

**DIAGNÓSTICO PARA PROCESOS DE ALTO CONSUMO ENERGÉTICO EN EL ÁREA DE
EMBOTELLADO DE LA CERVECERÍA UNIÓN.**

POR:

LUIS DANIEL AGUILAR BETANCUR

ASESOR INTERNO:

RICARDO MORENO SANCHEZ

ASESOR EXTERNO:

DANIEL RUIZ MANTILLA

14 DE ENERO DE 2019

INFORME DE PRÁCTICA EMPRESARIAL



1803

UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

MEDELLÍN

2019

Tabla de contenido

Resumen..... 4

Introducción 5

Objetivos 6

 Objetivo general 6

 Objetivos específicos..... 6

Marco teórico..... 7

Metodología 9

Resultados y análisis..... 10

 Estado del arte 10

 Diseño experimental..... 12

 Estudio de equipos de consumo 20

 Cálculos..... 23

 Falta de aislamiento en tubería de recirculación de soda..... 23

 Problema de calentamiento en tanque 1 con desperdicio de condensados. 33

 Total de ahorro energético y económico mensual. 36

Conclusiones..... 37

Referencias bibliográficas 38

Tabla de figuras

Figura 1. Botellas sucias y con etiqueta.	13
Figura 2. Botellas marrones lavadas.	13
Figura 3. Botellas águila light lavadas.	14
Figura 4. Medición de temperatura con termómetro SKF CMSS 3000 – SL	14
Figura 5. Grafico del promedio de eficiencia por tipo de botella.	17
Figura 6. Grafico del promedio de eficiencia por temperaturas.	18
Figura 7. Grafico del promedio de eficiencia por aditivo.	18
Figura 8. Tubería (morada) de recirculación de soda sin asilamiento.	27
Figura 9. Tubería de recirculación de soda con asilamiento.	29
Figura 10. Desperdicio de condensados.	33
Figura 11. Montaje en serie de bomba y trampa de vapor.	36

Índice de tablas

Tabla 1. Análisis de varianza para la eficiencia de lavado	16
Tabla 2. Tabla de promedios para eficiencia de lavado con intervalor de confianza del 95%.	16
Tabla 3. Análisis de consumo energético versus eficiencia de lavado a diferentes temperaturas.	19
Tabla 4. Participación de consumo de vapor en los equipos de envase del 1 de enero hasta 30 de noviembre 2017.	21
Tabla 5. Productividad de las líneas de envase 1 de enero hasta 30 de noviembre de 2017.	21
Tabla 6. Participación de consumo de vapor en los equipos de envase del 1 de enero hasta 30 de noviembre 2018.	22
Tabla 7. Productividad de las líneas de envase del 1 de enero hasta 30 de noviembre de 2018.	22
Tabla 8. Temperatura y longitud de tubería de recirculación de soda sin aislamiento.	27
Tabla 9. Propiedades y resultados de las pérdidas por convección con tubería en posición horizontal.	28
Tabla 10. Propiedades y resultados de las pérdidas por convección con tubería en posición horizontal.	28
Tabla 11. Resultados de las pérdidas por radiación.	28
Tabla 12. Total de pérdidas en las tuberías de recirculación por falta de aislamiento.	29
Tabla 13. Tabla para espesores mínimos de referencia según RITE [8]	30
Tabla 14. Espesor de aislamientos para tubería de recirculación de soda.	31
Tabla 15. Temperatura y longitud de tubería de recirculación de soda con aislamiento.	31
Tabla 16. Total de pérdidas en las tuberías de recirculación con aislamiento.	32

1. Resumen

De acuerdo a los altos consumos de vapor en la planta productiva de la Cervecería Unión se hizo un seguimiento a la generación y distribución del vapor en las áreas de la planta, se encontró que el proceso de lavado de botellas representaba buena parte de estos altos consumos por lo que se realizó un estudio con los líderes y operarios de proceso para identificar las principales variables que afectan este lavado y se encontró que hay 4 factores críticos que son la temperatura, el porcentaje de concentración de soda, el porcentaje de aditivo y el tipo de botella. Una vez se tuvo esta información, se llevó a cabo un diseño experimental multifactorial donde se encontró que sostener la temperatura es vital para obtener una mejor eficiencia en el lavado. Con el objetivo principal de sostener estas temperaturas optimizando al máximo el consumo de vapor, se buscó el equipo más crítico con base al consumo de vapor con referencia a la productividad y se halló que la lavadora de la línea 7 era un equipo crítico para el consumo de vapor en la planta. Después que se realizó el análisis del equipo se encontraron 2 oportunidades de mejora representativas donde se tenían pérdidas por transferencia de calor debido a falta de aislamiento y problemas de calentamiento en uno de los tanques de la lavadora, lo que obligaba al operador del equipo a desperdiciar los condensados ya que el intercambiador de calor se estaba inundando con condensados a muy baja temperatura. Todas estas pérdidas energéticas alcanzaban valores de 63366.85 MJ por mes, impactando el indicador de la planta en 0.235 MJ/HL mensuales y al implementar las mejoras, se obtuvo un ahorro de \$1'928.886,91 mensual.

2. Introducción

En la industria cervecera una de las necesidades vitales es obtener calor para diversos procesos que se realizan en una planta de producción. Cervecería Unión en su planta de producción no es la excepción y para obtener este calor lo hace mediante vapor. Este vapor se genera por medio de calderas donde unas requieren gas y otras requieren carbón, este vapor se genera en grandes cantidades y se distribuye a las demás áreas de la planta, que son las áreas de elaboración y embotellado. El área de embotellado recibe la cerveza y su función es envasarla para su distribución, en el envasado de los productos existen diversos procesos, donde se empieza por el lavado de botellas, inspección de botellas, llenado de botellas y termina con la pasteurización del producto.

Actualmente los procesos que consumen vapor en el área son el lavado de botellas y la pasteurización del producto, y se están presentando consumos muy altos de vapor en toda el área y estos altos consumos se pueden presentar por múltiples factores entre los que están las pérdidas de calor, baja eficiencia en el proceso de lavado de botellas, el sistema de atrapamiento del vapor (trampas de vapor) o sistemas térmicos que no están en buen estado.

Con el fin de reducir estos altos consumos se implementaron conceptos de termodinámica y transferencia de calor, para verificar que la energía que se utiliza en los procesos de calentamiento con vapor no esté siendo desperdiciada por falta de aislamientos, equipos en mal estado o baja eficiencia en el sistema de retorno de condensados.

