

ARTICLE INFO

Article history:

Received

Revised

Accepted

Keywords:

Eficiencia energética

Transferencia de calor

Bioprocesos

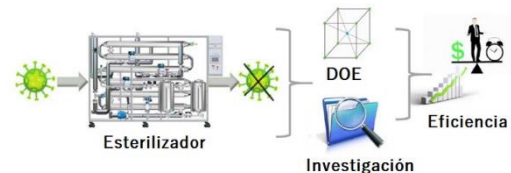
Esterilización

Universidad Icesi

Ingeniería

ABSTRACT

Icesi university counts with a three-stage double tube sterilization equipment designed to guarantee innocuous condition required on biochemical engineering bioprocesses. Since its operations started, the equipment has not been exposed to an efficiency and energetic analysis, which suggests the possibility to improve the equipment this way. As a solution for this problematic, alternatives are going to be suggested based on the characterization of the equipment and statistical analysis of the critical variables identified in the sterilization process to improve its energetic efficiency. Therefore, the current project is focused on propose and validate at least one energetic efficiency alternative for the Icesi university pilot plant employing a methodology consisting on the energetic efficiency model research, the choice for a work fluid and a design of experiment (DOE) to evaluate the technical-economic viability of the alternatives proposed.



## 1. Introducción

Los procesos fermentativos en su mayoría requieren de una amplia gama de insumos estériles (medio líquido, aire, solución de ácido y base, antiespumante), para llevarse a cabo. Adicionalmente, cuando los procesos involucran cultivos axénicos (cultivos de un solo microorganismo), es de vital importancia eliminar cualquier tipo de microorganismo contaminante que pueda haber en las materias primas a través de una operación de esterilización con el fin de preservar la integridad de un bioproceso determinado.

La esterilización es una operación ampliamente usada a nivel industrial, la cual consiste en la eliminación de la carga microbiana de un fluido en específico por acción de un factor de estrés. Existen gran variedad de métodos de esterilización. Actualmente se emplean técnicas de esterilización mediante la exposición a radiación (ultravioleta, gamma o rayos X), sonicación, tratamiento químico, filtración y calentamiento, sin embargo, solo los dos últimos se utilizan en operaciones a gran escala (Stanbury, 2016).

La eficiencia energética es uno de los factores más importantes en el proceso de esterilización por calentamiento y esta se conoce como la razón entre la transferencia de calor real hacia un fluido de trabajo y la

transferencia térmica máxima posible (proceso isentrópico) (López, 2011). Además, al reconocer que un proceso de esterilización es energéticamente eficiente, significa que está caracterizado por aprovechar la máxima cantidad de energía disponible para transferirla al fluido de trabajo, reduciendo el consumo de los servicios (por ejemplo, vapor), mejorando el desempeño económico de la operación (Monterroso, 2012).

Por otro lado, la transferencia de calor puede verse afectada por propiedades fisicoquímicas como la temperatura, la densidad, la viscosidad y la acides involucradas directamente en el proceso (fluido de trabajo o térmico), o desde la configuración espacial del equipo (diseño del esterilizador) (DIDACONTROL, 2018), evidenciándose su efecto en la eficiencia energética que a su vez definirá el desempeño de la operación de esterilización (Dion, 2013).

Los análisis de eficiencia e integración energética son ampliamente aplicados a la esterilización, ya que es una de las operaciones más costosas de la línea productiva en los procesos comerciales como la obtención de cerveza o vinagre por vía fermentativa (Seader, 2011) (Doran, 2013). Dichos análisis consisten en determinar y mejorar el desempeño energético y económico de una operación o proceso, ya sea por el cambio en las materias primas, la

modificación de parámetros operacionales o el diseño del equipo.

La Universidad Icesi desde el año 2018 cuenta con una planta piloto donde se realizan gran variedad de procesos bioquímicos de interés con materias primas propias de la región que deben tratarse adecuadamente antes de implementarse en la línea de producción de los procesos fermentativos. Por esta razón, la planta piloto de Icesi cuenta con un esterilizador de doble tubo de tres etapas, además de un sistema de autoclave (Batch) ubicado en los laboratorios del mismo edificio de la planta piloto (edificio N), con el fin de cumplir con la inocuidad de los insumos de trabajo.

Partiendo de los gastos asociados a la operación de esterilización en la planta piloto, se identifican dos grandes grupos que se definen como: costos operativos y costos de administración. Los costos operativos son aquellos implicados directamente en el proceso de esterilización, entre los que están el suministro de corriente eléctrica, el agua de servicio, el combustible necesario para la generación de vapor, entre otros. De igual manera, los costos de administración se definen como aquellos relacionados a la documentación legal, social y los empleados que se encargan del cuidado, limpieza y mantenimiento de la planta.

Finalmente, el esterilizador de la planta piloto de la Universidad Icesi aún no cuenta con un análisis de eficiencia e integración energética, debido a que el equipo se implementó recientemente en el año 2018. Por lo anterior, surge la necesidad de realizar dicho análisis, evaluando cuáles son las variables críticas que se pueden modificar para mejorar la eficiencia energética del esterilizador de forma que se minimicen los costos de operación y qué propuestas de mejora se pueden plantear al respecto.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1. Revisión conceptual de eficiencia energética.

En primera instancia se realizó una búsqueda bibliográfica de planteamientos de modelos de eficiencia energética aplicables a la operación de esterilización. Para definir inicialmente los modelos a comparar se usó como criterio de selección:

- El modelo debe corresponder a un equipo implicado en la transferencia de calor (Por ejemplo, una caldera o un intercambiador de calor en general).

Con base en el criterio anterior se revisaron diferentes planteamientos de modelos de eficiencia para consolidar uno propio con base en el diseño del equipo estudiado.

