sólidos precipitados en el fondo de la caldera. Ambos tipos de purga son importantes en el sistema de vapor, la purga de superficie evita que el vapor salga contaminando de la caldera, lo cual podría corroer las tuberías de transporte y los puntos de consumo (turbinas, intercambiadores de calor), así como afectar la calidad del producto si éste entra en contacto con el vapor, mientras que la purga de fondo evita la formación de incrustaciones en las paredes internas de la caldera, que dificultan la transferencia de calor y pueden provocar fracturas.

1.7 Proceso de pasteurización

La pasteurización es un proceso ampliamente utilizado en la industria alimentaria, sobre todo en la industria de la leche y sus derivados. Su principal objetivo es eliminar los microorganismos (bacterias, protozoos, mohos y levaduras entre otros) que son peligrosos para el ser humano, esto se consigue a través de un choque térmico bajo condiciones de tiempo y temperatura bien definidas.

La mezcla que se pasteuriza pasa primero por una etapa de calentamiento en la cual su temperatura se eleva, casi siempre por encima de los 60°C. Lo que sigue es la pasteurización: la temperatura se mantiene durante un tiempo y luego la mezcla se enfría. La duración de cada etapa del proceso y las temperaturas que se alcanzan se establecen de forma clara y deben seguirse al pie de la letra, para garantizar la eliminación de microorganismos pero también para que la mezcla no pierda sus propiedades y sirva para elaborar los productos finales con las características de sabor y textura esperadas.

Para el helado, este proceso es crucial para asegurar su calidad, pues es un producto compuesto de diversos ingredientes (leche, fruta) que aportan distintos tipos de microorganismos. Además, el helado es muy susceptible a los cambios de temperatura, que el fabricante solo puede controlar hasta ciertas etapas de la cadena de distribución, sin embargo, el consumidor espera calidad aún fuera de las etapas que el productor no puede garantizar. Finalmente, el helado también debe tener cierta resistencia a los errores de manipulación al momento de servirse y consumirse, en esto también tiene relevancia la correcta pasteurización del producto.

Respecto a la mayonesa, la pasteurización resulta igualmente importante, tanto por los ingredientes que se utilizan para su preparación como por la necesidad de asegurar su calidad aun en ambientes que no se pueden controlar. En el primer caso, es importante recordar que uno de los ingredientes básicos de la mayonesa es el huevo, que es altamente susceptible a contener salmonella, una bacteria que puede afectar significativamente la salud humana. Por otro lado, el proceso de consumo de este aderezo lo expone a diversos microorganismos, pues difícilmente se consume todo el contenido del envase al mismo tiempo, por lo que, igual que con el helado, el contenido de microorganismos debe ser mínimo, de modo que una incorrecta manipulación no permita su proliferación a niveles peligrosos.

1.8 Método CIP

La palabra CIP es el acrónimo de *Cleaning In Place*, que significa limpieza en sitio, y hace referencia a un método automatizado de limpieza que permite limpiar distintos

elementos como tuberías, recipientes, filtros y similares sin necesidad de desmontarlos, lo que facilita la actividad y ahorra tiempo y recursos.

Este sistema se basa en hacer circular agua y algunas soluciones químicas en los equipos a limpiar. Estos procesos tienen parámetros específicos de tiempo, temperatura, composición de las soluciones y presurización, lo que permite lograr el efecto de limpieza deseado.

El sistema CIP puede automatizarse en función de las necesidades de cada equipo, con lo que reduce la intervención humana y el consumo de agua y químicos de limpieza. En este sistema, el esfuerzo humano se concentra en ajustar el ciclo de limpieza para hacerlo adecuado, y en verificar que las soluciones cumplan con los parámetros antes mencionados.

Los sistemas CIP pueden ser de tipo fijo o portátil. En el caso de los sistemas fijos, deben instalarse tanques de almacenamiento, en los que las soluciones se adecuarán y esperarán el momento de ser usadas.

Las soluciones más comunes en estos sistemas son el agua corriente, una solución ácida (agua y ácido) y una solución alcalina (agua y sosa). Con estos elementos se hacen procedimientos cortos y largos, en función de las necesidades y procedimientos específicos de cada planta. En algunos casos, las soluciones pueden reusarse en varios ciclos de lavado, siempre que conserven las composiciones necesarias, esto representa otra forma de ahorrar en agua, químicos y energía de calentamiento, pero requiere que se instale un sistema semicerrado con sensores de conductividad a la salida de los puntos de lavado para analizar si la solución puede volver a almacenarse o es preferible desecharla y preparar una nueva. En la Figura 3 se muestra un diagrama de un circuito semicerrado para un sistema CIP

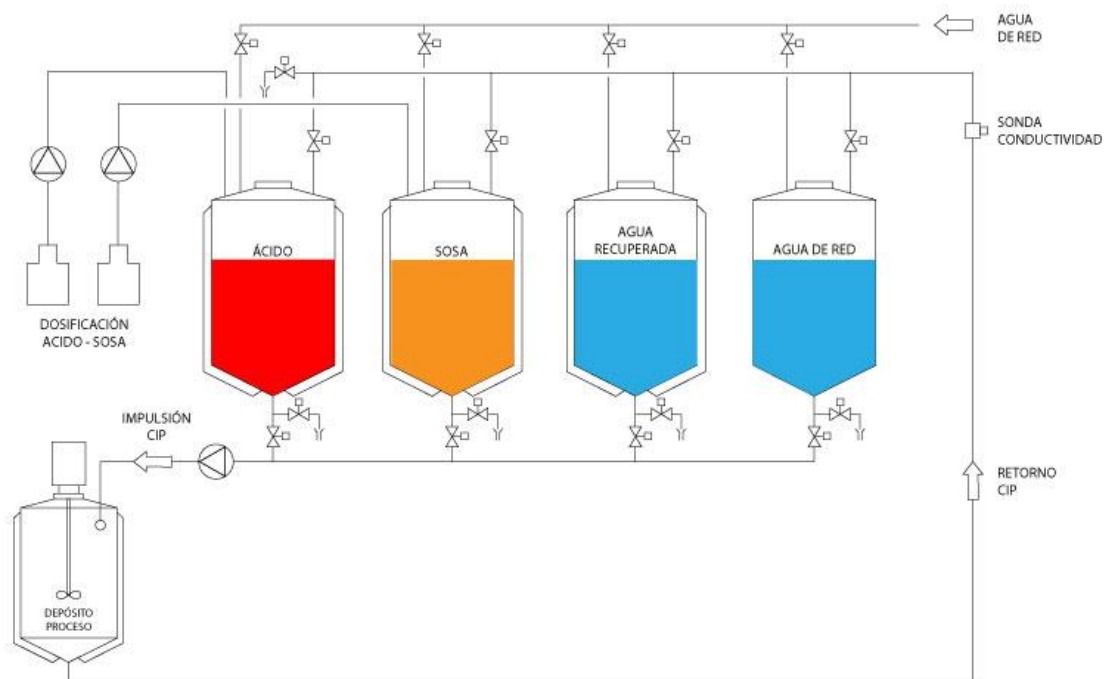


Figura 3. Esquema de sistema CIP. Tomado de (SagaFluid, s.f.)

Capítulo II. Desarrollo metodológico

El diagnóstico del sistema de vapor se seccionó en tres partes. En la primera de ellas, se analizaron los datos históricos de facturación del combustible, con el fin de obtener un valor promedio del poder calorífico y el costo del combustible, luego se determinaron los usos y consumos del gas natural al interior de la planta. La segunda parte consistió en el análisis de eficiencia de la caldera por el método directo, la estimación del derrateo de la caldera por efecto de la demanda de vapor y la estimación de las pérdidas de calor por las tuberías de distribución de vapor. Finalmente, se realizó un análisis de los usos y consumos del vapor en las áreas de helados, mantequillas y aderezos.

2.1 Descripción del sistema

El sistema se encuentra en un sitio a 2250 m.s.n.m, en el valle de México. Pertenece a una empresa productora de alimentos y cuenta con 30 años de operación. En la Figura 4 se muestra un esquema de los elementos que componen al sistema de vapor.

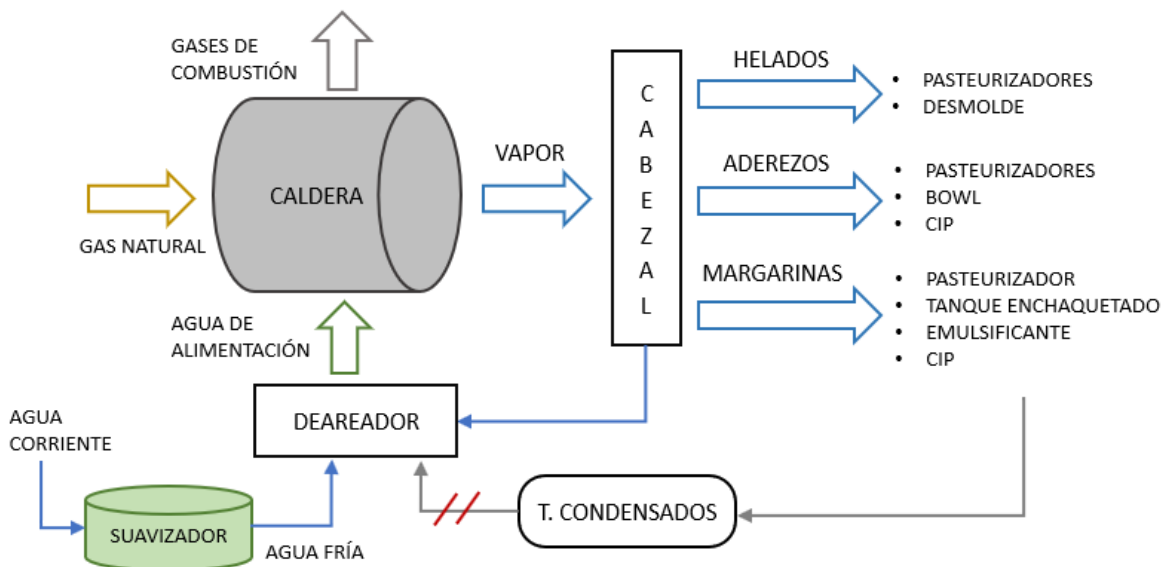


Figura 4. Esquema del sistema de vapor analizado. Elaboración propia.

Como puede observarse en la figura, el sistema de vapor es de tipo centralizado, esto quiere decir que el vapor de toda la planta se genera en una sola caldera y se entrega

a un cabezal general. Esto tiene la ventaja de flexibilizar el sistema y poder reaccionar a aumentos de consumo de vapor en cualquiera de los usuarios, además de reducir los costos de operación y mantenimiento, esto en comparación de un sistema en el que cada área de la planta tuviera su propia caldera. La principal desventaja de este sistema es la distancia a la que se encuentran algunos puntos de consumo del generador de vapor, con las pérdidas de presión y calor asociadas.

2.2 Información recopilada en sitio

Gran parte de la información utilizada para el análisis se recopiló directamente del sistema en operación. Algunos datos fueron medidos con equipo no invasivo y otros se registraron de los equipos instalados por la organización. En la Figura 5 se muestra nuevamente el esquema del sistema, pero se indican los puntos en los que se realizaron mediciones.

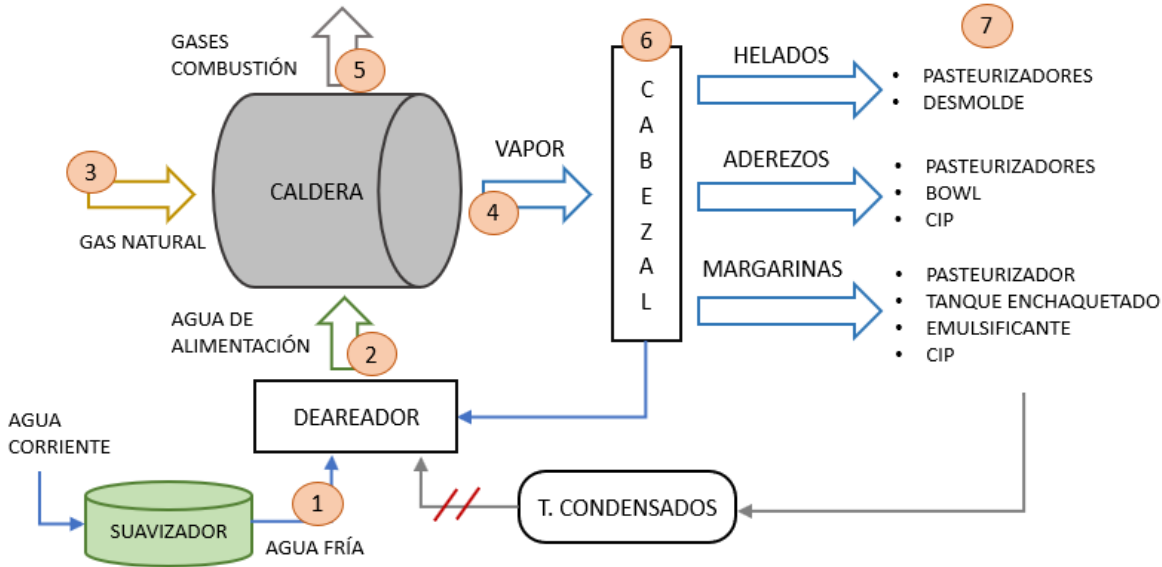


Figura 5. Puntos de medición en el sistema. Elaboración propia.