3. Objetivos

Objetivo general

Realizar estudio y seguimiento a los procesos de alto consumo de vapor en el área de embotellado de Cervecería Unión para reducir el indicador de MJ consumido sobre los hectolitros que se envasen.

Objetivos específicos

- Estimar las pérdidas de calor que se presentan en los procesos de calentamiento en el proceso de lavado de botellas.
- Realizar seguimiento al correcto funcionamiento del sistema de atrapamiento del vapor (Trampas de vapor).
- Evaluar el impacto que tienen los paros en las variables de control del proceso de lavado, en especial de la temperatura.
- Identificar las principales variables que afectan el proceso de lavado de botellas para determinar los factores y niveles que más influyen sobre la eficacia del lavado.
- Llevar a cabo un diseño experimental multifactorial para evaluar el efecto de los factores y niveles propuestos sobre la eficacia del lavado de botellas.
- Proponer una nueva configuración de las variables de proceso del sistema de lavado tendiente a disminuir el consumo energético basado en el diseño experimental.

4. Marco Teórico

La cerveza es un producto realizado básicamente en dos etapas, la primera etapa es conocida como la etapa de elaboración donde el producto toma forma y se le agregan materias primas como son agua, cebada malteada, lúpulo y adjuntos como maíz, arroz y jarabe de alta maltosa con los que se le brinda a la cerveza el cuerpo, sabor, sensación de amargo y aroma característico de cada marca de cerveza. Después del proceso de elaboración de la cerveza esta debe ser envasada, donde se utilizan botellas de vidrio retornables que deben pasar por un proceso de lavado, después llenadas con el producto y posteriormente pasteurizadas con el producto. [1]

De igual forma, es importante tener en cuenta que uno de los suministros principales del proceso es la energía térmica obtenida por el proceso de combustión en una caldera de gas y carbón, donde se obtiene vapor saturado que es distribuido a las diferentes áreas de la cervecería. Para establecer donde en donde se está aplicando la energía y en qué lugares se está perdiendo se aplican conceptos de la segunda ley de la termodinámica para establecer las eficiencias en los procesos. [2]

La energía se puede perder en todas las etapas del sistema de vapor, empezando por las pérdidas en la combustión, pérdidas por purgas, pérdidas por transferencia de calor, perdidas en el transporte, eficiencia de equipos donde se da el intercambio de calor y finalmente las perdidas en el sistema de retorno de condensados.

Las pérdidas en la combustión se dan porque el 16% de toda la energía que tiene el combustible se convierte en gases de combustión calientes y solo el restante se utiliza para el calentamiento. En la mayoría de los casos estos gases

de combustión se reutilizan para precalentar el aire de entrada y reducir el consumo de combustible. **[3]**

Las pérdidas por purgas se dan por limpieza que se le hace a las calderas, buscando eliminar sólidos suspendidos que puedan afectar la eficiencia de las calderas por incrustación en la tubería. Estas purgas pueden ser superficiales o de fondo y su frecuencia está ligada a la calidad del agua dentro de la caldera.

Las pérdidas por transferencia de calor pueden darse de 3 formas, en primer lugar, por conducción que es la transferencia que se da entre dos materiales sólidos y uno de los 2 cede energía al otro aumentando su temperatura, otra de las formas de transferencia es por convección, la cual se da entre un material sólido con un líquido o gaseoso, lo que conlleva a que los cálculos se deba tener en cuenta las propiedades de este fluido como el número de Nusselt que es un número adimensional que dice cuánto aumenta la temperatura en el fluido, que es función del número de Grashof y Prandtl, y que varía de acuerdo con la ubicación de la superficie con la que se está dando la transferencia. Y la tercera forma de transferencia es por radiación que se da cuando dos superficies a una determinada temperatura emiten energía en forma de ondas electromagnéticas y su tasa de calor es función de la emisividad del material, de su área y de la temperatura a la que se encuentre la superficie y el ambiente. **[2]**

Las pérdidas en el transporte representan aproximadamente el 10 % de la energía total y se presenta por falta de aislamiento o aislamiento en mal estado, la distancia que debe recorrer el vapor y con esto las pérdidas de presión y fugas que puedan haber dentro de toda la red de distribución.

Cuando el vapor finalmente llega a su destino evitar excesos en el consumo del equipo que lo requiere significa un gran ahorro energético, y uno de los equipos

que más consume vapor en la planta es la lavadora de botellas, en este proceso las botellas deben estar comercialmente limpias, bacteriológicamente seguras y no contener materiales extraños o líquidos. Las botellas se limpian cuando pasan por un viaje a través de varios compartimentos de remojo y zona de chorros donde el agua, la alta temperatura y soda caustica remueven las etiquetas y otros materiales.

El proceso de calentamiento se da porque se recircula la soda caustica de cada uno de los tanques y pasa por intercambiadores de calor que hacen que la soda y el vapor intercambien energía sin ser mezclados debido a que por distintas formas de transferencia permite que un fluido le entrega la energía al otro obteniendo así la soda a la temperatura deseada. [2]

Y finalmente con el retorno de condensados se ayuda en la distribución del vapor para evitar golpes de ariete en la tubería y buena parte de la energía que se lleva a los procesos retorna al área de calderas en forma líquida con altas propiedades energéticas. Sin embargo, las pérdidas de vapor por trampas en mal estado, equipos con mal desalojo de condensado y los venteos en el reservorio de condensados impactan en la eficiencia energética total de la planta.

5. Metodología

Para la disminución del consumo de vapor se realizaron las siguientes actividades:

- **Estado del arte:** Se realizó estado del arte basado en aportes realizados por otros autores para la actualidad del proceso de lavado.
- **Diseño experimental:** Se realizó diseño experimental basado en los factores establecidos.

- **Medición de variables:** Se midieron las temperaturas en zonas críticas donde se presentan los más altos consumos de vapor.
- **Cálculo de pérdidas:** Se calcularon pérdidas de calor por transferencia de calor y las pérdidas por sistemas de condensados de vapor en mal estado.
- **Diagnóstico de equipos:** Se hizo diagnóstico del funcionamiento del intercambiador de calor de la lavadora 7.
- **Diseño para solución del problema:** Se planteó configuración después del intercambiador para solucionar los problemas de calentamiento en el equipo y se propuso aislamiento de tubería en línea de recirculación de soda.
- **Ejecución de proyectos:** Se apoyó en la ejecución de los proyectos realizados debido a las soluciones planteadas.