#### 2.1.1. Identificación de variables críticas y reconocimiento del equipo.

Para identificar las variables críticas que podían influir en la eficiencia energética del equipo, y, por ende, afectar modelo, se realizó una serie de corridas de prueba en la planta piloto de esterilización de la Universidad Icesi, asegurándonos de concretar:

1. Qué variables se podían modificar: Temperatura de esterilización, temperatura de enfriamiento, flujo de alimento del fluido de trabajo y fluido de trabajo.
2. El intervalo de toma de mediciones que el equipo proporcionaba: 30 segundos.
3. Qué servicios requería el equipo: Vapor a 50 psi, agua de chiller a 12 °C, aire de instrumentos a 90 psi, desagüe, alimentación eléctrica 220 V a 60 Hz de 3 fases (neutro y tierra).

#### 2.1.2. Definición del fluido de trabajo.

Para la definición del fluido de trabajo se establecieron los criterios de:

1. Fácil adquisición.
2. Bajo costo.
3. Fácil de transportar.
4. Fácil disposición.
5. Compatible con el equipo.
6. Alta importancia en el sector industrial del valle del cauca.

Con base en estos criterios se definió el agua como fluido de trabajo. Además, por medio de una comparación de propiedades, se encontró que los resultados son extrapolables a otros fluidos, como el jugo de caña (Figura 1 -Figura 5).

#### 2.1.3. Comparación de propiedades (agua – jugo de caña).

Para esta comparación se seleccionaron las variables implicadas en el cálculo de la eficiencia energética (Ecuación 6) y otras propiedades de transporte asociadas a la transferencia de energía. De igual manera, se emplearon las siguientes expresiones empíricas para comparar dichas variables entre el agua y el jugo de caña (Peacock, 1995):

Entalpía:

$$h = 2,326 \left( \left( \frac{B}{10} \right) * \frac{(100 + B)}{(900 - 8B)} + 1,8T \left( 1 - \left( \frac{B}{100} \right) * (0,6 - 0,0009T) \right) \right)$$

**Ecuación 1.** Entalpía.

Donde h es la entalpía en kJ/kg, B el porcentaje de sólidos presentes en el fluido de trabajo y T la temperatura a la que se encuentra el fluido en °C.

Error promedio: 0,18%

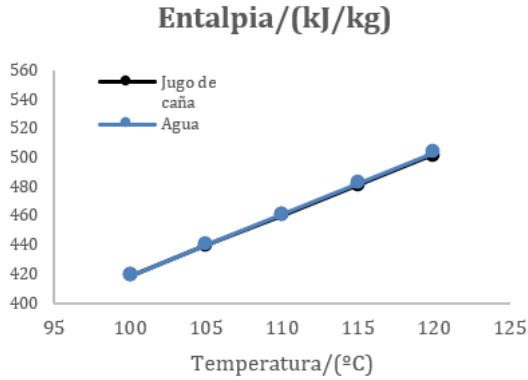


Figura 1. Desviación de la entalpía del jugo de caña respecto al agua.

**Calor específico:**

$$C_p = 4,1253 - \frac{248}{10^5} B + 6,7 * 10^{-5} BT + 1,8691 * 10^{-3} T - 9,271 * 10^{-6} T^2$$

**Ecuación 2.** Calor específico.

Donde  $C_p$  es el calor específico del fluido de trabajo en  $\text{kJ/kg}^{\circ}\text{K}$ , B el porcentaje de sólidos presentes en el fluido, T la temperatura a la que se encuentra el fluido en  $^{\circ}\text{C}$ .

Error promedio: 3,63%

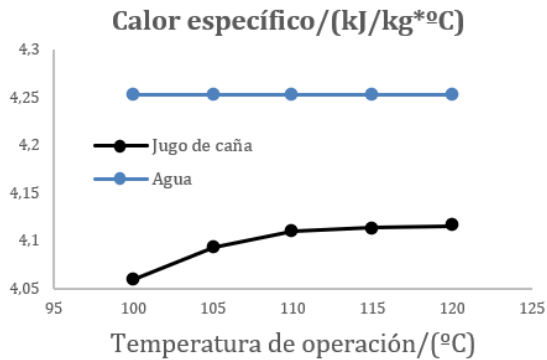


Figura 2. Desviación del calor específico del jugo de caña respecto al agua.

**Densidad:**

$$\rho = 1000 * \left( 1 + B * \left( \frac{B + 200}{54000} \right) \right) * \left( 1 - 0,036 * \left( \frac{T - 20}{160 - T} \right) \right)$$

**Ecuación 3.** Densidad.

Donde  $\rho$  es la densidad del fluido de trabajo en  $\text{kg/m}^3$ , B el porcentaje de sólidos presentes en el fluido de trabajo y la T la temperatura a la que se encuentra el fluido de trabajo en  $^{\circ}\text{C}$ .

Error promedio: 1,57%

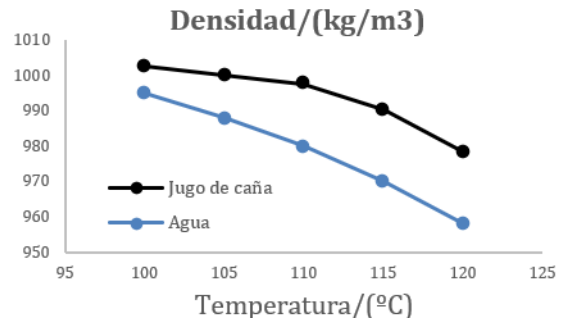


Figura 3. Desviación de la densidad del jugo de caña respecto al agua.