En la Tabla 1 se enlistan las variables medidas en cada punto y el instrumento utilizado para la medición.

Tabla 1. Mediciones en el sistema de vapor Elaboración propia.

Punto	Variable medida	Instrumento de medición
1	Temperatura	Termómetro infrarrojo Fluke 566
	Temperatura	Termómetro bimetálico
2	Flujo de agua	Medidor ultrasónico de flujos TTFM10B-HH-NG
	Ciclos de carga y descarga de la caldera	Medidor de flujos invasivo
3	Flujo de gas natural	Medidor de flujos invasivo
	Presión	Manómetro de bourdon
4	Flujo de vapor	Medidor de flujos invasivo
	Temperatura	Termopar Bacharach PCA3
5	Composición de gases de combustión	Analizador de gases de combustión Bacharach PCA3
6	Temperatura ambiente	Higrómetro Extech 45160
	Humedad relativa	Higrómetro Extech 45160
7	Presión	Manómetro de bourdon
	Presión de entrada del vapor	Manómetro de bourdon
8	Temperatura de entrada del vapor	Termómetro infrarrojo Fluke 566
	Temperatura de entrada del fluido frío	Termómetro infrarrojo Fluke 566

2.3 Facturación

La empresa proporcionó las facturas de gas natural de 2018 y 2019. En dichas facturas se pueden leer el periodo de consumo, que generalmente es cada mes lectivo, el poder calorífico del combustible en GJ/m^3 , el consumo en metros cúbicos y el costo total del combustible consumido en el periodo, solo en los recibos de noviembre y diciembre de 2018 no se indica el poder calorífico del combustible. En las tablas 2 y 3 se muestran los datos históricos de consumo de combustible en 2018 y 2019, mientras que la tabla 4 muestra un resumen por año de la información que será de utilidad para los análisis del sistema de generación de vapor, finalmente en la Figura 6 se muestra un gráfico con el comportamiento mensual y acumulado del consumo de energía térmica en 2018 y 2019, en este gráfico se observa que el consumo de energía mes a mes y total fue mayor en 2019, con excepción del mes de diciembre.

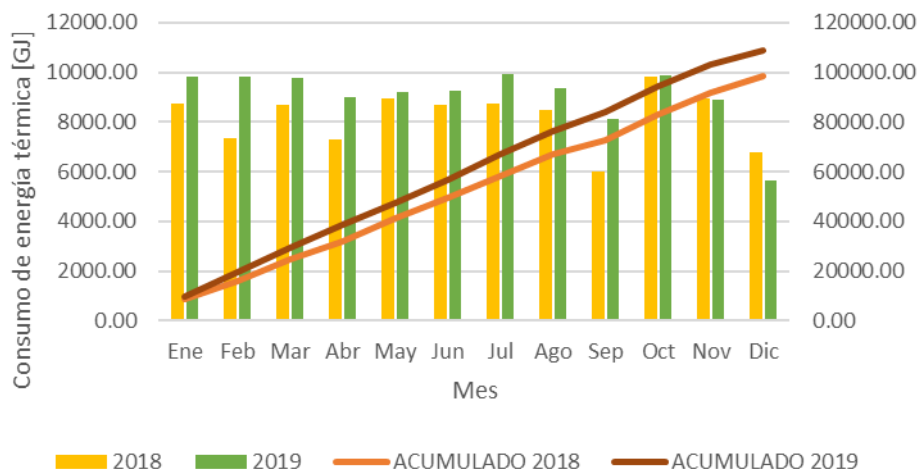


Figura 6. Consumo mensual y acumulado de gas natural en 2018 y 2019. Elaboración propia

Tabla 2. Resumen de los datos de facturación de gas natural en 2018. Elaboración propia

2018				
MES	CONSUMO [m3]	COSTO	PODER CALORIFICO [kJ/m ³]	CONSUMO [GJ]
1	240,417.00	\$ 964,120.64	36429.67	8758.31
2	202,710.50	\$ 954,276.92	36301.64	7358.72
3	239,081.41	\$ 939,702.92	36369.63	8695.30
4	200,597.82	\$ 802,058.82	36452.88	7312.37
5	243,278.13	\$ 1,017,988.91	36695.67	8927.25
6	236,130.37	\$ 1,033,603.47	36727.21	8672.41
7	239,511.61	\$ 1,010,390.90	36490.02	8739.78
8	231,410.96	\$ 945,876.23	36590.55	8467.45
9	164,594.33	\$ 700,759.64	36542.40	6014.67
10	269,159.82	\$ 1,216,555.33	36480.01	9818.95
11	245,613.04	\$ 1,192,740.71	36635.20	8959.97
12	186,527.93	\$ 1,230,795.05	36425.78	6804.54

Tabla 3. Resumen de los datos de facturación de gas natural en 2019. Elaboración propia

2019				
MES	CONSUMO [m3]	COSTO	PODER CALORIFICO [GJ/m ³]	CONSUMO [GJ]
1	268,965.62	\$ 1,484,014.08	36555.51	9832.17
2	270,305.04	\$ 1,238,057.73	36349.51	9825.46
3	268,540.37	\$ 1,135,856.13	36426.89	9782.09
4	245,432.73	\$ 1,109,391.82	36560.59	8973.16
5	251,676.84	\$ 1,155,202.64	36564.70	9202.49
6	251,676.84	\$ 1,180,711.52	36776.32	9255.75
7	268,974.81	\$ 1,150,717.37	36945.67	9937.45
8	253,776.93	\$ 1,054,415.31	36828.96	9346.34
9	220,840.66	\$ 954,489.04	36679.93	8100.42
10	269,551.62	\$ 1,168,385.47	36600.82	9865.81
11	243,072.95	\$ 1,036,281.28	36654.10	8896.67
12	153,637.57	\$ 643,500.35	36691.24	5623.26

Tabla 4. Resumen anual de la facturación de gas natural. Elaboración propia

	2018	2019
Consumo total anual [m ³ /año]	2,699,032.92	2,966,451.98
Consumo total anual [GJ/año]	98,529.74	108,641.08
Costo total anual [\$/año]	\$12,008,869.54	\$13,311,022.74
Poder calorífico promedio [GJ/m ³]	0.0365	0.0366
Costo promedio del gas [\$/m ³]	\$4.45	\$4.49
Costo promedio de la energía [\$/GJ]	\$121.8727	\$122.4796

2.4 Usos y consumos del gas natural

Los sistemas y servicios que utilizan gas natural al interior de la planta son:

- Sistema de generación de vapor
- Sistema de generación de agua caliente
- Comedor
- Centro de exposiciones
- Calentadores de agua para regaderas

Como parte de sus estrategias de gestión, la empresa cuenta con bitácoras de seguimiento al consumo de gas en cada uno de los usos del gas natural. La tabla 5 muestra un resumen de la información proporcionada referente a los consumos de gas por usuario en el año y la tabla 6 muestra una comparación entre los valores totales indicados en las bitácoras y los datos de facturación, se observa que existe una diferencia entre las lecturas de los equipos de medición de gas al interior de la planta y el consumo mensual facturado y aunque esta diferencia es mayor al 5% recomendado, no lo es de forma significativa y los datos aportan información clara y completa respecto al consumo del combustible en la planta.

Tabla 5. Consumo de gas por usuario en 2019. Elaboración propia con datos registrados por la planta

	Consumo de gas, 2019 [m³]				
	Caldera	Calentador	Comedor	Centro exposiciones Regaderas	
Enero	261,271	8,999	3,888	4	0
Febrero	243,343	11,182	3,023	6	52
Marzo	216,505	12,558	2,469	5	114
Abril	177,951	19,637	2,370	3	96
Mayo	223,126	24,534	2,939	0	28
Junio	205,607	19,506	2,646	0	0
Julio	246,073	22,213	3,888	4	0
Agosto	216,505	14,607	3,023	6	52
Septiembre	169,244	13,549	2,469	5	114
Octubre	234,337	24,625	2,370	3	96
Noviembre	182,227	16,471	2,939	0	28
Diciembre	136,266	7,246	2,646	0	0
Total	2,512,455	195,127	34,670	36	580

Tabla 6. Comparación entre el consumo reportado en las facturas de gas y el registrado por la planta.
Elaboración propia

Consumo de gas, 2019				
	Consumo total reportado [m³]	Facturación [m³]	Diferencia	
			[m³]	[%]
Enero	274,162	268,966	-5,196	-1.93%
Febrero	257,606	270,305	12,699	4.70%
Marzo	231,651	268,540	36,889	13.74%
Abril	200,057	245,433	45,376	18.49%
Mayo	250,627	251,677	1,050	0.42%
Junio	227,759	251,677	23,918	9.50%
Julio	272,178	268,975	-3,203	-1.19%
Agosto	234,193	253,777	19,584	7.72%
Septiembre	185,381	220,841	35,460	16.06%
Octubre	261,431	269,552	8,121	3.01%
Noviembre	201,665	243,073	41,408	17.04%
Diciembre	146,158	153,638	7,480	4.87%
Total	2,742,868	2,966,452	--	--
Promedio	--	--	18,632	7.70%

De lo anterior y utilizando los valores de poder calorífico indicados en las facturas de gas, se obtuvo la distribución del consumo de energía proveniente del gas dentro de la planta, la cual se muestra en la Figura 7. Los consumos correspondientes al área de comedor, centro de exposiciones y regaderas se agruparon en la categoría "Otros". En el gráfico se puede observar que el 92% de la energía que ingresa a la planta como gas natural es utilizada en el sistema de generación de vapor, le sigue el calentador de agua de proceso con un 7% y el resto de los puntos de consumo representan poco más del 1% del total, de todo esto se puede deducir que las mejoras que se hagan en el sistema de vapor impactarán de forma significativa el consumo de energía en la planta.

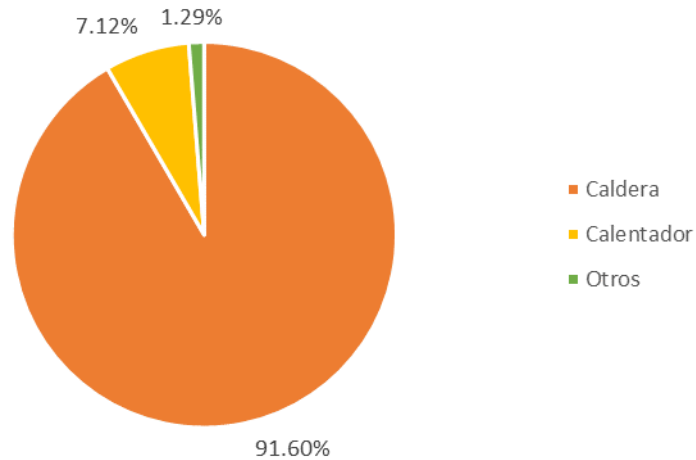


Figura 7. Distribución del consumo anual de gas, 2019. Elaboración propia

2.5 Sistema de generación de vapor

2.5.1 Condiciones de operación

El sistema de generación de vapor analizado opera en un sitio ubicado a 2250 m.s.n.m. Cuenta con una caldera pirotubular de tiro forzado marca LOOS International, de 600 C.C. de capacidad nominal y presión máxima de trabajo de 10 bar_a. En la Figura 8 se muestra la placa de datos del equipo.

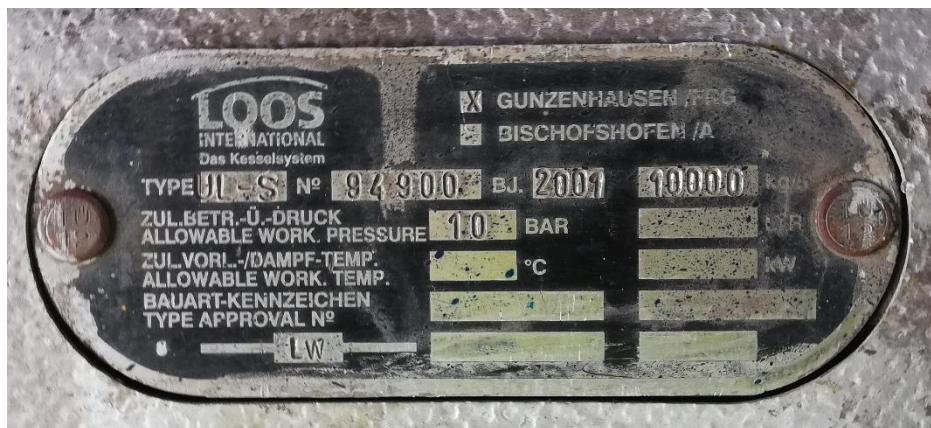


Figura 8. Placa de datos de la caldera analizada. Elaboración propia

La caldera opera en un rango de 6 a 6.5 bar. El control de la inyección de agua es del tipo arranque y paro, mientras que el quemador cuenta con un regulador de flama.