6. Resultados y análisis

Estado del arte

Una lavadora de alta velocidad es aquella que hace que las botellas circulen de manera secuencial y pasen por tratamiento de pulverización internos y externos. Las botellas deben tener un tiempo de inmersión en una solución que elimina materiales y microorganismos diferentes al vidrio. El tiempo en el que está sumergido es por etapas y cada etapa tiene condiciones ideales de temperatura y tiempo de inmersión. Debe haber una recirculación de la

solución y en cada etapa se deben eliminar los residuos que dejen las botellas con extractores. **[4]**

La creación de una etiqueta que sea resistente al agua y posteriormente sea removida con un enjuague de soda caustica es como actualmente se procesan las botellas de vidrio retornables. Se requiere de la aplicación de un pegante que pueda ser removido sin exceder el desgaste de la botella, por lo que la aplicación de la cantidad exacta de este producto es vital para que el proceso de lavado no tenga afectaciones en este sentido. **[5]**

En los últimos años se han realizado pruebas para mejorar la solución de soda, y se han creados aditivos que ayudan con el proceso de lavado. Con estos se garantiza la inocuidad de las botellas y reducir los reprocesos. Sin embargo, en muchos casos los aditivos hacen que la botella se raye haciendo que se disminuya el ciclo de vida de la botella. **[6]**

Esta solución de soda caustica con aditivo es necesario que se esté a una temperatura elevada. La manera como se calienta la solución es utilizando vapor. El intercambio de calor del vapor con la solución ha evolucionado desde la inyección directa de vapor hasta la implementación de intercambiadores de calor de alta capacidad obteniendo sistemas más eficientes por la recuperación de los condensados que resultan después de que se da el intercambio de calor.

En la búsqueda de reducir hasta el punto óptimo los consumos energéticos en las lavadoras, la automatización ha tomado un lugar importante, haciendo que la regulación del vapor se realice de acuerdo con la temperatura de la solución, y que el equipo se regule de acuerdo a la producción de las líneas de proceso, de manera que se detecte cuando hay buena circulación de botellas en la zona de cargue y de acuerdo a los reprocesos que se estén presentando.

[7]

Diseño experimental

Se realizó un seguimiento con los líderes y operarios de proceso para identificar los principales factores que afectan la eficiencia del lavado de botellas en la compañía.

A partir de este seguimiento se encontró que los factores más importantes son:

- Temperatura
- Porcentaje de soda
- Porcentaje de aditivo
- Tipo de botella

Basado en los factores establecidos se realizó un experimento factorial aleatorizado 2^3 , el cual tenía como variable de respuesta la eficiencia del lavado de botellas que se obtiene de la cantidad de botellas completamente limpias sobre la cantidad de botellas que se lavaron en el experimento. Donde se interpreta como botellas completamente limpias aquellas que se les eliminan por completo las etiquetas y sus residuos.

El experimento se determinó que iba a realizarse bajo una concentración de soda caustica constante al 2.5% asemejándose al proceso de lavado real.

El proceso consiste en realizar un lavado a dos tipos de botella (Marrón y Águila light) cada tanda de lavado de 20 botellas.

Se establecieron 2 valores de temperatura y 2 valores de concentración de soda, y se realizaron lavados de botellas para cada configuración entre temperaturas y porcentaje de aditivo (se usó aditivo SX25).

De esta forma se tienen 4 casos, y cada una de estas se realizó 3 veces para obtener un valor más confiable de cada tipo de botella.



Figura 1. Botellas sucias y con etiqueta.



Figura 2. Botellas marrones lavadas.



Figura 3. Botellas águila light lavadas.

Las mediciones de temperatura se realizaron con termómetro laser SKF CMSS 3000 – SL.



Figura 4. Medición de temperatura con termómetro SKF CMSS 3000 – SL

Especificaciones SKF CMSS 3000 – SL

Rango de medida: -60 °C a +1000 °C

Rango de operación: 0 a 50 °C

Precisión: ± 1 °C

Frecuencia de actualización: 1.4 Hz

Longitud de onda de respuesta: 8 – 14 μm

Rango de emisividad: 0.95 por defecto

Humedad relativa: 5% a 95%

Resolución: 0.1 °C

Las mediciones para el peso del aditivo se realizaron con una gramera convencional, de referencia Kalley K-MGC01.

Especificaciones Kalley K-MGC01

Capacidad máxima: 5000 g

Precisión: ± 1 g

Pantalla: LCD 2.37"

Medidas: L:221 mm F:150 mm H:20 mm

Después de realizado el experimento se hizo un análisis de varianza de los factores para la eficiencia del lavado con el fin de definir el o los más significativos. Además de cómo se comportan con la interacción entre ellos mediante graficas del promedio.

Tabla 1. Análisis de varianza para la eficiencia de lavado

	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Factores					
Tipo de botella	759.375	1	759.375	11.30	0.0037
Temperatura	1276.04	1	1276.04	18.98	0.0004
Aditivo	9.375	1	9.375	0.14	0.7134
Interacciones					
Botella - Temperatura	26.0417	1	26.0417	0.39	0.5419
Botella – Aditivo	1.04167	1	1.04167	0.02	0.9024
Temperatura - Aditivo	84.375	1	84.375	1.26	0.2781
Residuos	1142.71	17	67.2181		
Total corregido	3298.96	23			

Nota: Cuando Valor-P es menor 0,05 implica que la variable tiene alto impacto sobre la variable respuesta.

Tabla 2. Tabla de promedios para eficiencia de lavado con intervalo de confianza del 95%.