**Viscosidad:**

$$\text{Log}_{10}(\mu) = 22,46N - 0,114 + (30 - T) * \frac{1,1 + 43,1 * N^{1,25}}{(91 + T)}$$

**Ecuación 4.** Viscosidad.

Donde  $\mu$  es la viscosidad en cP, B como el porcentaje de sólidos presentes en el fluido de trabajo, T la temperatura a la que se encuentra el fluido en  $^{\circ}\text{C}$  y  $N = \frac{B}{1900 - 18B}$

Error promedio: 4,46%

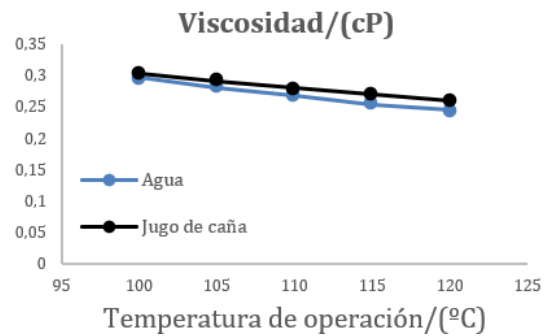


Figura 4. Desviación de la viscosidad del jugo de caña respecto al agua.

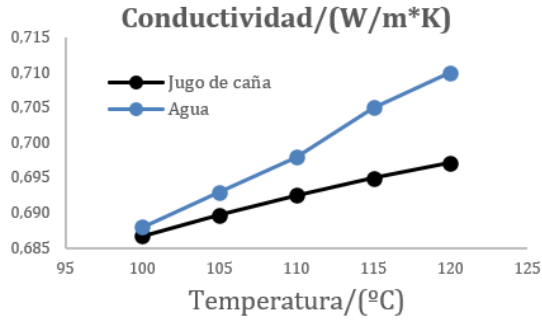
**Conductividad:**

$$k = 1,162222 * 10^{-3} * (486 + 1,55T - 0,005T^2) * (1 - 0,0054B)$$

**Ecuación 5.** Conductividad.

Donde B hace referencia al porcentaje de sólidos presentes en el fluido de trabajo que se evaluará, T a temperatura en  $^{\circ}\text{C}$  y k la conductividad térmica en  $\text{W/m}^{\circ}\text{K}$ .

Error promedio: 0,9183%



**Figura 5.** Desviación de la conductividad térmica del jugo de caña respecto al agua

### 2.1.4. Consolidación del modelo de eficiencia energética.

Teniendo en cuenta el diseño y funcionamiento del equipo de esterilización de la planta piloto de la Universidad Icesi (anexo 1) y la investigación realizada en apartados anteriores, se planteó el siguiente modelo:

$$\eta = \frac{F_t * C_{p_t} * \Delta T_t}{F_s * \lambda_s}$$

#### Ecuación 6. Modelo de eficiencia energética.

*Nota: El modelo está diseñado para trabajar con todos los  $\Delta T$  como valores positivos.*

Donde  $F_s$  es el flujo total de vapor (kg/h),  $\lambda_s$  representa el calor latente específico del vapor (kJ/kg),  $F_t$  es el flujo de entrada del fluido de trabajo (kg/h),  $C_{p_t}$  es la capacidad calorífica del fluido de trabajo (kJ/°C) y  $\Delta T_t$  es la diferencia de temperatura del fluido de trabajo en los primeros dos intercambiadores (°C)

El denominador del modelo ( $F_s * \lambda_s$ ), representa la energía máxima disponible para la transferencia de calor, la cual se compara con la energía recibida por el fluido de trabajo en los primeros dos intercambiadores ( $F_t * C_{p_t} * \Delta T_t$ ), sin tener en cuenta la energía que se retira/pierde en el tercer intercambiador.

## 2.2. Cálculo de la eficiencia energética base del esterilizador.

### 2.2.1. Medición de variables críticas.

Se realizó una corrida experimental bajo las condiciones de operación especificadas en el manual del equipo:

- Flujo 1000 L/h.
- Temperatura de esterilización 105 °C.
- Temperatura de alimentación 50 °C.
- Fluido de proceso: Agua.
- Fluido térmico: Vapor saturado a 50 psig.

El histórico de datos del equipo presentó la medición de las variables mencionadas, la frecuencia de toma de datos fue de 30 segundos.

### 2.2.2. Detalle del cálculo.

Para el cálculo de la eficiencia base del equipo se implementó el modelo planteado en el primer objetivo junto con los datos obtenidos en la medición de variables críticas.

## 2.3. Diseño de experimentos.

### 2.3.1. Planteamiento del DOE.

A partir de la información recopilada en las corridas de prueba, donde se establecieron las variables críticas modificables en el proceso y la respectiva región de operabilidad, se planteó un diseño de experimentos (DOE por sus siglas en inglés), factorial, de dos factores y tres niveles (Tabla 1).

**Tabla 1.** Diseño 2x3 implementado.

Variable	Niveles		
Temperatura (°C)	105	112	
Flujo (L/min)	10	16	20

### 2.3.2. Análisis estadístico.

El análisis del modelo se realizó por medio del ANOVA ( $\alpha < 0,05$ ), usando el software Minitab 2019. En dicho análisis se buscó verificar inicialmente:

- Variables críticas significativas (relativas a la eficiencia energética).
- Validez del diseño (cumplimiento de los supuestos principales del DOE: Varianza constante, normalidad de los datos e independencia de estos).

### 2.3.3. Desarrollo de la o las alternativas.

Con base en los resultados obtenidos del análisis estadístico del diseño de experimentos planteado se formuló una alternativa relacionada a cambios en las condiciones de operación del equipo.

### 2.3.4. Validación técnico-económica de propuestas.

La validación de alternativas se basó en las características de cada una, teniendo en cuenta si se requería inversión inicial o no.