Respecto a las purgas en la caldera, ésta tiene dos tipos de purga: de fondo y de superficie.

El sistema cuenta con un suavizador de agua, un deareador, una bomba de alimentación y un precalentador de aire, aunque este último está inhabilitado. El suavizador de agua permite mantener las sales disueltas en un rango de 0 a 4 ppm, mientras que el deareador mezcla el agua de alimentación con vapor y eleva la temperatura del agua de alimentación a una temperatura de entre 55 y 60 °C, lo que reduce el consumo de combustible y la presencia de oxígeno en el agua, que es altamente corrosivo. Para dar seguimiento al agua de entrada, consumo de combustible y vapor generado, el sistema cuenta con medidores de flujo en dichos puntos, además de manómetros en la línea de entrada del gas y en la caldera. En la Figura 9 se muestra un esquema de los elementos principales en el sistema de generación de vapor.

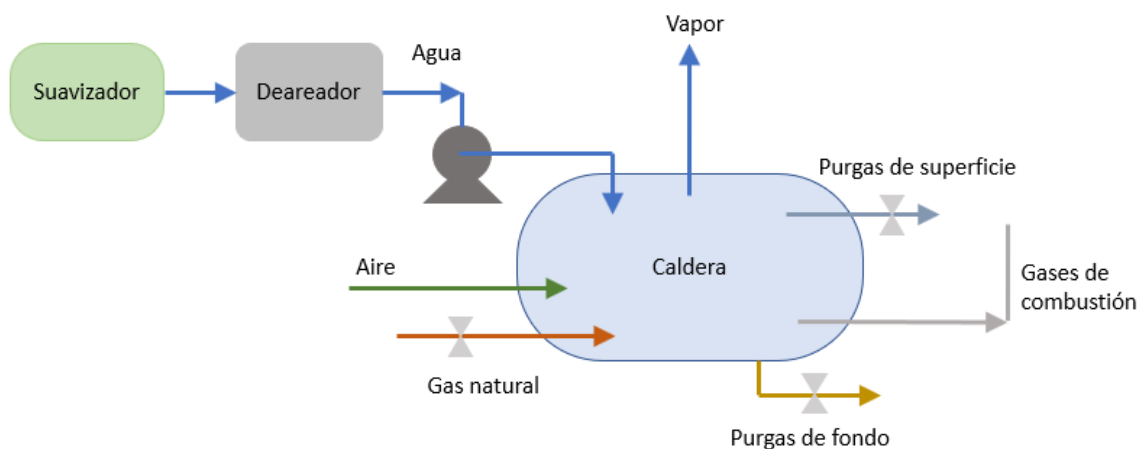


Figura 9. Esquema del sistema de generación de vapor. Elaboración propia

El cabezal principal de vapor opera en el mismo rango de presiones que la caldera y la caída de presión entre ambos dispositivos es imperceptible. Este cabezal tiene tres salidas, una que va hacia la zona de helados, otra que va hacia las áreas de mantequillas y aderezos y otra que va al deareador. En la Figura 10 se puede observar el cabezal, que no presenta daños visibles.



Figura 10. Cabezal de distribución de vapor. Elaboración propia

Los puntos de consumo de vapor en las plantas de helados, aderezos y mantequillas se conectan al cabezal a través de una red de tuberías aisladas térmicamente. En cada una de las plantas, el vapor se utiliza para calentamiento y pasteurización de materias primas y producto, así como para calentamiento de agua de limpieza. El sistema fue diseñado para contar con un retorno de condensados, por lo que idealmente una gran parte de la masa de agua se volvería a juntar en un tanque después de ser utilizado y volvería a pasar por la caldera, sin embargo en la realidad el tanque de condensados no se utiliza, por lo que los condensados se desechan.

Respecto a la red de tuberías del sistema, una gran parte se encuentra a una altura de 5 metros por encima del nivel de piso terminado de la planta. El cuarto de máquinas está alejado de las áreas de producción, por lo que parte del recorrido del vapor se da al aire libre. Al llegar a las áreas de producción, las tuberías pasan por secciones de plafón, donde el acceso es restringido debido a que se considera un área confinada.

2.5.2. Agua de alimentación

La caldera cuenta con un módulo de control que permite medir el agua y gas de ingreso y el vapor de salida, sin embargo para el caso del agua de alimentación de la caldera se optó por conectar un medidor de flujo ultrasónico para asegurar la medición. El equipo utilizado es el modelo TTFM10B-HHNG portátil.

El suministro de agua se da en ciclos de arranque y paro, en función de la demanda de vapor. La figura 11 muestra el gráfico obtenido al realizar una medición de flujo de agua a intervalos de 10 segundos, durante 8 minutos. En el gráfico se pueden observar dos intervalos en los que el flujo de agua aumenta, lo que correspondería a inyecciones de agua. Se observa también que la inyección comienza por debajo de los 0.5 l/s, 40 segundos después alcanza su punto más alto con un valor entre 4 y 4.5 l/s y desciende hasta llegar al valor inicial 80 segundos después de alcanzar el valor más alto. Después viene un intervalo de paro de aproximadamente 150 segundos y se presenta otro intervalo de inyección, que dura 120 segundos y alcanza un flujo

máximo de entre 3.5 y 4 l/s. El flujo de agua promedio en los dos periodos de inyección mostrados es de 2.43 l/s.

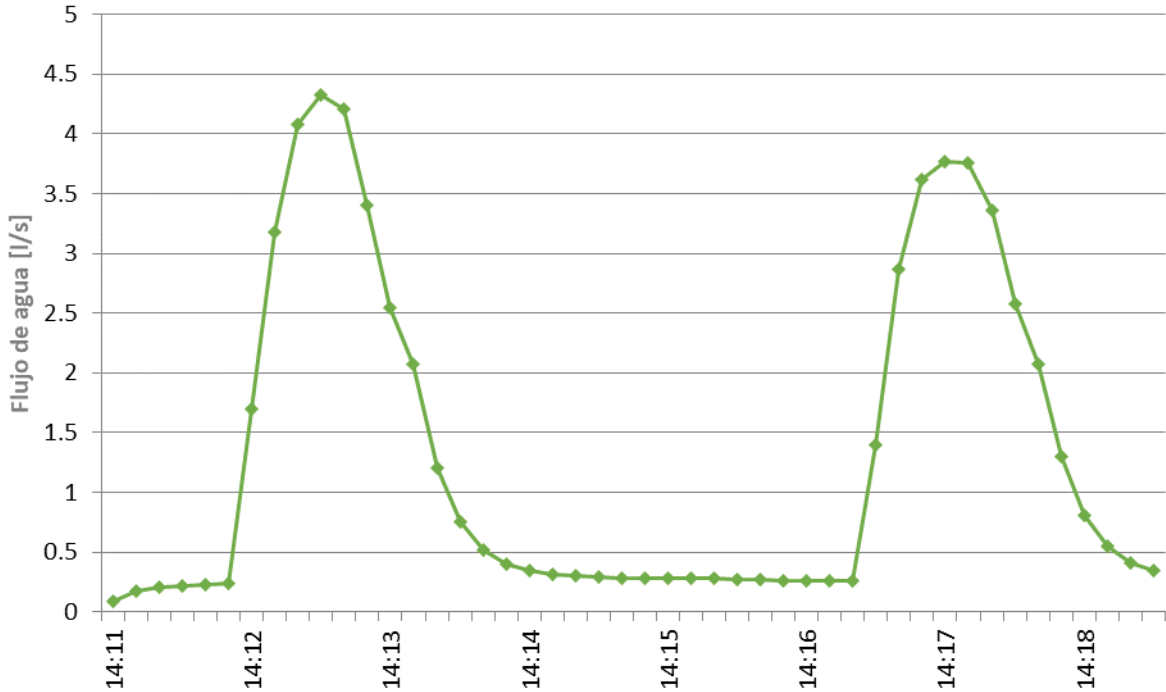


Figura 11. Ciclo de arranque y paro del sistema de alimentación de agua a la caldera. Elaboración propia.

También se registraron otros periodos de inyección y paro con ayuda del medidor de flujo instalado en la tubería, el resumen de los registros se muestra en la tabla 7. A partir de esta información se determinó un ciclo de inyección promedio, así como la fracción de hora promedio en la que se inyecta agua. Esto es relevante pues junto con la información del flujo instantáneo promedio se puede calcular el promedio de agua suministrada a la caldera por hora.

Tabla 7. Resumen del registro de ciclos de operación de la bomba. Elaboración propia

Hora de la lectura	Duración de la inyección [min]	Tiempo con la bomba fuera de servicio [min]	Total [min]
11:31:39	01:55	02:26	04:21
11:36:00	01:41	02:41	04:22
11:40:22	01:15	04:21	05:36
11:45:58	01:50	03:06	04:56
11:50:54	02:05	01:33	03:38
12:18:34	02:02	02:47	04:49
Promedio [min]	01:48	02:49	04:37
Promedio [s]	108	169	277
Fraciones de hora	0.3899	0.6101	

A partir de la información anterior y considerando la densidad del agua como 1000 [kg/m³], el promedio de agua suministrada a la caldera en una hora se calculó como:

$$A_{sum} = fl_{prom} * fr_{inyeccion} * t$$

$$A_{sum} \left[\frac{m}{h} \right] = 2.43 \left[\frac{kg}{s} \right] * 0.38989 * 3600 \left[\frac{s}{h} \right]$$

$$A_{sum} = 3414.1 \left[\frac{m}{h} \right]$$

Donde:

A_{sum} Es el agua suministrada, en kg/h

fl_{prom} es la fracción de hora asociada a las inyecciones

t es el tiempo en el que se está calculando el total de agua suministrada, en s

2.5.3. Purgas en la caldera

La caldera del sistema cuenta con dos tipos de purga: de superficie y de fondo. La purga de superficie está automatizada con un equipo que mide la conductividad del agua como parámetro indirecto para mantener el nivel total de sólidos disueltos en un valor aceptable. Esta purga opera con frecuencia y en intervalos largos, por lo que tiene asociada una pérdida de agua a la temperatura de operación de la caldera, con

la pérdida de energía asociada. Por su parte, la purga de fondo es operada con menor frecuencia que la purga de superficie y en intervalos más reducidos.

Las dificultades prácticas de medir el flujo de agua que se pierde en cada una de las purgas hacen necesario utilizar un factor para cuantificar de forma práctica estas pérdidas en la estimación de generación de vapor y eficiencia de la caldera. En este caso, se utilizó un factor del 2% del total del agua suministrada a la caldera.

2.5.4. Eficiencia de la caldera

La información disponible del sistema de generación de vapor permite calcular la eficiencia de la caldera por el método directo:

$$Eficiencia = \frac{\text{energía absorbida por el agua}}{\text{energía suministrada}} = \frac{m_{\text{agua}} * (hf - hi)}{m_{\text{comb}} * PC}$$

Los datos utilizados para evaluar la eficiencia son:

Agua	
Masa de vapor generado [kg/h]	3,345.81
Entalpía inicial [kJ/kg]	230.2
Entalpía final [kJ/kg]	2763.9
Combustible	
Volumen [m ³ /h]	286.81
Poder calorífico [GJ/m ³]	0.036636

Sustituyendo en la ecuación:

$$Eficiencia = \frac{3345.81 \left[\frac{kg}{h} \right] * (2763.9 - 230.2) \left[\frac{kJ}{kg} \right]}{286.81 \left[\frac{m^3}{h} \right] * 0.036636 \left[\frac{GJ}{m^3} * \frac{1\ 000\ 000\ kJ}{1\ GJ} \right]} = 80.68\%$$

2.5.5. Eficiencia de combustión de la caldera

Como parte de la evaluación del estado de la caldera se realizó un análisis de los gases de combustión emitidos durante la operación normal de dicho equipo. Se realizaron bloques de 4 mediciones a intervalos de 10 minutos durante una hora en el primer turno de la planta, las mediciones elegidas para el análisis se muestran en

la tabla 8. El equipo utilizado para estas mediciones fue el medidor de gases de combustión Bacharach PCA3 275.

Tabla 8. Extracto de mediciones de gases de combustión. Elaboración propia

Combustible	%O2	ppm CO	%CO2	%EFF	%EA	T-Stk	T-Air	ppm NOx	ppm NO
Gas Natural	2.9	0	10.1	82.5	14.6	203	22.4	145	138
Gas Natural	2.7	0	10.3	82.3	13	210	22.5	147	140
Gas Natural	2.7	0	10.3	82.2	13	213	22.5	151	144
Gas Natural	2.6	0	10.3	82.2	12.9	214	22.6	152	145
Gas Natural	2.6	0	10.4	82.1	12.4	215	22.6	153	146
Gas Natural	2.7	0	10.28	82.26	13.18	211	22.52	149.6	142.6
Promedio	2.7	0	10.28	82.26	13.18	211	22.52	149.6	142.6

EA : Exceso de aire; T-stk: Temperatura de los gases de combustión;
T-Air: Temperatura de los alrededores

El promedio de las mediciones indica que la eficiencia de combustión es de 82.26%, el exceso de aire es de 13.18% y la relación aire – combustible promedio es de 19.31. Considerando que la caldera utiliza gas natural como combustible y que su quemador es de boquillas, el exceso de aire es adecuado, pues está por encima del 10% mínimo recomendado⁴, logrando así una adecuada combustión y una pérdida de calor mínima en los gases de salida.