	N° de casos	Promedio	Error Est.	Límite inferior	Límite superior
Promedio global	24	83.9583			
Tipo de botella					
Águila light	12	78.3333	2.36675	73.3399	83.3268
Marrón	12	89.5833	2.36675	84.5899	94.5768
Temperatura					
78 °C	12	76.6667	2.36675	71.6732	81.6601
82 °C	12	91.25	2.36675	86.2566	96.2434
Aditivo					
0.25	12	84.5833	2.36675	79.5899	89.5768
0.55	12	83.3333	2.36675	78.3399	88.3268

Tipo de Botella – Temperatura					
Águila light – 78°C	6	70	3.34709	62.9382	77.0618
Águila light – 82°C	6	86.6667	3.34709	79.6049	93.7284
Marrón – 78°C	6	83.3333	3.34709	76.2716	90.3951
Marrón – 82°C	6	95.8333	3.34709	88.7716	102.895
Tipo de Botella – Aditivo					
Águila light – 0.25	6	79.1667	3.34709	72.1049	86.2284
Águila light – 0.55	6	77.5	3.34709	70.4382	84.5618
Marrón – 0.25	6	90	3.34709	82.9382	97.0618
Marrón – 0.55	6	89.1667	3.34709	82.1049	96.2284
Temperatura – Aditivo					
78°C – 0.25	6	79.1667	3.34709	72.1049	86.2284
78°C – 0.55	6	74.1667	3.34709	72.1049	86.2284
82°C – 0.25	6	90	3.34709	82.9382	97.0618
82°C – 0.55	6	92.5	3.34709	85.4382	99.5618

Mediante las siguientes graficas de los promedios se muestra el impacto que tiene cada factor sobre la eficiencia de lavado.

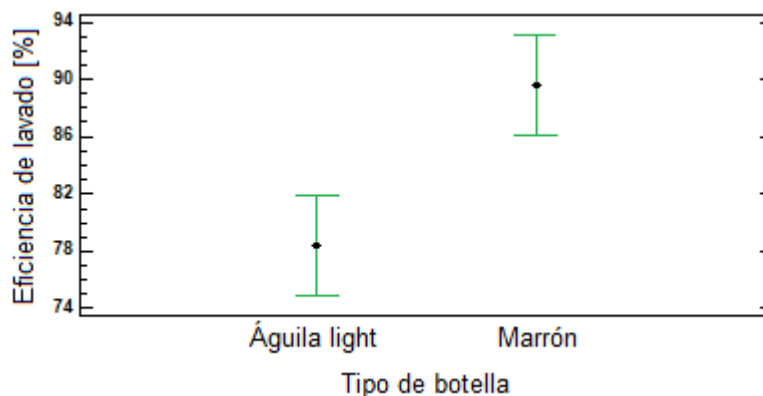


Figura 5. Gráfico del promedio de eficiencia por tipo de botella.

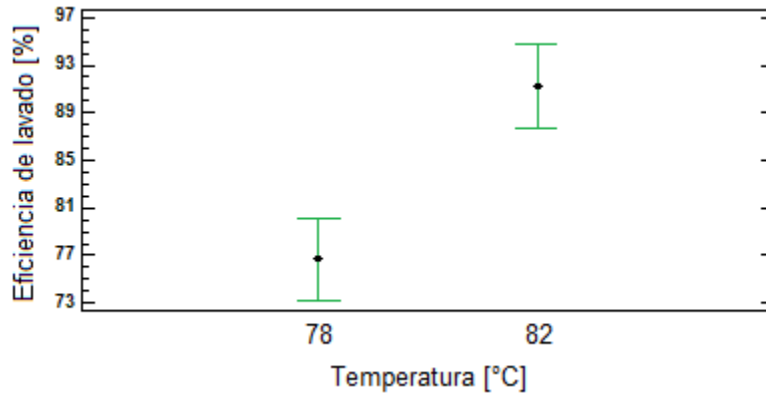


Figura 6. Gráfico del promedio de eficiencia por temperaturas.

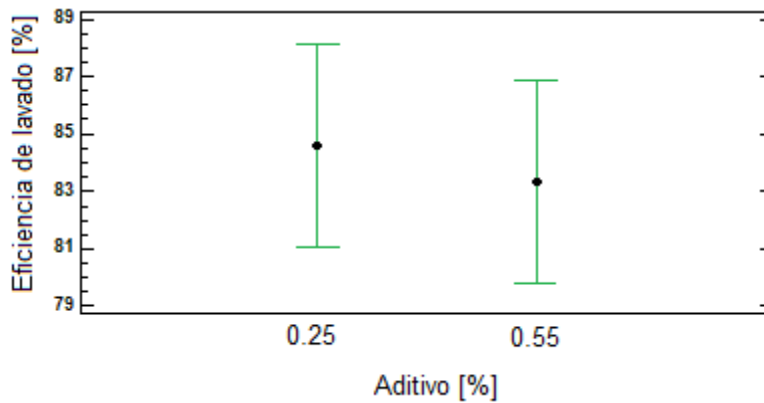


Figura 7. Gráfico del promedio de eficiencia por aditivo.

Con el fin de determinar a qué temperatura se obtiene un menor consumo energético de acuerdo con la efectividad del lavado se hizo el cálculo del gasto energético para cada temperatura.

$$\dot{Q} = \dot{m} * C_p * (T_{sal} - T_{ent})$$

Donde:

\dot{m} : Flujo másico de la solución de lavado.

C_p : Calor específico de la solución (agua)

T_{sal} : Temperatura de salida de la solución del intercambiador

T_{ent} : Temperatura de entrada de la solución del intercambiador

Se harán los cálculos cuando el equipo esté en funcionamiento (Caliente), por lo que la temperatura de entrada es de:

$$T_{ent} = 70 [^{\circ}C]$$

La densidad y el calor específico para el agua a esa temperatura son:

$$\rho = 977.5 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

$$C_p = 4.19 \left[\frac{kJ}{kg \ ^{\circ}C} \right]$$

Para el cálculo de flujo másico se debe conocer el caudal del agua, de acuerdo con el parámetro del equipo se tiene que el caudal es:

$$\dot{V} = 23 \left[\frac{m^3}{h} \right] = 6.39 * 10^{-3} \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

Por lo que

$$\dot{m} = \dot{V} * \rho = 6.39 * 10^{-3} \left[\frac{m^3}{s} \right] * 977.5 \left[\frac{kg}{m^3} \right] = 6.25 \left[\frac{kg}{s} \right]$$

Entonces con una temperatura de 78 °C se tiene un consumo energético de:

$$\dot{Q} = 6.25 \left[\frac{kg}{s} \right] * 4.19 \left[\frac{kJ}{kg \ ^{\circ}C} \right] * (78 - 70) [^{\circ}C] = 209.5 [kW]$$

Y para una temperatura de 82°C es:

$$\dot{Q} = 6.25 \left[\frac{kg}{s} \right] * 4.19 \left[\frac{kJ}{kg \ ^{\circ}C} \right] * (82 - 70) [^{\circ}C] = 314.25 [kW]$$

Tabla 3. Análisis de consumo energético versus eficiencia de lavado a diferentes temperaturas.