Los indicadores que se tuvieron en cuenta fueron:

- El retorno sobre la inversión (ROI por sus siglas en inglés) (%), que representa el % de la inversión inicial que se recupera cada año. En caso de que la propuesta de mejora planteada implique la adquisición de un equipo externo que no se posea en la planta piloto (Baca, 2003).

$$ROI = \frac{\text{Retorno de inversión anual neto}}{\text{Inversión inicial}} \times 100\%$$

#### Ecuación 7. ROI.

- El tiempo de retorno (PT por sus siglas en inglés) (años), que representa el tiempo que se tarda en recuperar una inversión (en caso de que haya una inversión inicial) (Buenaventura, 2000).

$$PT = \frac{\text{Inversión inicial}}{\text{Flujo de caja anual}}$$

**Ecuación 8.** PT.

- El índice de consumo de vapor ( $\Psi$ ), donde el  $\Delta H_i$  es el cambio en la entalpía del fluido de trabajo durante el proceso de esterilización,  $F_s$  el flujo total de vapor consumido durante el proceso y  $F_t$  es el flujo del fluido de trabajo implementado. El indicador presenta los kg de vapor consumido por cada kJ transferido al fluido de trabajo.

$$\Psi = \frac{F_s}{\Delta H_t * F_t}$$

**Ecuación 9.** Índice de consumo de vapor.

- El costo estimado del vapor (PV) en COP, donde  $F_s$  es el flujo de vapor (kg/min),  $h_{AA}$  es la entalpía del agua a 25 °C (kJ/kg),  $h_v$  es la entalpía del vapor a 50 psig (kJ/kg), PCS representa el poder calorífico superior del combustible (kW/kg) (Castells, 2011),  $\eta_c$  se refiere a la eficiencia de la caldera, PC es el precio del combustible (COP/ kg combustible), A es el costo de consumo de agua (COP/ kg agua),  $m_a$  es la masa de agua consumida (kg), EE es el consumo de energía eléctrica implicada en el encendido y funcionamiento del equipo (COP/kWh) y  $W_{EE}$  es la potencia consumida durante la generación del vapor (kWh) (THERMAL ENGINEERING, 2012) (U.S. Department of Energy, 2003).

$$PV = F_s * \frac{(h_v - h_{AA})}{PCI * \eta_c * 60} * PC + A * m_a + EE * W_{EE}^1$$

<sup>1</sup>120 W para el encendido y 110 W del consumo de bombas y ventiladores, para un total de 230 W.

**Ecuación 10.** Costo estimado del vapor.

**Tabla 2.** Precio de los insumos y poder calorífico del combustible (gas natural).

PC (COP/ kg combustible)	A (COP/ kg agua)	EE (COP/kWh)	PCS (kW/kg)
504,83 <sup>1</sup>	3,54 <sup>2</sup>	422,10 <sup>3</sup>	14,69 <sup>4</sup>

<sup>1</sup>(GDO, 2019), <sup>2</sup>(EMCALI, 2021), <sup>3</sup>(EMCALI, 2021), <sup>4</sup>(GDO, 2015)

### 3. Resultados y discusión.

En este apartado, los elementos “ajustados”, son aquellos que excluyen todos los términos (variables o interacciones), no significativos (con un valor p superior a la significancia de 0,05). Por ejemplo, ANOVA ajustado (Tabla 7), excluye el factor temperatura y la interacción Temperatura\*Fluido de trabajo, mientras que el ANOVA sin ajustar si los incluye.

**Tabla 3.** Matriz Experimental.

Corrida	Flujo	Temperatura	$\eta_{prom}$	$\Psi * 10^3$
1	10	105	54,30%	0,72
2	10	112	55,50%	0,69
3	10	105	31,00%	1,26
4	10	112	43,70%	0,94
5	16	105	79,60%	0,52
6	16	112	81,00%	0,42
7	16	105	87,80%	0,46
8	16	112	86,00%	0,40
9	20	105	96,90%	0,34
10	20	112	88,90%	0,36
11	20	105	96,40%	0,35
12	20	112	92,60%	0,36

$$\eta_{prom} = -3,08 + 0,0284 \text{ Temperatura} + 0,247 \text{ Flujo fluido de trabajo} - 0,00183 \text{ Temperatura} * \text{Flujo fluido de trabajo}$$

**Ecuación 11.** Modelo sin ajustar.

**Tabla 4.** Parámetros de calidad del modelo sin ajustar.

R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> ajustado
89,02%	84,90%

**Tabla 5.** ANOVA sin ajustar

Fuente	Valor p
Modelo	0,00034
Lineal	0,00015
Temperatura	0,89144
Flujo fluido de trabajo	0,00004
Interacciones de 2 términos	0,32594
Temperatura*Flujo fluido de trabajo	0,32594
Falta de ajuste	0,27760

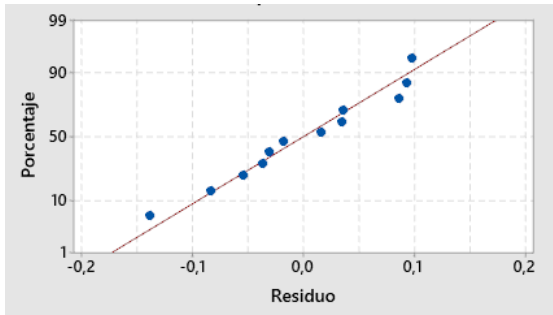


Figura 6. Gráfica de probabilidad normal (ANOVA sin ajustar).

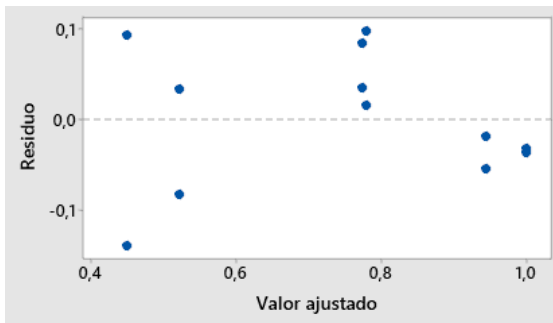


Figura 7. Gráfica de varianza (ANOVA sin ajustar).