Respecto a la emisión de gases contaminantes, la NOM – 085 – SEMARNAT – 2011 indica que, para el caso analizado, el nivel máximo permisible de CO es de 400 ppm, mientras que para los NO_x es de 190 ppm. Como se observa en la tabla 8 los niveles obtenidos para la caldera son menores a lo que indica la norma, por lo que se cumple con ella y se asegura así una combustión eficiente también para el ambiente.

2.5.6 Factor de evaporación

A partir de la información del sistema que mostró en el apartado 3.4.4 se puede determinar el factor de evaporación.

$$f_e = \frac{h_2 - h_1}{2257.04 \text{ kJ}}$$

⁴ (THERMAL ENGINEERING LTDA)

$$f_e = \frac{(2763.05 - 230.83) [kJ/kg]}{2257.04 kJ/kg}$$

$$f_e = 1.122$$

Después de determinar el factor de evaporación, es necesario asociarlo a la capacidad nominal de la caldera para determinar la capacidad real de operación del equipo.

$$Capacidad_{real} = \frac{Capacidad_{nominal}}{f_e} = \frac{600 [CC]}{1.122} = 534.76 [CC]$$

2.5.7 Derrateo de la caldera

La caldera que forma parte del sistema de generación tiene una capacidad de 600 Caballos Caldera nominales, que en las condiciones de operación tienen una capacidad real máxima de 534.76 CC. Sin embargo la capacidad que se utiliza actualmente no es la máxima. Para evaluar el derrateo de la caldera, es necesario referirse al concepto de Caballo Caldera, estimar la energía que la caldera puede entregar y compararla contra la que realmente está entregando.

Capacidad nominal de la caldera

$$534.76 [CC] = 9.81 [kW] * 534.76 = 5246 [kW]$$

Capacidad máxima y promedio aprovechada de la caldera

Consumo máximo (del perfil de consumo): 4147 [kg/h]

Energía suministrada al vapor:

$$E [kW] = m * (hg - hf) = 4147 \left[\frac{kg}{h} \right] * (2763.05 - 230.83) \left[\frac{kJ}{kg} * \frac{1 h}{3600 s} \right]$$

$$E [kW] = 2916.98 [kW]$$

Porcentaje de aprovechamiento de la caldera:

$$Aprovechamiento = \frac{2916.98 [kW]}{5246 [kW]} = 55.60 \%$$

Consumo promedio (de las mediciones de agua de entrada a la caldera): 3414.09 [kg/h]

Energía suministrada al vapor:

$$E [kW] = m * (hg - hf) = 3414.09 \left[\frac{kg}{h} \right] * (2763.05 - 230.83) \left[\frac{kJ}{kg} * \frac{1 h}{3600 s} \right]$$

$$E [kW] = 2401.45 [kW]$$

Porcentaje de aprovechamiento de la caldera:

$$Aprovechamiento = \frac{2401.45 [kW]}{5246 [kW]} = 45.78 \%$$

En cualquiera de los dos casos, se observa que el aprovechamiento de la caldera no sobrepasa el 56% de la capacidad total del equipo, lo cual puede afectar de forma significativa su eficiencia, por lo que una oportunidad de mejora en este sistema es hacer la sustitución de la caldera.

2.5.8 Tuberías

Una sección importante de las tuberías que transportan el vapor desde el cuarto de máquinas y hacia las áreas de producción no permite el acercamiento para la toma de termografías, ya sea porque las tuberías se encuentran en espacios abiertos donde la luz solar dificulta la toma, o bien porque pasan por los plafones del área de producción y el acceso a estos espacios está restringido. Con el fin de determinar las pérdidas de calor en una sección de las tuberías de distribución de vapor se evaluó la pérdida de energía en la tubería de vapor para el trayecto de mayor longitud, que va desde el cabezal principal hasta el cabezal en el área de producción de aderezos. Esta sección cuenta con aislante, pero se encuentra a la intemperie por lo que es más susceptible a presentar mayores pérdidas de calor. Para dicha evaluación se tomó en cuenta una tubería de 500 metros de longitud tipo ANSI cédula 40 NP3 con un espesor de 5 mm, que opera a una presión de 6.2 bar. Se realizaron dos evaluaciones de las pérdidas de energía en las tuberías, la primera de ellas considera condiciones de operación que facilitan las pérdidas de calor, mientras que el segundo muestra condiciones mucho más favorables para la conservación de

energía en el vapor. Los resultados de las dos evaluaciones se muestran en la Tabla 9, incluyendo una comparación entre la potencia perdida en la tubería y la potencia térmica del vapor a la salida de la caldera, de donde se puede observar que el valor máximo es poco mayor al 1%, por lo que no es una fuente significativa de pérdidas de energía.

Tabla 9. Resumen del análisis de pérdidas de calor en tuberías principales. Elaboración propia

	Escenario 1	Escenario 2
Temperatura ambiente [°C]	10	23
Velocidad del viento [km/h]	8	8
Espesor del aislante [mm]	50.8 (Aislante en mal estado)	76.2 (Aislante en buen estado)
Pérdidas de calor [kW]	28.59	21.9
Porcentaje de pérdidas respecto a la potencia del vapor	1.11%	0.85%

Respecto a las zonas de la tubería en las que se pudo realizar inspección visual y termográfica, únicamente se observaron carencias de aislamientos en algunos cambios de trayectoria y en accesorios como bridas, válvulas y bombas, si bien dichas carencias pudieran no ser representativas desde el punto de vista de consumo energético y costos de operación, es un punto de mejora para contemplar en planes de mantenimiento por motivos de seguridad, ya que varios de estos tramos y accesorios se encuentran a nivel de piso y tienen temperaturas cercanas a los 150°C, mientras que los aislamientos mantienen una temperatura aproximada de 44°C.

Tuberías de Vapor

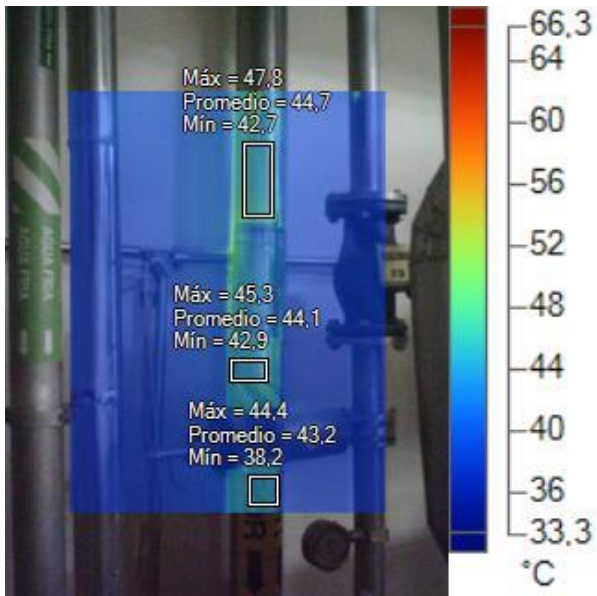


Imagen de luz visible

IR001588.IS2

06/10/2020 0:09:31

Aislamiento en buen estado de una tubería de vapor, temperatura promedio de 44.7°C

Información de la imagen

Temperatura de fondo	40,9°C
Emisividad	0,95
Temperatura promedio	39,4°C
Rango de la imagen	33,6°C a 65,9°C
Modelo de cámara	Ti125
Tamaño de sensor IR	120 x 160

Marcadores de la imagen principal

Nombre	Promedio	Mín	Máx	Segundo plano
A0	43,2°C	38,2°C	44,4°C	40,9°C
A1	44,7°C	42,7°C	47,8°C	40,9°C
A2	44,1°C	42,9°C	45,3°C	40,9°C

Trampa de Vapor

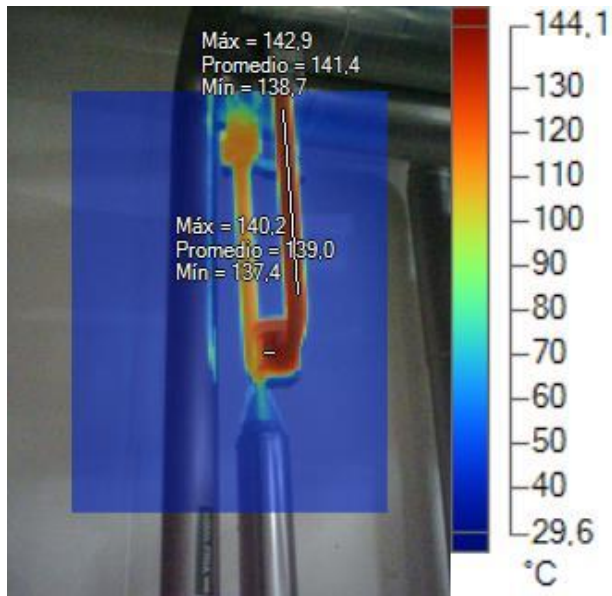


Imagen de luz visible

IR001618.IS2

06/10/2020 0:34:37

Trampa de vapor sin aislamiento con temperaturas de hasta 142.9°C

Información de la imagen

Temperatura de fondo	40,9°C
Emisividad	0,95
Temperatura promedio	49,4°C
Rango de la imagen	30,7°C a 143,0°C
Modelo de cámara	Ti125
Tamaño de sensor IR	120 x 160

Marcadores de la imagen principal

Nombre	Promedio	Mín	Máx	Segundo plano
B0				40,9°C
B1	141,4°C	138,7°C	142,9°C	40,9°C
B2	139,0°C	137,4°C	140,2°C	40,9°C

Válvula tubería de vapor

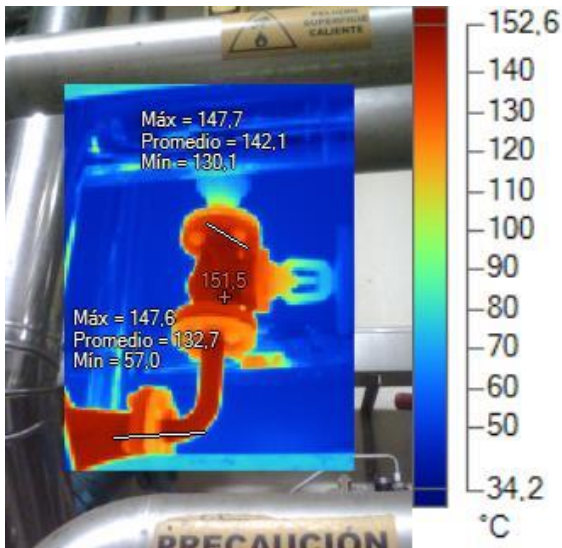


Imagen de luz visible

IR001604.IS2

06/10/2020 0:19:32

Válvula sin aislante, se muestra una temperatura máxima de 151.5°C.

Información de la imagen

Temperatura de fondo	40,9°C
Emisividad	0,95
Temperatura promedio	68,6°C
Rango de la imagen	35,4°C a 151,5°C

Marcadores de la imagen principal

Nombre	Promedio	Mín	Máx	Segundo plano
B0	132,7°C	57,0°C	147,6°C	40,9°C
B1	142,1°C	130,1°C	147,7°C	40,9°C

Nombre	Temperatura	Segundo plano
Caliente	151,5°C	40,9°C

2.6 Usos y consumos del vapor

2.6.1 Usos del vapor

En un principio, la planta fue diseñada para que toda la demanda de energía térmica que existía en el área de producción fuera cubierta por el vapor, pero en los últimos años la empresa ha iniciado una migración hacia el agua caliente, además de que el área de mantequillas está por ser separada de la planta, todo esto con las respectivas disminuciones de consumo de vapor asociadas ha provocado que el sistema de generación de vapor deje de ser adecuado para la planta.

A continuación, se describen de manera general los procesos en los que se utiliza el vapor.

- Pasteurización (Planta de helados).

La mezcla para helados llega a temperatura ambiente y se hace pasar a través de un intercambiador de calor de placas, de donde sale a una temperatura de entre 80 y 85 °C. La producción se realiza por lotes 4.5, 8 y 12 toneladas, siendo el primero el más común, el cual tarda aproximadamente 45 minutos en circular a través del intercambiador. En la figura 12 se muestra una fotografía del intercambiador utilizado para la fase de calentamiento de la pasteurización.



Figura 12. Pasteurizador del área de helados. Elaboración propia

- Líneas de desmolde (Planta de helados).

El vapor se mezcla con agua fría en una tina, a la que se introducen los moldes de paletas con el producto congelado, los moldes apenas pasan unos segundos dentro del agua tibia, pero esto es suficiente para que las paletas se puedan extraer de los moldes sin romperse.