Temperatura [°C]	Eficiencia de lavado [%]	Consumo energético [kW]	Total de consumo extra [kW]
78	76.66	209.5	48.9
82	91.25	314.25	132.25

Determinando que es mejor lavar a una temperatura de 78 °C, ya que se consume menos energía por botellas lavada, a pesar de que a mayor temperatura se lavan más botellas por tanda, se debe regir bajo el parámetro de reprocesos aceptables.

De manera que lo más importante es sostener la temperatura optima de lavado, ya que una temperatura muy alta representa gastos energéticos innecesarios y una temperatura muy baja bajaría demasiado la eficiencia de lavado.

Con los resultados del Grafico de la Figura 5 y del Valor-P de la Tabla 1 se concluye que el lavado de la botella marrón es mucho más eficiente y la temperatura se puede sostener a una temperatura menor y mantener buenos valores de eficiencia. La diferencia en las eficiencias se debe al tipo de etiqueta que se usa en cada botella, ya que la etiqueta de Águila light es metalizada y el pegante es diferente.

Finalmente, los resultados del Grafico de la Figura 7 indican que el aditivo es un producto que no da mayor valor a la eliminación de las etiquetas, este producto da propiedades a la lavada para eliminar hongos y bacterias que contiene la botella.

De acuerdo con este análisis es importante garantizar que los equipos de calentamiento estén funcionando sin desperdicios energéticos haciendo que no se pueda sostener la temperatura.

Estudio de equipos de consumo

Con el fin de segmentar el problema se realizó un diagnóstico de los equipos que consumen vapor en el área de envase para determinar cuál es la lavadora más crítica con respecto a la productividad de la línea. Se hizo una comparación del consumo del año 2017 con el del 2018 hasta el mes de noviembre para tener un punto de referencia y determinar cuál lavadora debe ser el foco de acción.

Tabla 4. Participación de consumo de vapor en los equipos de envase del 1 de enero hasta 30 de noviembre 2017.

2017 – Noviembre		
LINEA	EQUIPO	% VAPOR
8	LAVADORA	20.0 %
5	PASTEURIZADORA	17.2 %
8	PASTEURIZADORA	16.4 %
7	LAVADORA	15.7 %
5	LAVADORA	14.1 %
7	PASTEURIZADORA	13.4 %
9	PET	3.3 %

Tabla 5. Productividad de las líneas de envase 1 de enero hasta 30 de noviembre de 2017.

2017 - Noviembre	
LINEA	% ENVASADO
8	35 %
9	25 %
5	20 %
7	20 %

Tabla 6. Participación de consumo de vapor en los equipos de envase del 1 de enero hasta 30 de noviembre 2018.

2018 – Noviembre		
LINEA	EQUIPO	% VAPOR
8	LAVADORA	17.6 %
7	LAVADORA	17.0 %
8	PASTEURIZADORA	14.6 %
5	PASTEURIZADORA	14.3 %
7	PASTEURIZADORA	14.2 %
9	PET	11.4 %
5	LAVADORA	10.9 %

Tabla 7. Productividad de las líneas de envase del 1 de enero hasta 30 de noviembre de 2018.

2018 - Noviembre	
LINEA	% ENVASADO
8	32 %
9	25 %
7	22 %
5	21 %

Observando los consumos y la productividad la lavadora más crítica es la de la línea 7 ya que como se observa en la **Tabla 6** en el 2018 esta es la segunda en consumo de vapor y como lo muestra la **Tabla 7** su productividad no representa mucho más a las otras y comparando con los datos de consumo de la **Tabla 4**, está indicando que es un equipo que tiene problemas en el calentamiento.

De acuerdo con esto se hizo seguimiento al comportamiento de la línea 7 y se encontraron 2 problemas que implican un desperdicio energético y hacían que el equipo consumiera más vapor, el primero fue la falta de aislamiento en

tubería de recirculación de soda y el segundo fue un problema de calentamiento en tanque 1 con desperdicio de condensados.

Cálculos

Falta de aislamiento en tubería de recirculación de soda.

Para el proceso de calentamiento la soda debe ser recirculada desde los tanques de lavado para ser calentada en los intercambiadores de calor, la tubería por donde circula es Acero al carbono, y alcanza temperaturas desde 65 °C hasta 90 °C.

Para realizar un estimado de las pérdidas de calor por falta de aislamiento en estas tuberías de recirculación, se calculan las pérdidas de calor por convección y radiación.

Perdidas de calor por convección

La tasa de transferencia de calor está dada por:

$$Q_c = h * A_s * (T_s - T_{\infty})$$

h: Coeficiente de transferencia de calor por convección.

A: Área superficial de transferencia

T_s: Temperatura de la superficie

T_∞: Temperatura ambiente

Coeficiente de transferencia de calor

El cálculo del coeficiente de transferencia cambia de acuerdo a la ubicación de la tubería.

Posición horizontal

$$h = \frac{k}{D} * Nus$$

k: Conductividad térmica. (Propiedad del aire a determinada temperatura de película)

D: Diámetro de la tubería

Nus: Numero Nusselt

$$Nus = \left[0.6 + \frac{0.387 * Ra_D^{\frac{1}{6}}}{\left(1 + \left(\frac{0.559}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right)^{\frac{8}{27}}} \right]^2$$

Ra_D : Numero de Rayleigh.

Pr: Numero de Prandtl. (Propiedad del aire a determinada temperatura de película)

$$Ra_D = Pr * Gr$$

Gr: Numero de Grashof

$$Gr = \frac{g * \beta * (T_s - T_\infty) * D^3}{\nu^2}$$

β : Coeficiente de expansión volumétrica

ν : Viscosidad cinemática. (Propiedad del aire a determinada temperatura de película)

$$\beta = \frac{1}{T_p}$$

T_p : Temperatura de película

$$T_p = \frac{T_s + T_\infty}{2}$$

Las propiedades del aire se buscan en tablas con la temperatura de película.

Posición vertical

$$h = \frac{k}{L} * Nus$$

k: Conductividad térmica. (Propiedad del aire a determinada temperatura de película)

L: Longitud de la tubería

Nus: Numero Nusselt

$$Nus = \left[0.825 + \frac{0.387 * Ra_D^{\frac{1}{6}}}{\left(1 + \left(\frac{0.492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right)^{\frac{8}{27}}} \right]^2$$

Ra_D : Numero de Rayleigh.