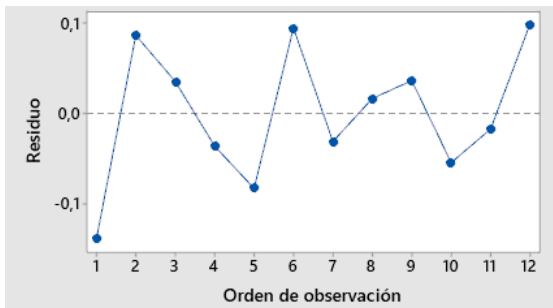


Figura 8. Gráfica de independencia (ANOVA sin ajustar).

La tabla 5 muestra el ANOVA sin ajustar, que presenta términos no significativos (Temperatura y la interacción Temperatura\*Fluido de trabajo), por lo que es posible ajustar el modelo quitando estos términos (Tabla 6). Además, en la figura 6, 7 y 8 se muestra que se cumplen los tres supuestos de DOE, que son:

- Normalidad de los datos (Figura 6).
- Varianza constante (Figura 7).
- Independencia de los datos (Figura 8).

Por lo que, las predicciones que se realicen con el modelo estadístico (dentro de la región de operabilidad), son válidas, lo que se reafirma también con el valor p de la falta de ajuste (superior a 0,05).

$$\eta_{prom} = -0,0028 + 0,04875 \text{ Flujo fluido de trabajo}$$

Ecuación 12. Modelo ajustado.

Tabla 6. Parámetros de calidad del modelo ajustado.

R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> ajustado
87,51%	86,27%

Tabla 7. ANOVA Ajustado.

Fuente	Valor p
Modelo	0,0000079
Lineal	0,0000079
Flujo fluido de trabajo	0,0000079
Falta de ajuste	0,4301366

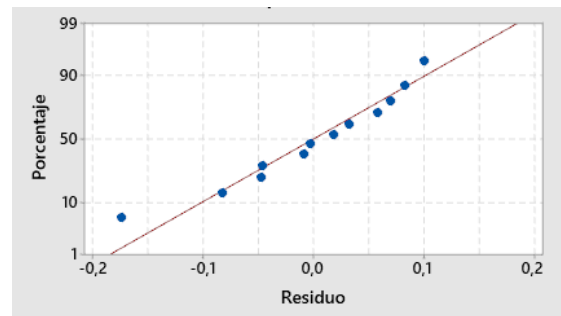


Figura 9. Gráfica de probabilidad normal (ANOVA ajustado).

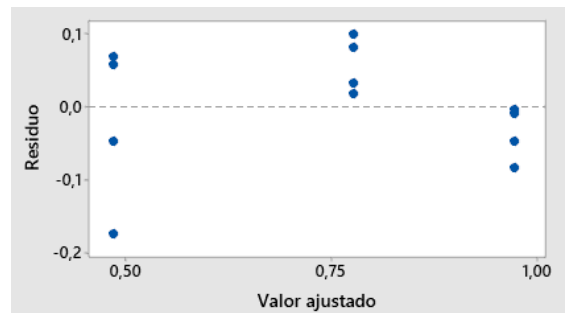


Figura 10. Gráfica de varianza (ANOVA ajustado).

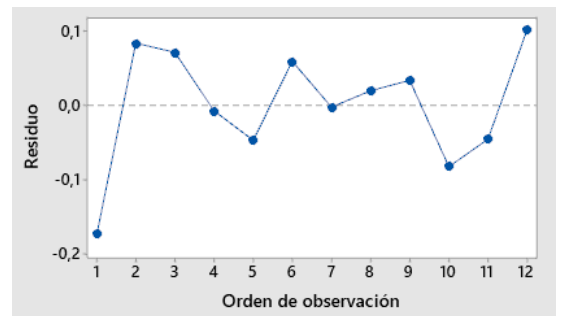


Figura 11. Gráfica de independencia (ANOVA ajustado).

La tabla 7, correspondiente al Anova ajustado, que muestra que la falta de ajuste aumenta aún más su valor p, lo que es un primer indicativo de que el modelo ajustado efectivamente presenta una mejora, Además, a pesar de

que el  $R^2$  disminuye debido a la pérdida de información al quitar los términos no significativos (Tabla 5 y 7), se evidencia un aumento del  $R^2$  Ajustado, que es el que da cuenta del ajuste del modelo a los datos estudiados (Tabla 4 y 6).

De igual manera, para el ANOVA ajustado, se cumplen los tres principios fundamentales del DOE:

- Normalidad de los datos (Figura 9).
- Varianza constante (Figura 10).
- Independencia de los datos (Figura 11).

Por lo que, el ajuste realizado no resta validez al nuevo modelo.

Con base en los resultados del ANOVA ajustado, se evidencia que la temperatura no es un factor significativo, y teniendo en cuenta que para todos los niveles de temperatura estudiados se alcanza la esterilidad, se propone usar la temperatura más baja trabajada (105 °C), ya que esta implica un menor consumo de vapor (Tabla 8). En el mismo orden de ideas, el flujo óptimo para la operación sería el nivel más alto trabajada (20 L/min), debido a que este flujo permite maximizar la eficiencia energética (Tabla 3) (Ecuación 12). Además, este conjunto de condiciones presenta el menor valor de  $\Psi$ , lo que indica un bajo consumo de vapor por cada kJ suministrado al fluido de trabajo (Tabla 3).

**Tabla 8.** Costo del vapor a diferentes temperaturas de esterilización para 20 L/min.

Temperatura (°C)	Fs (kg/min)	PV (COP)
105	1,26	\$ 2.709,34
112	1,51	\$ 3.418,00

Por lo anterior, la propuesta de mejora de eficiencia energética para el esterilizador de la planta piloto de la Universidad Icesi radica en operar el equipo bajo una condición de flujo de fluido de trabajo de 20 L/min con una temperatura de esterilización de 105 °C.