- Pasteurización (Planta de aderezos).

En este proceso se utiliza un intercambiador de calor de tubos concéntricos para calentar una mezcla llamada pasta, que entra a temperatura ambiente y sale a una temperatura de entre 85 y 90 °C. Este proceso se realiza por lotes de 9 toneladas cada uno, la pasteurización de un lote tarda alrededor de 3 horas.

- Bowl (Planta de aderezos).

Se trata de un tanque en el que se realiza el mezclado y cocción de ingredientes para la salsa de tomate. Cuenta con un enchaquetado por el que circula el vapor, que calienta la mezcla desde la temperatura ambiente hasta 90°C en un intervalo de 20 minutos, después de lo cual la mezcla se mantiene a esa temperatura durante

aproximadamente 15 minutos para asegurar la cocción del producto. La producción se realiza por lotes y cada lote es de 1120 kg.



Figura 13. Bowl, planta de aderezos. Elaboración propia

- CIP (Planta de aderezos).

Cada uno de los tanques utilizados para almacenar el agua de limpieza cuenta con un serpentín en su interior, por el que se hace pasar el vapor que calienta el agua. Los sistemas CIP tienen la ventaja de que el agua puede reutilizarse si no se contamina de forma significativa. En el caso de esta planta, el agua se reutiliza un máximo de 5 veces, después de lo cual se desecha. Cuando esto sucede, el tanque de almacenamiento se llena nuevamente con agua limpia que entra a temperatura ambiente y debe calentarse hasta la temperatura de proceso (El agua de precalentamiento se utiliza a 75°C, el agua alcalina a 85°C y el agua ácida a 75°C). Al utilizarse en los procesos de limpieza, el agua no disminuye significativamente su temperatura, la disminución máxima detectada es de 4°C, por lo que las reposiciones

de calor para reutilización de agua son mínimas. Los lavados se pueden ejecutar en cuatro momentos diferentes: Antes de comenzar la producción en una línea, al hacer cambio de producto, al terminar la producción o si una línea o equipo permanece más de 72 horas sin ser utilizado. Los fines de semana se realizan limpiezas profundas a las líneas, por lo que el número e intensidad de lavados se incrementan y la producción disminuye.

En todos los usos enlistados anteriormente, el número de lotes que se procesan en un día está en función de la forma en que se planea la producción, por lo que los días no suelen ser iguales, esto impacta de manera significativa en el consumo de vapor.

- Pasteurizador (Planta de mantequillas)

La nata para mantequillas llega a temperatura ambiente y se calienta en un intercambiador de calor de placas, de donde sale a una temperatura de entre 80 y 85 °C. La producción se realiza por lotes de 12 toneladas, con tiempo de residencia de aproximadamente una hora en el intercambiador.

- CIP (Planta de mantequillas)

Es el mismo proceso que el del CIP de la planta de aderezos. El agua se calienta desde una temperatura de 25 °C hasta alcanzar una temperatura de 72°C.

- Emulsificantes

En estos equipos, la mezcla para margarina recibe un tratamiento térmico y mecánico que le permite alcanzar sus condiciones de textura y sabor finales.

- Tanques enchaquetados

Estos dispositivos cuentan con un serpentín en su superficie exterior por el que circula vapor. En ellos se calienta agua que se utiliza como materia prima.

- Deareador (Cuarto de máquinas).

El agua que se utilizará para alimentar a la caldera previamente suavizada se ingresa a temperatura ambiente a un tanque llamado Deareador, el cual también recibe vapor, con lo que el agua de alimentación alcanza una temperatura de entre 55 y 60 °C.

2.6.2. Demanda de vapor por usuario

La medición de flujos de vapor de forma directa requiere la instalación de equipos invasivos en las tuberías por las que circula el vapor, por lo que en este análisis el consumo de vapor no pudo medirse de forma directa, en su lugar se recurrió a un modelo que se basa en el comportamiento termodinámico de los puntos de consumo. Este modelo propone un balance de energía en cada punto de consumo y considera que una parte del calor que cede el vapor se disipará al ambiente, esta fracción de calor de desecho se estima con base en el tipo de intercambiador utilizado. En la Figura 14 se muestra un esquema del modelo propuesto.

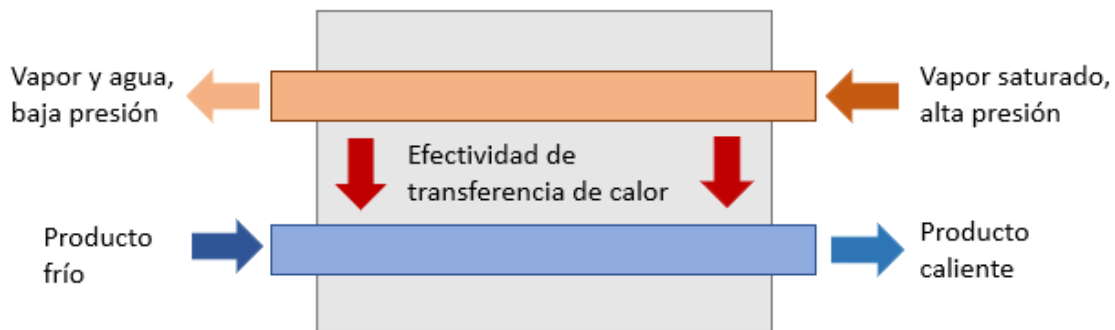


Figura 14. Esquema térmico de punto de consumo. Elaboración propia

La información referente a las condiciones iniciales y finales de los distintos productos fueron indicadas por el personal de producción. Específicamente se indicó la masa del lote, la duración promedio de procesamiento de un lote y las temperaturas inicial y final.

Las características de entrada del vapor se obtuvieron a partir de su presión absoluta de entrada, considerando que se trata de vapor saturado. Las características de salida se estimaron a partir de la caída de presión y calidad del vapor asociadas a estos dispositivos.

El concepto de eficiencia de transferencia de calor se utilizó para incluir las pérdidas de calor hacia el ambiente e igualmente depende del tipo de intercambiador.

A partir de la información anterior y considerando las propiedades térmicas y del lote de producto a calentar (Calor específico, masa y tiempo de procesamiento) se determinó el flujo de vapor requerido en kilogramos por minuto (kg/min).

$$m_{\text{producto}} \left[\frac{\text{kg}}{\text{min}} \right] = \frac{m_{\text{lote}} [\text{kg}]}{t_{\text{lote}} [\text{s}]}$$

$$m_v \left[\frac{\text{kg}}{\text{min}} \right] = \frac{m_{\text{producto}} \left[\frac{\text{kg}}{\text{min}} \right] * C_{p_{\text{producto}}} \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \right] * (T_{\text{final,producto}} - T_{\text{inicial,producto}}) [^\circ\text{C}]}{\text{Eficiencia del intercambiador} * (h_{\text{vapor,entrada}} - h_{\text{vapor,salida}}) \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]}$$

Este mismo procedimiento permite determinar la potencia entregada por el vapor, multiplicando la diferencia de entalpías específicas a la entrada y salida del cada intercambiador por el flujo másico de vapor (en kg/s).

$$P_{\text{termica}} \left[\frac{\text{kJ}}{\text{s}} \right] = (h_{\text{vapor,entrada}} - h_{\text{vapor,salida}}) [\text{kJ/kg}] * m_v [\text{kg/min}]$$

En el caso de los puntos de consumo de vapor que procesas sustancias diferentes al agua, el cambio de entalpías se determinó a través de la ecuación $\Delta H = m * Cp * \Delta T$. Las capacidades caloríficas utilizadas se enlistan en la tabla 10

Tabla 10. Capacidad calorífica a presión constante de las sustancias procesadas. Elaboración propia con datos de (Rodríguez Guzmán, 1993)

Sustancia	CP [kJ/kg-K]
Helado	2.95
Mayonesa	2

La tabla 11 incluye un ejemplo de dicho cálculo, en específico de uno de los pasteurizadores del área de helados, mientras que la tabla 12 se muestra la demanda de vapor en los puntos de consumo de las áreas de helados y aderezos.

Tabla 11. Cálculo del consumo de vapor en pasteurizador del área de helados. Elaboración propia

CONCEPTO	CANTIDAD	UNIDADES
Lado de baja temperatura (producto)		
Masa del lote	4000	kg
Duración del proceso	45	min
Temperatura de entrada	25	°C
Temperatura de salida	83	°C
Calor específico del producto	2.95	kJ/kg°C
Lado de alta temperatura (vapor)		
Presión de entrada	6.27	bar abs
Presión de salida	5.95	bar abs
Calidad de salida	0.6	[1]
Flujo de vapor		
Energía absorbida por el producto	684400	kJ
Energía cedida por el vapor	837.09	kJ/kg
Eficiencia de transferencia	77	%
Vapor requerido para el proceso	1022	kg
Flujo de vapor	23.6	kg/min

Tabla 12. Demanda de vapor por punto de consumo. Elaboración propia

Punto de consumo	Presión de entrada del vapor, bar	Demanda de vapor, kg/min
Pasteurizador helados 1	5.50	23.60
Pasteurizador helados 2	5.50	23.60
Desmolde de paletas 1	4.90	2.50
Desmolde de paletas 2	4.90	2.50
Desmolde de paletas 3	4.90	2.50
Pasteurizador aderezos 1	5.30	6.68
Pasteurizador aderezos 2	5.30	6.68
Bowl	5.30	30.86
CIP 1, Pre calentamiento aderezos	5.30	8.44
CIP 1, Agua alcalina aderezos	5.30	10.13
CIP 1, Agua acida aderezos	5.30	8.44
CIP 2, Pre calentamiento aderezos	5.30	8.44
CIP 2, Agua alcalina aderezos	5.30	10.13
CIP 2, Agua acida aderezos	5.30	8.14
Deareador	6.37	2.68
Pasteurizador mantequillas	4.98	3.49
Tanques enchaquetados mantequillas	4.48	5.48
CIP preenjuague mantequillas	4.98	5.58
CIP lavado alcalino mantequillas	4.98	5.34
CIP enjuague alcalino mantequillas	4.98	5.46
CIP lavado acido mantequillas	4.98	5.58
CIP enjuague del acido mantequillas	4.98	5.34
Emulsificantes mantequillas	4.58	1.97

En la tabla 12 se observa que los equipos que más vapor requieren para operar son el bowl del área de aderezos (31 kg/min) y los pasteurizadores de la línea de helados (22.6 kg/min), esto está relacionado con la forma en que operan, los tamaños de lote que procesan y el tiempo en el que deben hacerlo para asegurar la calidad del producto. Sin embargo, es importante observar que estos valores de demanda no indican de forma directa cuáles son los mayores consumidores de vapor, ya que esto está asociado además con el tiempo de uso de cada equipo, el cual a su vez depende de la planeación de la producción.

2.6.3. Perfil de consumo de vapor

La operación del área de producción de la planta es permanente a lo largo de todo el año, en los tres turnos establecidos. Esto ocasiona que la demanda de vapor sea permanente, sin embargo esta demanda cambia en función de la forma en que se planea la producción, además de que los sábados y domingos la producción disminuye para dar tiempo a las actividades de limpieza. Todo lo anterior impide que se pueda obtener un perfil de consumo de vapor único para la planta, en lugar de esto se realizó el análisis de la actividad en un día “entre semana” donde los lavados son mínimos y se mantiene un ritmo de producción. El resultado de este análisis se muestra en la Figura 15. En dicha figura se observa que el proceso que más vapor consume es el pasteurizado de helados, esto se debe no solo a su alta demanda sino a la frecuencia con que se utiliza. Otros datos relevantes que pueden obtenerse del perfil son los consumos máximo y mínimo que se presentan a lo largo del día. El consumo máximo se presenta de las 20 a las 21 horas y es de 4185 kg, mientras que el consumo mínimo se presenta entre las 14 y 15 horas y es de 1403 kg. En el punto de consumo máximo se concentran usuarios que difícilmente pueden desplazarse a otro momento del día, como la pasteurización de helados o el desmolde de paletas pues ya se realizan casi todo el día, pero hay otros como el bowl de aderezos que presentan una oportunidad de ajustarse a otro momento del día, de modo que pueda reducirse la demanda máxima de vapor. El punto mínimo de demanda está relacionado con un cambio de turno dentro de la planta, pues muchas actividades disminuyen o se detienen a esta hora. Respecto a los usuarios del vapor, todos pertenecen a alguna de las áreas de producción, con excepción del deareador el cual se encuentra en el cuarto de calderas por lo que solo se incluye en esta gráfica. Su operación es permanente y constante a lo largo del día y tiene una demanda de vapor asociada de 81 kg/h.