Pr: Numero de Prandtl. (Propiedad del aire a determinada temperatura de película)

Numero de Rayleigh

$$Ra_D = Pr * Gr$$

Gr: Numero de Grashof

$$Gr = \frac{g * \beta * (T_s - T_\infty) * L^3}{\nu^2}$$

β : Coeficiente de expansión volumétrica

ν : Viscosidad cinemática. (Propiedad del aire a determinada temperatura de película)

Área superficial de transferencia

$$A_s = \pi * D * L$$

D: Diámetro de la tubería

L: Longitud de la tubería

Perdidas de calor por radiación

La tasa de transferencia de calor está dada por:

$$Q_r = \varepsilon * \sigma * A_s * (T_s^4 - T_\infty^4)$$

ε : Emisividad del material.

σ : Constante de Stefan-Boltzmann

$$\sigma = 5.67 * 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$$

A_s : Área superficial de transferencia

T_s : Temperatura de la superficie

T_∞ : Temperatura ambiente

Como se observa en la Figura 8 la tubería se encuentra sin ningún aislamiento y se registraron los datos de longitud y temperatura en la Tabla 8.



Figura 8. Tubería (morada) de recirculación de soda sin aislamiento.

Tabla 8. Temperatura y longitud de tubería de recirculación de soda sin aislamiento.

Temperatura [°C]	Diámetro [pulg]	Longitud vertical [m]	Longitud horizontal [m]
90	4"	8	24
80	3"	13	48
75	2 ½"	0	4.5
75	2"	6.5	10
65	1 ½"	1	3

Con estas temperaturas, diámetros y la emisividad del acero al carbono que es de 0.9 se realizan los cálculos, que se encuentran en la **Tabla 9,Tabla 10, Tabla 11** y

Tabla 12.

Tabla 9. Propiedades y resultados de las pérdidas por convección con tubería en posición horizontal.

Convección horizontal						
Temperatura y diametro de la tubería	90°C - 4"	80°C - 3"	75°C - 2 1/2"	75°C - 2"	65°C - 1 1/2"	Unidad
k	0,027898	0,027533	0,027350	0,027350	0,026990	W/m°C
v	0,000019	0,000018	0,000018	0,000018	0,000018	m ² /s
Pr	0,72085	0,72215	0,72280	0,72280	0,72410	N/A
Temperatura de película	57,5	52,5	50,0	50,0	45,0	°C
β	0,003026	0,003072	0,003096	0,003096	0,003145	K ⁻¹
Gr	8225644,36	3506314,87	1829620,50	1031471,16	452884,79	N/A
Ra_D	5929455,73	2532085,28	1322449,69	745547,36	327933,88	N/A
Nus	24,28	18,97	15,77	13,42	10,71	N/A
h	5,93	5,88	5,90	6,08	5,99	W/m ² °C
As	8,62	13,41	1,03	1,90	0,45	m ²
Q	3319,52	4332,39	304,80	576,61	108,93	W

Tabla 10. Propiedades y resultados de las pérdidas por convección con tubería en posición horizontal.

Convección Vertical					
Temperatura y diametro de la tubería	90°C - 4"	80 - 3"	75 - 2"	65 - 1 1/2"	Unidad
k	0,027898	0,027533	0,027350	0,026990	W/m°C
v	0,000019	0,000018	0,000018	0,000018	m ² /s
Pr	0,72085	0,72215	0,72280	0,72410	N/A
Temperatura de película	57,5	52,5	50,0	45,0	°C
β	0,003026	0,003072	0,003096	0,003145	K ⁻¹
Gr	2820338255478,23	10964168137691,10	1290022201125,88	4029264536,00	N/A
Ra_D	2033040831461,48	7917774020633,60	932428046973,79	2917590450,52	N/A
Nus	1397,33	2179,40	1084,63	171,78	N/A
h	4,87	4,62	4,56	4,64	W/m ² °C
As	2,87	3,63	1,23	0,15	m ²
Q	909,86	921,71	281,12	28,12	W

Tabla 11. Resultados de las pérdidas por radiación.

Radiación						
Temperatura y diametro de la tubería	90°C - 4"	80°C - 3"	75°C - 2 1/2"	75°C - 2"	65°C - 1 1/2"	Unidad
Q	5556,98	6643,11	357,21	1081,99	159,86	W

Tabla 12. Total de pérdidas en las tuberías de recirculación por falta de aislamiento.

Temperatura [°C]	Diámetro tubería [pulg]	Longitud Horizontal [m]	Longitud Vertical [m]	Q [W] Convección horizontal	Q [W] Convección vertical	Q [W] Radiación	Q [W] Total
90	4"	24	8	3319,52	909,86	5556,98	9786,35
80	3"	48	13	4332,39	921,71	6643,11	11897,21
75	2 1/2"	4,5	0	304,80	0,00	357,21	662,00
75	2"	10	6,5	576,61	281,12	1081,99	1939,73
65	1 1/2"	3	1	108,93	28,12	159,86	296,91
						TOTAL TUBERÍA	24582,21

Se realizó el aislamiento con lana mineral de roca y con un recubrimiento en acero inoxidable como se observa en la Figura 9.

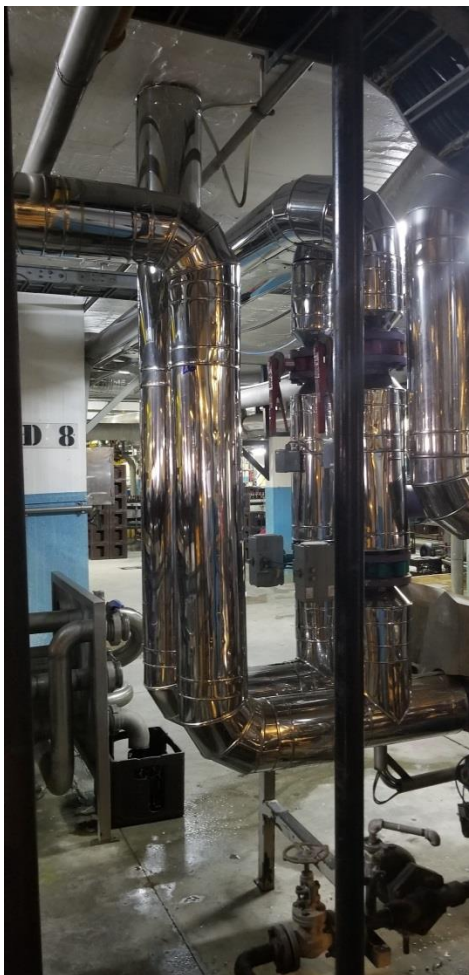


Figura 9. Tubería de recirculación de soda con aislamiento.