Otra alternativa para mejorar la eficiencia energética de la operación es aprovechar el calor sensible del fluido estéril para calentar el fluido de trabajo con el objetivo de disminuir el consumo de vapor de caldera implementando un intercambiador de placas al proceso (Anexo 2).

Primero se calcula la potencia necesaria para incrementar la temperatura del fluido de trabajo empleando la siguiente ecuación:

$$Q = F_t * C_{p_t} * \Delta T_t$$

**Ecuación 13.** Expresión para el cálculo de potencia.

Donde Q es la potencia necesaria para cubrir el calor sensible (kW),  $F_t$  es el flujo másico del fluido de trabajo (kg/min),  $C_{p_t}$  es el calor específico del fluido de trabajo (kJ/kg °C) y  $\Delta T_t$  es la diferencia entre la temperatura final e inicial (°C).

Posteriormente se encuentra la potencia que el fluido estéril puede suministrar teniendo en cuenta que se quiere entregar a una temperatura de seguridad definida en 60°C, así pues, se llega a que el fluido estéril puede entregar hasta un 56,3%, de la energía necesaria para que el fluido de trabajo llegue de 25 °C a la temperatura de esterilización (105 °C) (Tabla 9).

**Tabla 9.** Demanda energética suplida.

Flujo (L/min)	Potencia requerida (kW)	Potencia disponible (kW)	Demanda energética suplida (%)
20	108,8	61,2	56,3

Una vez calculada la potencia, se procedió a determinar el área necesaria en el intercambiador tomando un coeficiente global de transferencia típico para intercambiadores de calor de placas (Díaz et al, 2017) y la potencia que se busca entregar por parte del fluido estéril (Ecuación 14).

$$Q = U * A * MLDT$$

**Ecuación 14.** Ecuación de diseño para intercambiadores de calor.

Donde Q es la potencia que se busca entregar por parte del fluido estéril (kW), U es el coeficiente global de transferencia de calor (kW/m<sup>2</sup> K), A es el área efectiva de transferencia (m<sup>2</sup>) y el MLDT es la diferencia de temperatura media logarítmica (K).

De esta manera, se encontró que el área requerida es de 0,98 m<sup>2</sup> con un U de 0,1956 kW/m<sup>2</sup> K (Díaz et al, 2017). Por lo anterior, se propone la adquisición de un intercambiador para el aprovechamiento del calor sensible del fluido estéril (Tabla 10).

**Tabla 10.** Características estimadas del equipo propuesto (CYPE Ingenieros, 2021).

Intercambiador de placas	
área (m <sup>2</sup> )	2,07
# de placas	24
Precio	\$ 1.606.000

Debido a que el calor que se busca entregar con el fluido estéril al fluido de trabajo (Ecuación 13), debe ser el mismo que entrega con vapor (Ecuación 15), se puede establecer que, el cubrir el 56,3% de la energía requerida para llevar el fluido de trabajo hasta la temperatura de esterilización, implica una reducción igual en el consumo de vapor.

$$Q = \lambda_s * F_s$$

**Ecuación 15.** Calor suplido por el vapor.

Donde Q es la potencia suplida por el vapor (kW),  $\lambda_s$  es el calor latente específico del vapor (kJ/kg) y  $F_s$  es el flujo de vapor (kg/min).

Sin embargo, fue necesario corroborar que la inversión en el nuevo equipo se recupere en un tiempo prudente (de 3 a 5 años), por lo que se calculó el PT y el ROI (Tabla 11).

Para el cálculo de los flujos de caja (en este caso por ahorro), se consideró un tiempo de operación promedio de 192 horas al año (6 horas por semana en cada semestre académico, lo que equivale a un PV de \$ 71.778,9 COP. El 56,3% del PV equivale al flujo de caja.