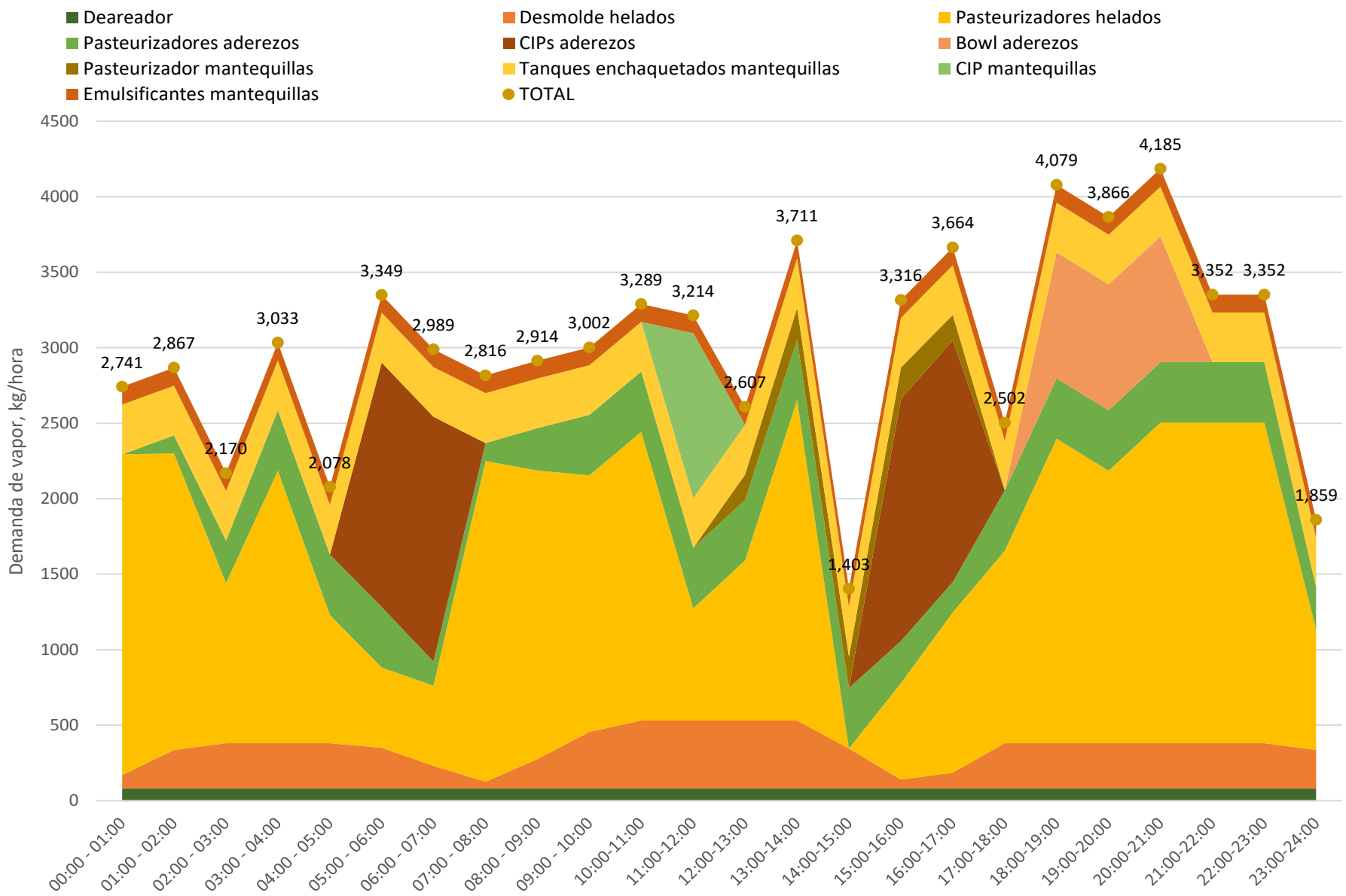


Figura 15. Perfil general de demanda de vapor. Elaboración propia

En la figura 16 se muestra el perfil de demanda de vapor del área de producción de helados. En este gráfico se observa que la demanda de vapor en el desmolde de helados se mantiene en un rango muy reducido de valores, de 0 a 450 kg/h. La demanda en los pasteurizadores de helados no es uniforme, va desde los 0 kg/h hasta los 2124 kg/h, además de que presenta múltiples picos y valles. La falta de uniformidad en el consumo está relacionada con los periodos de encendido y apagado de los pasteurizadores, pues estos se realizan de forma gradual. La demanda máxima de vapor se presenta entre las 13 y las 14 horas y es de 2574 kg/h, mientras que la demanda mínima se presenta entre las 14 y 15 horas, con un valor de 266 kg/h. En general se observa que la demanda de vapor de esta área es permanente, aunque no sea igual a lo largo del día.

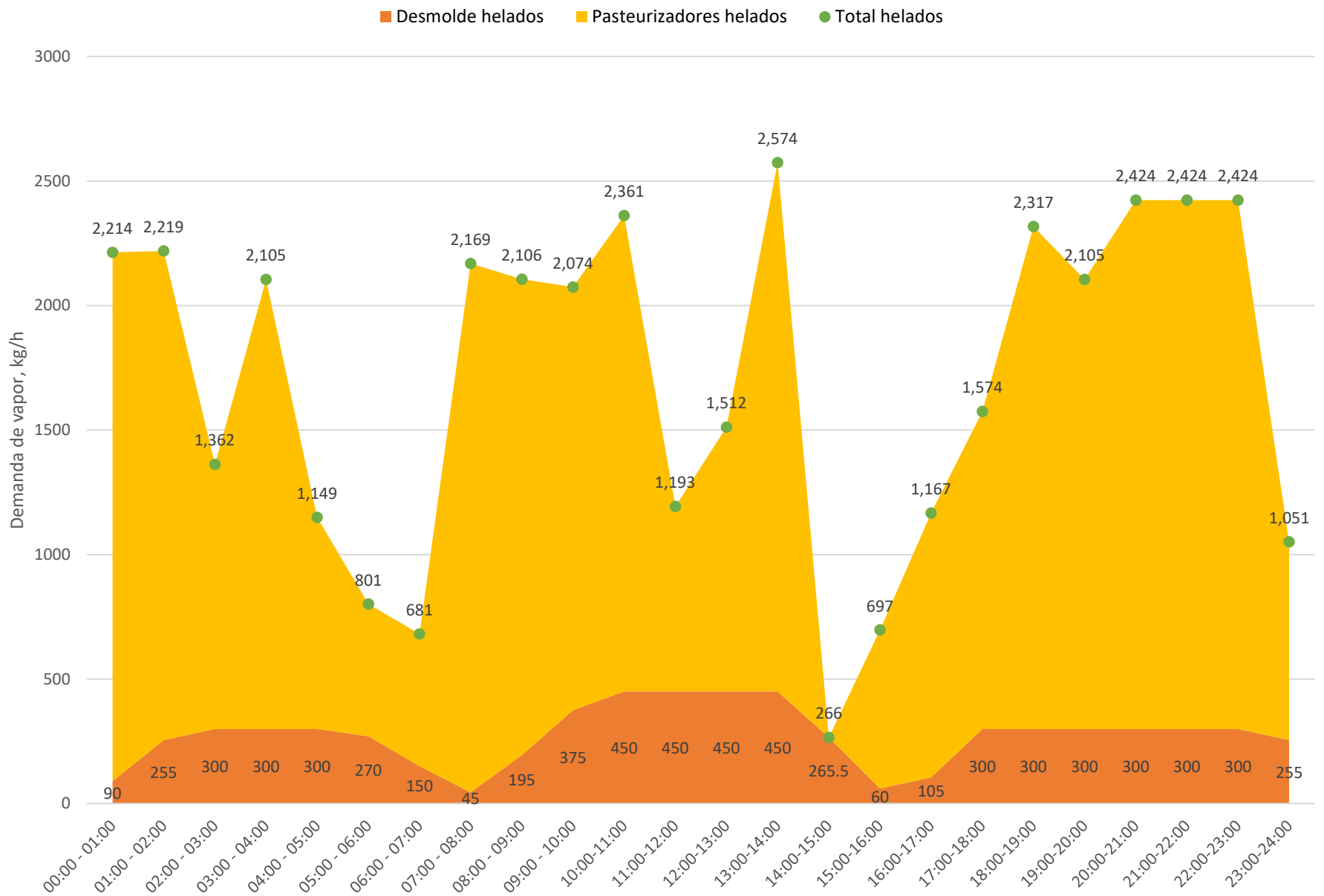


Figura 16. Perfil de demanda de vapor en el área de helados. Elaboración propia

En la figura 17 se muestra el perfil de demanda de vapor para el área de aderezos, a la que pertenecen 3 de los usuarios de vapor de la planta. Dos de estos usuarios, el CIP de aderezos y el bowl, tiene consumos significativos pero puntuales durante el día. El CIP consume vapor dos veces al día por espacio de dos horas cada vez y su demanda es de 1620 kg/h. El bowl se activa una sola vez en un periodo de 3 horas, con una demanda de 833 kg/h. En cuanto a los pasteurizadores de aderezos, su demanda de vapor se da de forma más continua, pues solo llega a ser cero una hora al día; de las 23 horas restantes, 15 tienen una demanda constante de 401 kh/g y las restantes están entre este valor y los 0 kg/h, asociadas al arranque y paro gradual de los pasteurizadores. La demanda máxima total de vapor en esta área se presenta entre las 5 y 6 horas y es de 2021 kg/h, mientras que la demanda se suspende en la primera hora del día.

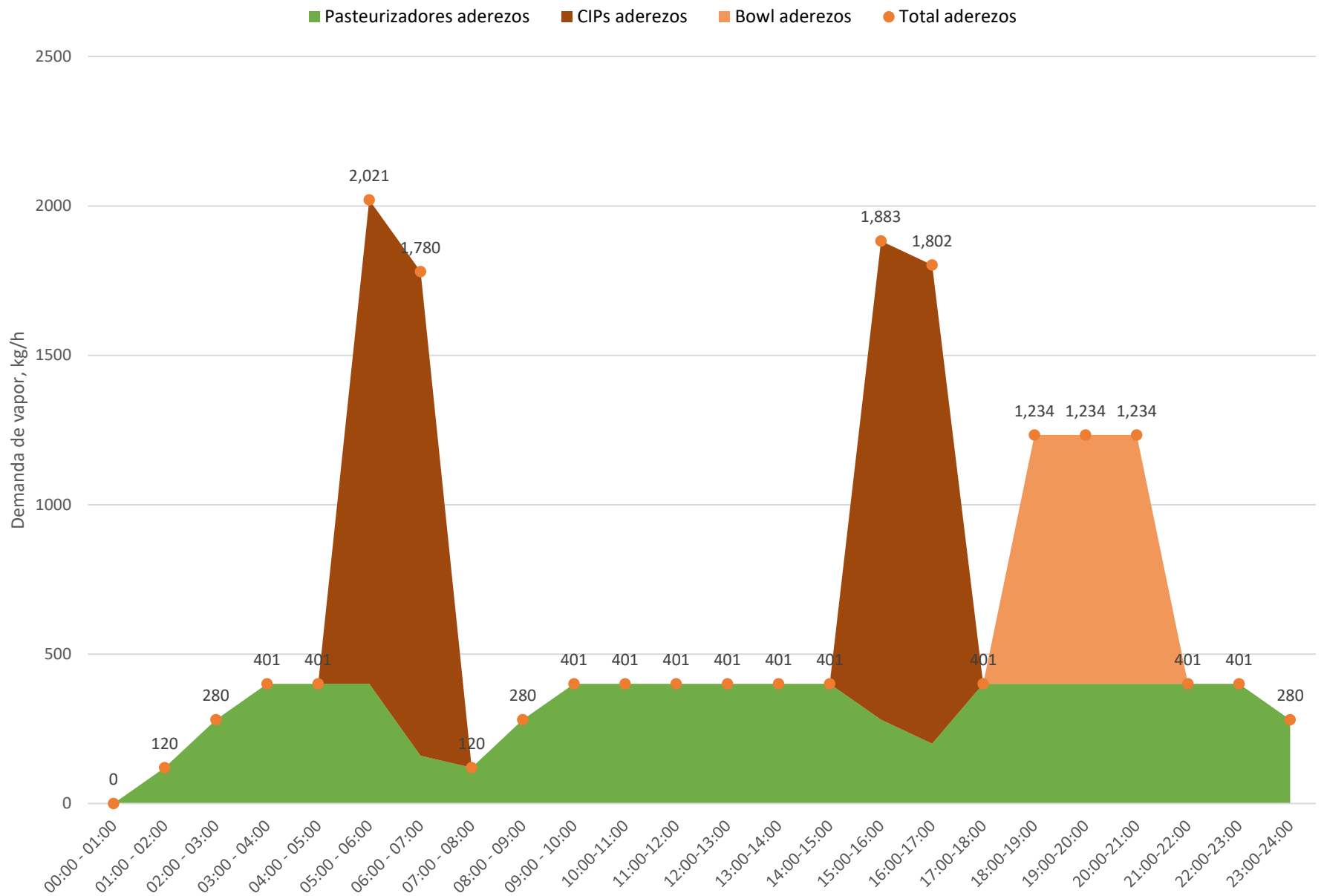


Figura 17. Perfil de demanda de vapor en el área de aderezos. Elaboración propia

En la figura 18 se muestra el perfil de demanda de vapor para el área de mantequillas, en la que se encuentran 4 usuarios de vapor. Los tanques enchaquetados y los emulsificantes presentaron un consumo continuo y constante a lo largo del día, en el primer caso la demanda fue de 329 kg/h y en el segundo fue de 118 kg/h. El CIP de esta área consume vapor una vez al día, en un periodo de una hora y con una demanda de 1093 kg/h, mientras que el pasteurizador de esta área también consumen vapor solo una vez al día, pero su periodo de consumo es de 5 horas en las que la demanda varía levemente entre los 168 kg/h y los 327 kg/h. En esta área la máxima demanda se presenta entre las 11 y 12 horas y tiene un valor de 1540 kg/h, la demanda mínima es de 447 kg/h y abarca los periodos de entre las 0 y 11 horas, y de las 17 a las 24 horas.