El espesor del aislamiento se realizó de acuerdo a las normas de la RITE (Reglamento de Instalaciones Térmicas en Edificios) que establece el espesor de acuerdo a la conductividad térmica del material implementado y al diámetro exterior de la tubería.

[7]

$$d = \frac{D}{2} \left[\text{EXP} \left(\frac{\lambda}{\lambda_{ref}} * \ln \frac{D + (2 * d_{ref})}{D} \right) - 1 \right]$$

Donde:

λ_{ref} : conductividad térmica de referencia, $(0.04 \frac{W}{m K})$

λ : conductividad térmica del material empleado

d_{ref} : espesor mínimo de referencia

D : diámetro exterior de la tubería.

El espesor mínimo de referencia se establece de acuerdo a la tabla 1.2.4.2.1 de la RITE.

[8]

Tabla 13. Tabla para espesores mínimos de referencia según RITE **[8]**

Tabla 1.2.4.2.1: Espesores mínimos de aislamiento (mm) de tuberías y accesorios que transportan fluidos calientes que discurren por el interior de edificios			
Diámetro exterior (mm)	Temperatura máxima del fluido (°C)		
	40...60	> 60...100	> 100...180
$D \leq 35$	25	25	30
$35 < D \leq 60$	30	30	40
$60 < D \leq 90$	30	30	40
$90 < D \leq 140$	30	40	50
$140 < D$	35	40	50

Se tiene que la conductividad térmica de la lana mineral de roca es:

$$\lambda = 0.046 \left[\frac{W}{m K} \right]$$

Donde se obtuvieron los siguientes espesores para cada tramo.

Tabla 14. Espesor de aislamientos para tubería de recirculación de soda.

Diámetro [pulg]	Diámetro [mm]	Conductividad térmica [W/m K]	Espesor mínimo de referencia [mm]	Espesor [mm]	Espesor [pulg]
4"	101.6	0.046	40	48.26	2"
3"	76.2	0.046	30	36.2	1 ½ "
2 ½"	63.5	0.046	30	36.48	1 ½"
2"	50.8	0.046	30	36.87	1 ½"
1 ½"	38.1	0.046	30	37.48	1 ½"

Se tomaron nuevamente los valores de temperatura y se registraron los valores en la **Tabla 15**.

Tabla 15. Temperatura y longitud de tubería de recirculación de soda con aislamiento.

Temperatura [°C]	Diámetro [pulg]	Longitud vertical [m]	Longitud horizontal [m]
36	4"	8	24
33	3"	13	48
32	2 ½"	0	4.5
32	2"	6.5	10
30	1 ½"	1	3

Con estos nuevos valores de temperatura y con la emisividad del acero inoxidable que es de 0.35, se realizan los cálculos y se resumen en la **Tabla 16**.

Tabla 16. Total de pérdidas en las tuberías de recirculación con aislamiento.

Temperatura [°C]	Diametro tubería [pulg]	Longitud Horizontal [m]	Longitud Vertical [m]	Q [W] Convección horizontal	Q [W] Convección vertical	Q [W] Radiación	Q [W] Total
36	4"	8	24	350,63	91,36	280,59	722,57
33	3"	13	48	378,55	75,04	298,04	751,64
32	2 1/2"	0	4,5	25,50	0,00	15,73	41,23
32	2"	6,5	10	48,62	21,77	47,63	118,02
30	1 1/2"	1	3	12,24	2,96	6,53	21,73
						TOTAL TUBERÍA	1655,18

Con los resultados de la

Tabla 12 y la **Tabla 16** se obtiene el ahorro energético con el aislamiento.

$$Q_{ahorrado} = 24582.21[W] - 1655.18[W] = 22987.03 [W]$$

Con un tiempo mensual promedio de trabajo del equipo de 22 días se puede conocer la energía total ahorrada en un mes.

$$E_{termica} = 22987.03 \left[\frac{J}{s} \right] * 10^{-6} \left[\frac{MJ}{J} \right] * 22 [dia] * 86400 \left[\frac{s}{dia} \right]$$

$$E_{termica} = 43693.75 [MJ]$$

Con un envasado mensual promedio de 270292 Hectolitros, el impacto en el indicador mensual de la planta será:

$$Indicador\ termica = \frac{43693.75 MJ}{270292 HL} = 0.162 \left[\frac{MJ}{HL} \right]$$

La generación de energía tiene un costo aproximado de 30.44 \$/MJ por lo que el ahorro mensual será:

$$\text{Ahorro económico} = 43693.75 \text{ [MJ]} * 30.44 \left[\frac{\$}{\text{MJ}} \right] = 1330037.75 \text{ [\$]}$$

Problema de calentamiento en tanque 1 con desperdicio de condensados.

Con los seguimientos realizados al equipo se encontró en distintas ocasiones la válvula de condensados abierta y desperdiciando los condensados de los intercambiadores de calor del equipo.



Figura 10. Desperdicio de condensados.

Cuando se abordó el operador encargado del equipo, explico que estos desperdicios se realizaban cuando las temperaturas en los tanques estaban disminuyendo y que al desalojar los condensados las temperaturas subían y se estabilizaban nuevamente.

Con esta información se hizo un análisis del problema y con los ingenieros del área se estableció que en el que equipo se estaba presentando la condición de Stall la cual se presenta cuando el condensado no puede superar la presión de desalojo y se vuelve una presión negativa, en este caso la presión se vuelve negativa debido a que después de la trampa la tubería esta en posición vertical con una altura de 2 metros. [9]

La frecuencia con la que se desperdician los condensados es aleatoria, se da cuando el equipo no está funcionando correctamente. Con el seguimiento se determinó que estas pérdidas se pueden presentar por 25 horas en el mes.

Las pérdidas energéticas por esta condición se estiman así:

$$\text{Caudal de vapor lavadora} = 1200 \left[\frac{kg}{h} \right]$$

Debido a que es un intercambiador de placas que trabaja a 80 psi, la masa se conserva, por lo que el caudal de condensados es el mismo.

$$\text{Tiempo de desperdicio} = 25 [h]$$

$$m = 1200 \left[\frac{kg}{h} \right] * 25 [h] = 30000 [kg]$$

$$h = 655,77 \left[\frac{kJ}{kg} \right] \rightarrow \text{Entalpia de condensado @ 80[psi]}$$

Los datos de caudal fueron obtenidos de mediciones realizadas con caudalímetros tipo Vortex, una de las referencias usadas fue ABB FSV430. Y los datos de presión con manómetros, con referencia De Wit 231.