**Tabla 11.** Validación de inversión.

<b>Indicadores</b>	
<b>PT (años)</b>	<b>ROI (%)</b>
39,74	2,52

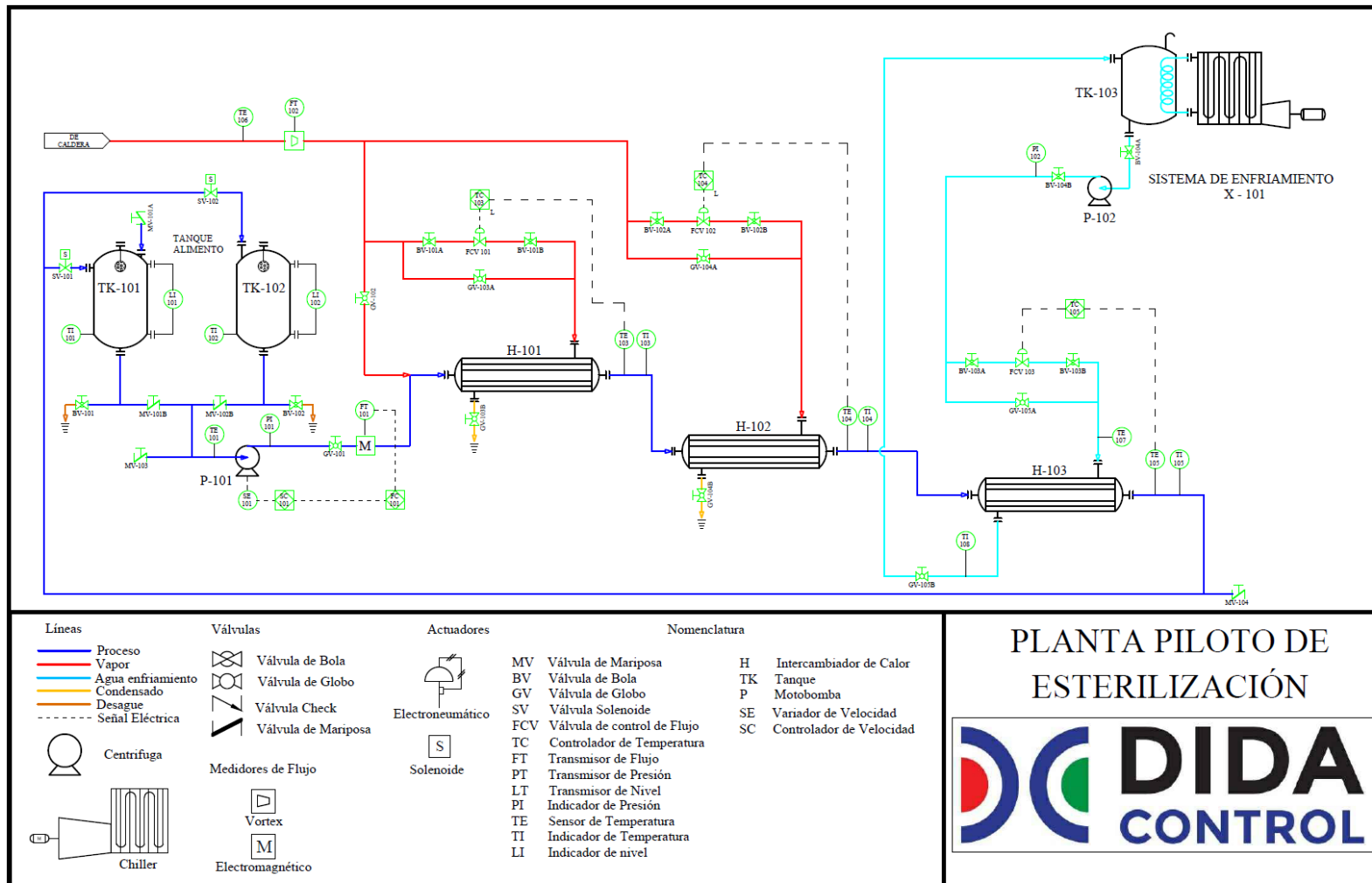
En la tabla 11 se evidencia que el PT es mucho mayor al tiempo prudente establecido (de 3 a 5 años), además de que el ROI es apenas del 2,52 %. Por lo que, a pesar de que la propuesta del intercambiador externo implique una reducción en el consumo de vapor, esta alternativa no es económicamente viable.

#### **4. Conclusiones.**

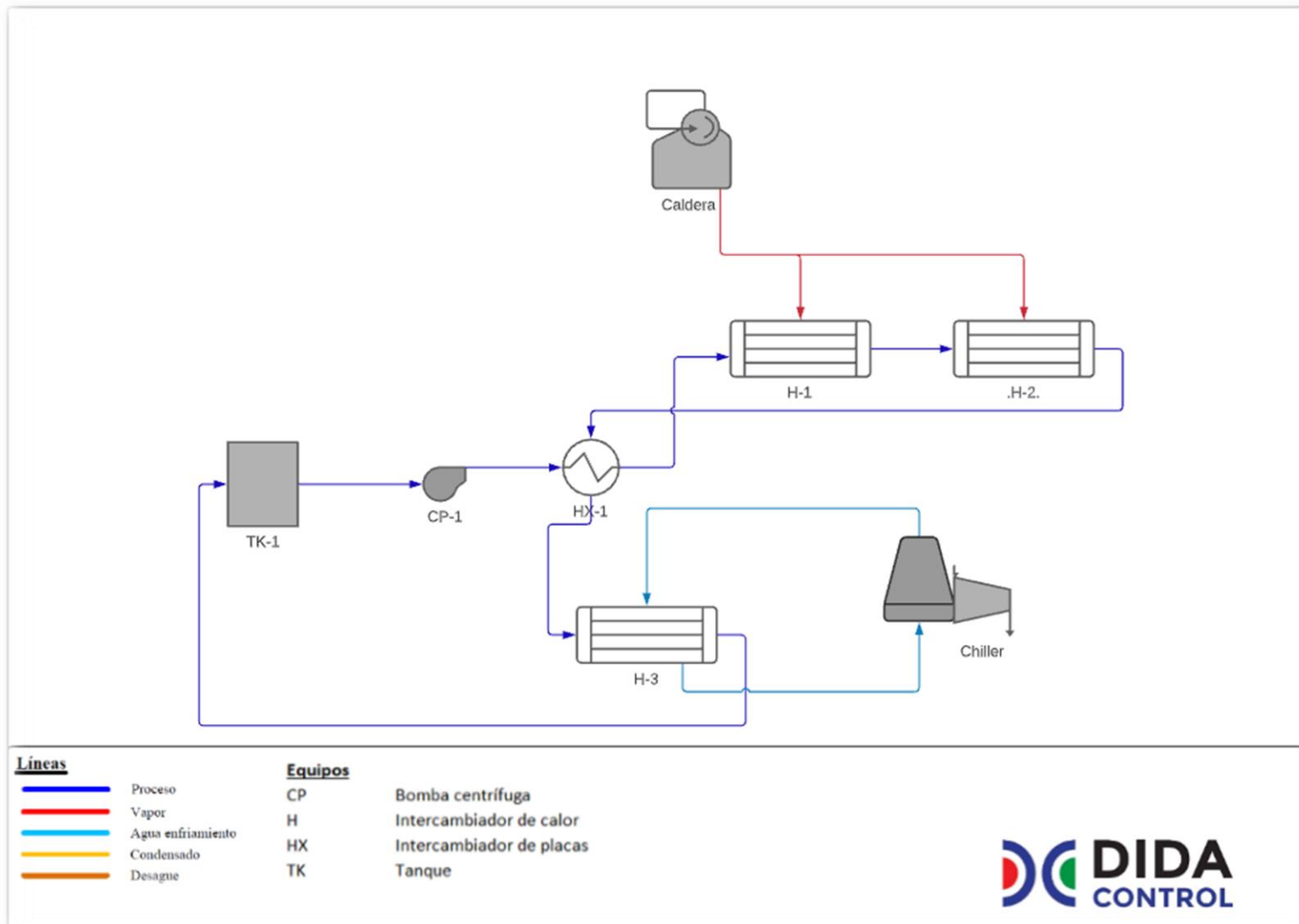
El diseño de experimentos implementado, así como su posterior análisis, permitieron determinar que es posible mejorar la eficiencia energética del esterilizador de la planta piloto de la Universidad Icesi, cambiando únicamente las condiciones de operación. Además, la mejora de eficiencia trae consigo una reducción en el costo de la operación debido a la reducción en el consumo de vapor. Por otro lado, a pesar de que la implementación de un intercambiador externo para aprovechar el calor sensible del fluido estéril brinda una reducción considerable en el consumo de vapor, la inversión inicial que este requiere no se ve compensada por los flujos de caja que genera el ahorro de dicho vapor, en parte debido al poco uso del equipo.