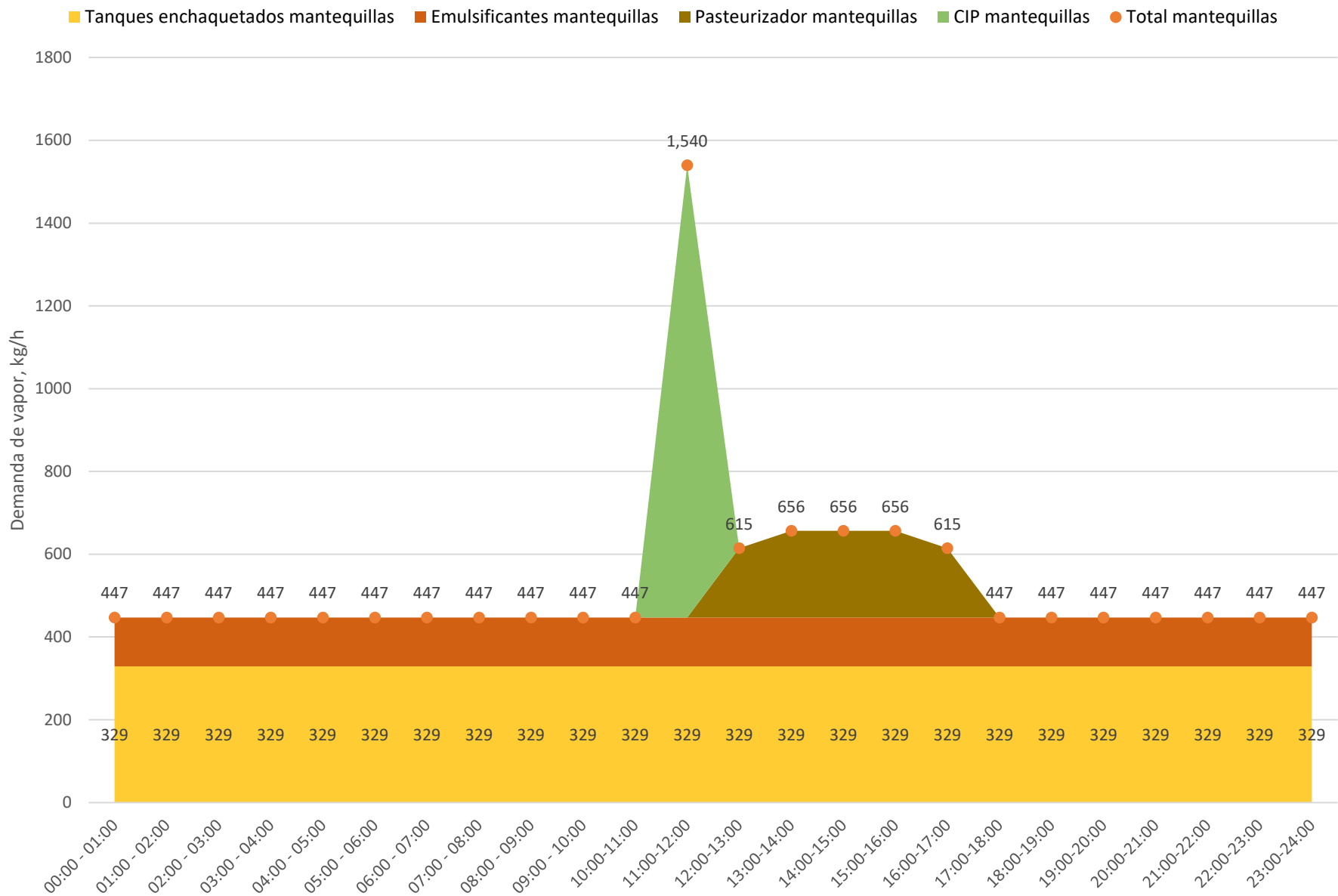


Figura 18. Perfil de demanda de vapor en el área de mantequillas. Elaboración propia

En la Tabla 13 se muestra el total de consumo de vapor por cada punto y el porcentaje que representa del vapor generado para el periodo analizado. Los cuatro usuarios de vapor que reportaron un mayor consumo durante el periodo analizado fueron los dos pasteurizadores del área de helados, uno de los pasteurizadores del área de aderezos y los tanques enchaquetados del área de mantequillas. Estos usuarios en su conjunto representan poco más del 60% del total de consumo de vapor dentro de la planta.

Tabla 13. Consumo de vapor diario por usuario. Elaboración propia

Punto de consumo	consumo de vapor diario, kg	Fracción del total de vapor generado
Pasteurizador helados 1	17572.90	21.88%
Pasteurizador helados 2	16829.63	20.96%
Desmolde de paletas 1	805.50	1.00%
Desmolde de paletas 2	2760.00	3.44%
Desmolde de paletas 3	3000.00	3.74%
Pasteurizador aderezos 1	0.00	0.00%
Pasteurizador aderezos 2	7729.65	9.63%
Bowl	2499.41	3.11%
CIP 1, Pre calentamiento aderezos	1012.28	1.26%
CIP 1, Agua alcalina aderezos	1215.50	1.51%
CIP 1, Agua acida aderezos	1012.28	1.26%
CIP 2, Pre calentamiento aderezos	1012.28	1.26%
CIP 2, Agua alcalina aderezos	1215.50	1.51%
CIP 2, Agua acida aderezos	976.55	1.22%
Deareador	1930.74	2.40%
Pasteurizador mantequillas	962.23	1.20%
Tanques enchaquetados mantequillas	7895.08	9.83%
CIP preenjuague mantequillas	167.31	0.21%
CIP lavado alcalino mantequillas	320.36	0.40%
CIP enjuague alcalino mantequillas	163.75	0.20%
CIP lavado acido mantequillas	200.78	0.25%
CIP enjuague del acido mantequillas	2836.82	3.53%
Emulsificantes mantequillas	2836.82	3.53%
Otros	5344.08	6.66%

Capítulo III. Propuestas de mejora

3.1 Indicadores del desempeño energético

Se proponen los siguientes indicadores con la finalidad de dar un seguimiento adecuado a las acciones que se ejecuten en el sistema de generación de vapor, en concreto se propone como indicador principal la cantidad de toneladas de vapor generados en función de la energía, también se pueden realizar en función del consumo de gas. En ambos casos es importante la correcta calibración de los instrumentos de medición para realizar dicho seguimiento.

$$IDEn1 = 0.3249 \text{ [Ton vapor/GJ]}$$

$$IDEn2 = 0.1190 \text{ [Ton vapor/m}^3 \text{ GN]}$$

Otros indicadores

Se propone estos otros indicadores que, si bien no son en función del consumo de energía, ayudan para tener una referencia del costo. Estos ya se pueden ver a nivel global.

$$IC1 = 455.07 \text{ [$/Ton Vapor]}$$

$$IC2 = 122.52 \text{ [$/GJ]}$$

$$IC3 = 4.49 \text{ [$/m}^3 \text{ GN]}$$

Todos los indicadores son con los datos del año 2019.

La ventaja de los indicadores energéticos es que involucran la producción, a diferencia de si solamente se lleva un registro de consumo de m³ de gas. Por otra parte, es conveniente llevar el registro de emisiones de CO₂.

3.2 Sustitución de caldera

Justificación.

La caldera utilizada en el sistema de vapor analizado tiene una capacidad de 600 CC y entrega vapor saturado a 7.05 bar_a. El análisis del derrateo de la caldera indica que actualmente se aprovecha menos del 60% de la capacidad máxima de este equipo, esto impacta directa y significativamente en su eficiencia, por lo que se sugiere sustituirlo por un equipo de menor capacidad.

Descripción de la propuesta.

Reemplazar la caldera actual por una caldera de 350 CC de tipo pirotubular que utilice gas natural como combustible. No se considera un cambio de tecnología pues la demanda de vapor no permanece constante a lo largo del día, por lo que una caldera acuotubular podría no tener un buen desempeño en este escenario. Se sugiere que se utilice gas natural ya que dentro de la planta no se generan desechos que pudieran utilizarse como combustible, además de que el gas natural presenta buenas prestaciones para los usos de la planta en general.

Se propone el cambio por una caldera POWERMASTER de 350 CC de 3 pasos tipo Wet-Back modelo WB-A2-3P para abastecer las necesidades de vapor a los equipos actuales. La eficiencia del equipo propuesto y sus costos, representan una buena opción. La propuesta considera la sustitución de los siguientes equipos dentro del sistema de generación de vapor:

- Caldera
- Forro de acero inoxidable
- Sistema de alimentación de agua
- Chimenea
- Suavizador de agua
- Tanque de purgas

Análisis económico

La generación diaria actual de vapor es de 80,299.44 kg, aunque habrá una disminución en el consumo debido al fin del contrato de compraventa del área de

mantequillas. Por esta razón, el consumo promedio diario esperado es de 64,916.31 kg de vapor.

La caldera propuesta para la sustitución tiene una eficiencia térmica al 100% de carga de 90.5%, a una presión de trabajo de 7 kg/cm², sin embargo las condiciones de operación reales pueden no ser iguales a las establecidas en la obtención de esta eficiencia, por lo que para el análisis económico se utilizará una eficiencia del 88%.

Se considera el poder calorífico y costo promedio del combustible en 2019. En la tabla 14 se muestra el costo actual y el costo esperado del combustible asociado a la generación de vapor.

Costo actual del combustible por generación de vapor:

$$Energ\grave{a} \text{ consumida} = m_{\text{vapor}} * (h_g - h_f) * \eta_{\text{caldera}}$$

$$Combustible \text{ consumido} = \frac{Energ\grave{a} \text{ consumida } kJ}{PCI \text{ combustible, } \frac{kJ}{m^3}}$$

Costo del combustible consumido

$$= Combustible \text{ consumido, } m^3 * Costo \text{ combustible } \frac{\$}{m^3}$$

Tabla 14. Análisis de la propuesta de sustitución de la caldera. Elaboración propia.

	Actual	Propuesta
Vapor generado por día, kg	80,299.44	64,916.31
Energía en un kg de vapor, kJ	2,532.22	2,532.22
energía para generar la carga de vapor, kJ	203,336,003.70	164,382,495.48
Eficiencia de la caldera	80.68%	88.00%
Energía consumida por la caldera, kJ	252,027,768.60	186,798,290.32
PCI combustible, kJ/m ³	36,636.19	36,636.19
Combustible consumido por la caldera, m ³	6,879.20	5,098.74
Porcentaje de aprovechamiento promedio de la caldera	56.11%	85.91%
Costo promedio del combustible, \$/m ³	\$4.49	\$4.49
Costo del combustible consumido por la caldera, \$/día	\$30,868.27	\$22,878.98

El costo aproximado de la caldera propuesta es de \$3,950,960 MXN (sin considerar los costos de instalación), por lo que al hacer la sustitución de este equipo y cortar la línea de vapor que va hacia mantequillas, el periodo simple de recuperación es de un año y 5 meses.

Es importante observar que esta propuesta se elaboró considerando la demanda máxima de vapor que se presentó durante el análisis, por lo que si se hacen ajustes en la operación de los equipos que consumen vapor de modo que logre disminuirse la demanda, la capacidad de la nueva caldera podría reducirse a 300 C.C.

3.3 Calibración de equipos de medición instalados

Justificación

El sistema de vapor analizado cuenta con medidores de flujo de agua de entrada a la caldera, flujo de vapor que sale de la caldera, flujos de vapor hacia las plantas de helados y mantequillas-aderezos (una línea general de la que se dividen los flujos para ambas áreas) y consumo de combustible en la caldera, sin embargo no se cuenta con certificados de calibración recientes de estos dispositivos, ni hay consenso entre personal de mantenimiento y área de ingeniería respecto a la fecha de última calibración. Por otro lado, la información que estos medidores pueden aportar permitiría dar seguimiento puntual a la eficiencia de la caldera, al consumo de combustible e incluso a parámetros relacionados con la productividad en las áreas de producción.

Descripción de la propuesta

Elaborar e implementar un programa de calibración de los medidores de agua, vapor y combustible instalados en el sistema de vapor.