Especificaciones ABB FSV430

Rango de medida: 1:20

Temperatura permitida: -55 °C a 280 °C

Precisión de medición de líquidos: ± 0.65%

Precisión de medición de gases y vapores: ± 0.9 %

Especificaciones De Wit 231

Exactitud: ± 1 %

Rango: 0 – 10000 psi

Elemento: Tubo bourdon bronce fosforado

Conexión: Inferior, bronce 1/4" NPT

Mecanismo: Bronce

$$E_{termica} = m * h$$

$$E_{termica} = 30000 [kg] * 655,77 \left[\frac{kJ}{kg} \right] * \frac{1}{1000} \left[\frac{MJ}{kJ} \right] = 19673.1 [MJ]$$

Con un envasado mensual promedio de 270292 Hectolitros, el impacto en el indicador mensual de la planta será:

$$Indicador\ termica = \frac{19673.1\ MJ}{270292\ HL} = 0.073 \left[\frac{MJ}{HL} \right]$$

La generación de energía tiene un costo aproximado de 30.44 \$/MJ por lo que el ahorro mensual será:

$$Ahorro\ económico = 19673.1 [MJ] * 30.44 \left[\frac{\$}{MJ} \right] = 598849.16 [\$]$$

Para eliminar esto desperdicios se decidió implementar una bomba de vapor que había disponible en el área y haciendo un montaje de bomba y trampa de vapor en serie como se observa en la Figura 11, para hacer funcionar el sistema como una trampa-bomba de vapor, que son los equipos idóneos para eliminar

la condición de Stall, evitando la compra de este ya que requiere una gran inversión.



Figura 11. Montaje en serie de bomba y trampa de vapor.

Total de ahorro energético y económico mensual

$$Energia = 43693.75 [MJ] + 19673.1 [MJ] = 63366.85 [MJ]$$

$$Indicador\ termica = 0.162 \left[\frac{MJ}{HL} \right] + 0.073 \left[\frac{MJ}{HL} \right] = 0.235 \left[\frac{MJ}{HL} \right]$$

$$Ahorro\ economico = 1330037.75 [\$] + 598849.16 [\$] = 1928886.91 [\$]$$

7. Conclusiones

- Los altos consumos energéticos representan pérdidas económicas y ambientales para la compañía, obtener estos ahorros representa que se tiene que utilizar menos combustibles en la generación de vapor y las emisiones disminuyen.
- La dinámica de la industria puede presentar épocas donde la producción no sea la deseada y los indicadores de la planta siempre van estar ligados a esta, sin embargo, los ahorros que se implementen siempre van a estar presentes mitigando altos valores en las épocas más complicadas.
- El lavado de botellas representa un alto porcentaje de las perdidas energéticas de la empresa, por lo que es vital que los planes de mantenimiento para estos se cumplan, en especial el sistema de calentamiento, estos equipos en mal estado disminuyen la eficiencia de la transferencia de calor, aumentando los consumos.
- Para evaluar las trampas de vapor los análisis de ultrasonido son el complemento ideal a lo que se realiza habitualmente que es un análisis por diferencia de temperaturas, muchas de las trampas llevan un tiempo considerable sin mantenimiento y mucha energía se desperdicia con estos equipos en mal estado.
- Una adecuada metrología en una industria permite que los focos de atención se centren en donde realmente se está perdiendo la energía, mantener siempre los equipos de medición calibrados permite que todas las mejores implementadas se vean en todos los indicadores.

- El diseño experimental de acuerdo con las variables que se manejaron permitió sacar conclusiones importantes para definir la importancia de cada una. Sabiendo que un adecuado lavado implica muchos otros factores, el diseño sirve como guía para enfocar las ideas en lo que más influencia tenga sobre este.
- En las mejoras implementadas se aplican muchos conceptos ingenieriles que sirvieron para estimar los desperdicios que se estaban teniendo por falta de materiales y malas prácticas que se estaban realizando, logrando disminuir lo más posible los desperdicios y ayudando a que la eficiencia del lavado se mantenga.
- La eliminación de los desperdicios representara un ahorro económico importante para la compañía, en la implementación del aislamiento fue necesaria una inversión que se estima puede ser recuperada en 10 meses, y en el sistema de desalojo de condensados no fue necesario una inversión, haciendo que cada mes la compañía deje de invertir casi dos millones de pesos en generación de vapor.

8. Referencias Bibliográficas

[1] Conoce el proceso cervecero que lleva a cabo Bavaria | Bavaria. 2019).
Obtenido de <https://www.bavaria.co/cerveza/proceso-cervecero-bavaria>

[2] Cengel, Y. (2007). Transferencia de calor y masa (4th ed.). México: McGraw-Hill.

[3] Valle Cruz, Anliet. Acosta Cordero, Lidersi y Pérez González Alain. (2014) Evaluación energética de los generadores de vapor F1-2 y BH-109 de una refinería cubana de petróleo. Revista especializada en ingeniería, 8, 89-96.

[4] Fernandez, A. (1995). HIGH SPEED BOTTLE WASHING MACHINE. Estados Unidos.

[5] Fuushern Wuu. (2001). WATER RESISTANT, CAUSTICALLY REMOVABLE COATING, PAPER LABEL AND RECYCLABLE LABELED GLASS BOTTLE. Estados Unidos.

[6] Estudio para la optimización del proceso de lavado de botellas mediante evaluación de aditivos de soda cáustica | Universidad Simón Bolívar (2008). Obtenido de <http://159.90.80.55/tesis/000146894.pdf>

[7] Automatización de la máquina lavadora de botellas Barry-Wehmler de la línea 1 del salón de embotellado de Bavaria-SABMiller, Cervecería Bucaramanga | Universidad Pontificia Bolivariana (2009). Obtenido de <https://repository.upb.edu.co/handle/20.500.11912/482>

[8] Reglamento de instalaciones térmicas en los edificios. Madrid. (2013) | Ministerio de industria, energía y turismo. Obtenido de <https://www.caloryfrio.com/phocadownload/informes/RITE-version-2013.pdf>

[9] ¿Qué es el Stall? | TLV - Compañía Especialista en Vapor (América Latina). (2019). Obtenido de <https://www.tlv.com/global/LA/steam-theory/stall-phenomenon-pt1.html>