5. Anexos.



Anexo 1. P&ID de la planta piloto de esterilización de la Universidad Icesi.



Anexo 2. Esquema de implementación de intercambiador de placas.

## 6. Referencias.

- Buenaventura, G. (2000). Matemáticas financieras, (Ed.1), (chp 3.6.), (pp 60-67).
- Baca, G. (2003). Fundamentos de Ingeniería económica, (Ed 4), (chp 4), (pp 153)
- Castells, X (2011). Reciclaje de residuos industriales. Obtenido de: [https://books.google.es/books?id=oA7ndthNMYQC&pg=PA92&dq=Poder+calor%C3%ADfico+inferior&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwic9svujonKAhUHvxQKHR3\\_Av4Q6AEIXjAK#v=onepage&q=Poder%20calor%C3%ADfico%20inferior&f=false](https://books.google.es/books?id=oA7ndthNMYQC&pg=PA92&dq=Poder+calor%C3%ADfico+inferior&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwic9svujonKAhUHvxQKHR3_Av4Q6AEIXjAK#v=onepage&q=Poder%20calor%C3%ADfico%20inferior&f=false)
- CYPE Ingenieros, S.A. (2021). Precio en Colombia de un Intercambiador de placas. Obtenido de: [http://www.colombia.generadordeprecios.info/obra\\_nueva/Instalaciones/IC\\_Calefaccion\\_climatizacion\\_y\\_A/Sistemas\\_de\\_conduccion\\_de\\_agua/Intercambiador\\_de\\_placas\\_0\\_0\\_20\\_0\\_0\\_0.html](http://www.colombia.generadordeprecios.info/obra_nueva/Instalaciones/IC_Calefaccion_climatizacion_y_A/Sistemas_de_conduccion_de_agua/Intercambiador_de_placas_0_0_20_0_0_0.html)
- Díaz, S. Guevara, G. Patiño, E. (2017). DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR DE PLACAS PARALELAS. UNIVERSIDAD PEDAGOGICA Y TECNOLOGICA DE COLOMBIA. Obtenido de: [https://repositorio.uptc.edu.co/bitstream/001/2720/1/TGT\\_1315.pdf](https://repositorio.uptc.edu.co/bitstream/001/2720/1/TGT_1315.pdf)
- DIDACONTROL (2018). Manual de operación y mantenimiento, planta piloto de esterilización de la Universidad Icesi.
- Dion, M. (2013). Steam sterilization principles. Obtenido de Facilites and equipment. Obtenido de: [https://www.ispe.gr.jp/ISPE/02\\_katsudou/pdf/201504\\_en.pdf](https://www.ispe.gr.jp/ISPE/02_katsudou/pdf/201504_en.pdf)
- Doran, P. Sterilization (chp. 14.6), Elsevier (2013), Bioprocess engineering principles (Ed. 2) (pp 823 -834).
- EMCALI (2021). Tarifas de acueducto. Obtenido de: <https://www.emcali.com.co/web/acueducto/tarifas>
- EMCALI (2021). Tarifas de energía. Obtenido de: <https://www.emcali.com.co/web/energia/mercado-regulado>
- Gases de Occidente (GDO) (2016). Cromatografía del gas natural. Obtenido de: [https://issuu.com/gasesdeoccidente/docs/cromatografia\\_noviembre\\_1-14\\_de\\_201](https://issuu.com/gasesdeoccidente/docs/cromatografia_noviembre_1-14_de_201)
- Gases de Occidente (GDO) (2019). Información tarifaria. Obtenido de: <https://www.gdo.com.co/Paginas/informacion-tarifaria%E2%80%8B.aspx>
- López, 2011. Intercambiadores método de la eficiencia. Obtenido de: <https://lopezva.files.wordpress.com/2011/10/intercambiadores-metodo-de-laeficiencia.pdf>
- Monterroso, R. (2012). USAC. Obtenido de Conceptos de energía, eficiencia, eficiencia energética, conversión de energía, conservación de la energía y uso eficiente de la energía. Obtenido de: <http://www.repositorio.usac.edu.gt/4471/1/Conceptos%20de%20Energía%2C%20eficiencia%2C%20eficiencia%20energética%2C%20conversión%20de%20energía%2C%20conservación%20de%20la%20energía%20y%20uso%20eficiente%20de%20la%20energía.pdf>
- Peacock, S. (1995). Predicting physical properties of factory juices and syrups. Durban: ResearchGate.
- Seader J., Henley E., Roper K, Willey (2011), Separation process principles chemical and biochemical operations (Ed. 3) (pp 35- 180), (chp.2-4).
- U.S. Department of Energy (2003). How to calculate the True Cost of Steam. (n.d.). Obtenido de: [https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/05/f15/tech\\_brief\\_true\\_cost.pdf](https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/05/f15/tech_brief_true_cost.pdf)