3.4 Reparación de la línea de retorno de condensados

Justificación

El vapor que se utiliza en la mayoría de los puntos de consumo no se mezcla con otras sustancias, sino que se somete a un proceso de transferencia de calor, por lo que la única contaminación que puede sufrir se da en las tuberías de distribución.

Además, es importante recordar que el agua de entrada a la caldera se somete a un proceso de ablandamiento, lo que representa un costo adicional en productos químicos.

Descripción de la propuesta

Rehabilitación de las líneas y tanques de condensados.

En principio, es necesario analizar las posibles causas de avería de las líneas de retorno de condensados y verificar que los elementos de dichas líneas hayan sido correctamente diseñados. De no ser así, es necesario que se efectúe un rediseño en el que se consideren los volúmenes de agua líquida y vapor flash que se transportarán por las tuberías.

Ahorros

La recuperación de vapor condensado se da de forma parcial, principalmente porque no todos los puntos de consumo son intercambiadores de calor pero además por la presencia de fugas de vapor. Considerando los puntos de consumo que no permiten el retorno de condensados y las fugas de vapor, se puede recuperar hasta un 80% del total de vapor producido por la caldera, lo que representa un ahorro en el consumo de energía del 3.5% (5.9 MW), que anualmente representa un ahorro económico de aproximadamente \$450,000.00, esto sin contar en ahorro por reducción en el consumo de sales para el suavizado del agua corriente.

3.5 Perfil de eficiencia de la caldera

En el presente estudio se realizó un análisis puntual de la eficiencia energética de la caldera, sin embargo este parámetro depende principalmente de la demanda de vapor, por lo que necesariamente variará en el tiempo. Por esta razón, se considera pertinente realizar un análisis más extenso de la eficiencia del generador de vapor, visto como sistema y en función de la demanda de vapor, lo cual llevaría a obtener un perfil de eficiencia en función de la demanda.

La planta a la que pertenece el sistema de vapor analizado opera tres turnos, siete días a la semana y se identificó una diferencia entre las actividades que se realizan de lunes a viernes y los fines de semana: de lunes a viernes se prioriza la producción,

realizando limpiezas básicas al inicio y al final de cada lote de producción, mientras que los fines de semana la actividad preponderante es la limpieza de equipos y espacios. En ambos periodos se utiliza vapor aunque para diferentes fines, lo que puede generar demandas de vapor diferentes. Del mismo modo puede analizarse la demanda en los tres turnos, ya que la velocidad de producción no suele mantenerse constante.

Para implementar esta medida es necesario hacer la calibración de los dispositivos de medición que ya están instalados en las líneas de agua, vapor y gas de la caldera. Además, debe elaborarse una bitácora donde el personal de mantenimiento o el responsable de la medida puedan asentar los valores que registren los equipos de medición.

3.6 Plan de seguimiento al desempeño energético

Como pudo observarse en el apartado de usos y consumos del vapor, este recurso está involucrado en procesos fundamentales dentro de la planta y tiene alta demanda. Es por ello que, hacer un seguimiento más puntual de la forma en que se consumió la energía en este sistema resulta de relevancia para la planta.

Un siguiente paso después de establecer el perfil de eficiencia del generador de vapor es empatar esta información con la producción por área y/o por producto, de modo que se pueda analizar el porcentaje del costo total del producto asociado al consumo de energía. También podrían hacerse proyecciones de consumos futuros de energía con base en los planes de producción y finalmente, evaluar sistemas térmicos que no consuman vapor y que permitan lograr el mismo efecto consumiendo menos energía, por ejemplo agua caliente, resistencias eléctricas o fluidos térmicos.

Esta propuesta requiere el trabajo conjunto de las áreas de producción y mantenimiento, de modo que la primera aporte datos de los lotes procesados en casa usuario del vapor, en términos claros, mientras que el área de mantenimiento debe dar seguimiento a la producción de vapor y al consumo de gas y agua en el sistema. Con esta información puede determinarse el consumo de vapor por usuario

y por tipo de producto, datos que permitirán tomar decisiones considerando este factor como criterio de decisión.

Capítulo IV. Conclusiones

Con base en el análisis de la información recopilada, se determinó que el sistema de generación de vapor y en especial la caldera no corresponden con las necesidades de vapor de la planta, pues la capacidad de la caldera es el doble de la demanda máxima de vapor identificada en un día típico.

Al analizar los datos históricos de facturación y consumo de gas natural de la planta, se identificó que en 2019 la planta consumió casi 3 millones de metros cúbicos de gas natural, lo que en energía representa poco más de cien mil GJ y tuvo un costo asociado de poco menos de trece millones y medio de pesos. De este gran total, el gas consumido por la caldera representa el 91.6% del total de gas facturado, siendo el mayor consumidor de combustible, esto hace que cualquier medida que se implemente para mejorar la forma en que se genera, distribuye y consume vapor dentro de la planta represente una oportunidad de ahorro significativa.

Los usos del vapor dentro de la planta pueden dividirse en cinco grandes bloques: calentamiento de materias primas, pasteurizado de producto, calentamiento de agua para limpieza, calentamiento de agua para desmolde y vapor para el deareador. En los tres primeros, el vapor cede su energía a otro fluido sin entrar en contacto con el producto, lo que abre la oportunidad de reutilizar el condensado que sale de estos usuarios. El aprovechamiento de estos condensados puede representar un ahorro en el consumo de gas de hasta 3.5% anual. Otro punto importante en el tema de los usuarios de vapor es que se trata de procesos fundamentales para la producción, por lo que su disponibilidad y buena operación son requisitos indispensables para la planta. Cualquier propuesta de sistema para cubrir la demanda térmica de estos procesos debe asegurar disponibilidad y suficiencia para los procesos.

La demanda de vapor de los usuarios analizados va de los 2 kg/min para el emulsificante del área de mantequillas hasta los 30 kg/min para el bowl de salsa de tomate. Estos valores puntuales permitieron estimar los consumos de vapor a partir de las bitácoras de operación de la planta para un día de operación promedio. El usuario que tuvo un mayor consumo para el día analizado fue el pasteurizador 1, con un total de 17.5 ton/día, mientras que el usuario con menor consumo es el tanque

de enjuague alcalino del CIP de mantequillas, con un total de 163 kg/día. Para el día analizado, el pasteurizador 1 del área de aderezos no presentó consumo, sin embargo, los operadores reportan que este equipo sí se usa con frecuencia.

El perfil de consumo de vapor del día analizado indica que la mayor demanda de vapor es de 4185 kg/h y se presenta entre las 20 y 21 horas, se identificó que en este horario se hizo uso del vapor para calentar el agua de los CIP de aderezos, por lo que podría analizarse la posibilidad de cambiar el horario en el que se lleva a cabo dicho calentamiento. Por otro lado, la menor demanda de vapor se presentó entre las 14 y 15, tiene un valor de 1403 kg/h y está asociada al cambio de turno que se presenta en dicho horario.

Respecto a la operación de la caldera, se analizó un día promedio de operación. La eficiencia se determinó por el método directo, resultando del 80.68%. El factor de evaporación del equipo fue de 1.122, lo que hace que la caldera tenga una capacidad real máxima de 534.76 CC. En lo referente al derrateo de la caldera, se estimó que la caldera opera al 55.6% de su capacidad nominal en los momentos de máxima demanda y al 46% de su capacidad con una demanda promedio de vapor.

Se identificaron propuestas de mejora y de análisis futuros en el sistema. En el primer rubro, se propone la sustitución de la caldera actual por una de 350 C.C., considerando que la demanda de vapor de la planta se reducirá por acuerdos comerciales. Esta sustitución aumentaría el porcentaje de uso y la eficiencia térmica de la caldera. También se sugiere calibrar los medidores de agua, vapor y gas instalados en el cuarto de máquinas, con la finalidad de obtener lecturas más certeras del comportamiento del sistema, aprovechando los elementos con los que ya se cuenta. Esto mismo sucede con las líneas de retorno de condensados, que existen, pero actualmente se encuentran inhabilitadas, su reparación permitiría tener ahorros en energía, agua y químicos para acondicionamiento del agua.

Algunos elementos del sistema en los que valdría la pena profundizar para identificar más propuestas de mejora son la eficiencia de la caldera, las tecnologías usadas en los puntos de consumo y el seguimiento al desempeño energético del sistema de vapor. Respecto a la eficiencia de la caldera, se sugiere que se elabore un perfil de eficiencia, considerando los cambios en la demanda de vapor. Esta propuesta parte

de los resultados obtenidos en el perfil de demanda, en el que se observa que ésta es permanente, mas no constante a lo largo del día, por lo que conocer el comportamiento de la eficiencia en diferentes escenarios de demanda permite identificar los puntos de operación en los que la eficiencia es mayor y abre la posibilidad de ajustar los planes de producción para operar en dichos puntos. En lo que se refiere a las tecnologías de los puntos de consumo, es necesario evaluar si el uso de vapor representa una ventaja significativa para el proceso o puede sustituirse por otro medio o método de calentamiento, esta evaluación requiere el trabajo conjunto del personal de producción, mantenimiento y energía de la planta, de forma que se tengan presentes las tres visiones del problema. Finalmente, dado el alto consumo de energía del sistema de vapor y su importancia en el proceso productivo actual, se considera necesario dar seguimiento a su desempeño energético. Esta medida concentra todos los puntos anteriores, pues requiere la calibración de los instrumentos de medición de la planta y el seguimiento a parámetros como el consumo de combustible, la generación y consumo de vapor, la eficiencia de la caldera entre otros.

Referencias

- Aguilar López, D. (2019). *Repositorio de tesis DGBSDI*. Obtenido de Dimensionamiento de una turbina de gas para el suministro de energía en las instalaciones de la Alberca Olímpica de Ciudad Universitaria: http://132.248.9.41:8880/jspui/handle/DGB_UNAM/TES01000784448
- Carbotecnia*. (14 de Febrero de 2020). Obtenido de <https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/suavizadores-y-desmineralizadores/suavizacion-de-agua/>
- Cengel, Y. (2015). *Termodinámica*. Mexico: McGraw Hill.
- Containers, G. d. (2 de Diciembre de 2017). *ASI SE HACE MAYONESA DiscoveryMAX [Archivo de video]*. Obtenido de Youtube: <https://www.youtube.com/watch?v=iechHidffnpg>
- División procesos - ESCO Argentina. (24 de Enero de 2019). *Ingeniería Química*. Obtenido de <https://iquimica.com.ar/valvulas-de-purga-de-caldera-son-importantes/#:~:text=La%20v%C3%A1lvula%20de%20purga%20continua,de ntro%20de%20los%20l%C3%ADmites%20admisibles.>
- Fontanet Calderas y Tanques. (10 de Enero de 2021). *Artículo técnico: Purgas Automáticas*. Obtenido de <http://www.calderasfontanet.com/es/novedades/4/articulo-tecnico-purgas-automaticas>
- García S., L. E. (s.f.). *Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas*. Obtenido de https://www.cdtdegas.com/images/Descargas/Nuestra_revista/MetFlu1/ejemplarN001_1mediciones_eficiencia_combustion.pdf
- Gomez C., J. (2011). *Comparación de dos métodos para el cálculo del rendimiento de calderas: código ASME PTC-4 y estándar EN 12952-15*. Obtenido de Repositorio institucional de documentos - Universidad de Zaragoza: <https://zagan.unizar.es/record/5542/files/TAZ-PFC-2011-002.pdf>

hacen?, ¿. I. (2017 de Julio de 2017). *¿Cómo hacen el helado Magnum? [Archivo de video]*. Obtenido de Youtube :
<https://www.youtube.com/watch?v=uuEkwn5JU50&t=251s>

National Aeronautics and Space Administraton. (2015). *Earth Atmosphere Model*. Obtenido de <https://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/atmosmet.html#>

NOM – 085 – SEMARNAT – 2011. (02 de 02 de 2012). Contaminación atmosférica. Niveles máximos permisibles de emisión de los equipos de combustión de calentamiento indirecto y su medición.

Oelker, Arnulfo. (10 de Diciembre de 2020). *THERMAL ENGINEERING LTDA*. Obtenido de http://www.thermal.cl/docs/articulos_tecnicos/articulo___eficiencia_en_calderas.pdf

Portal Lechero. (2019). *Proceso de pasteurización*.

Powermaster. (10 de Noviembre de 2019). Obtenido de [https://powermaster.com.mx/www/informacion/ciclo.html#:~:text=El%20C.,condensados\)%20de%20la%20misma%20temperatura](https://powermaster.com.mx/www/informacion/ciclo.html#:~:text=El%20C.,condensados)%20de%20la%20misma%20temperatura).

Rodríguez Guzmán, M. O. (1993). *Una revisión de las propiedades térmicas de los alimentos*. Obtenido de Universidad de Sonora: <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/1261/capitulo7.pdf>

SagaFluid. (s.f.). *¿Cómo funciona un sistema de limpieza CIP?*

THERMAL ENGINEERING LTDA. (s.f.). *Artículo técnica. Análisis de la eficiencia en calderas*.