

**Universidad de Matanzas
Facultad de Ciencias Técnicas
Departamento de Química**



**Evaluación del Intercambiador de Calor 6 de la Segunda Etapa de
Separación de la Empresa de Perforación y Extracción de Petróleo
del Centro**

**Trabajo final en opción al Título Académico de Especialista en Perforación de
pozos de petróleo y producción de petróleo
Mención: Producción de petróleo**

Autora: Ing. Greter Ramírez Díaz

Matanzas, 2023

**Universidad de Matanzas
Facultad de Ciencias Técnicas
Departamento de Química**

**Centro Politécnico del Petróleo
Sede: Varadero**



**Evaluación del Intercambiador de Calor 6 de la Segunda Etapa de
Separación de la Empresa de Perforación y Extracción de Petróleo
del Centro**

**Trabajo final en opción al Título Académico de Especialista en Perforación de
pozos de petróleo y producción de petróleo**

Mención: Producción de petróleo

Autora: Ing. Greter Ramírez Díaz

Tutor: Ing. Yoney López Hervis, Dr.C.
Ing. Agustín Benítez Hernández, Dr.C.

Matanzas, 2023

NOTA DE ACEPTACIÓN

Presidente del Tribunal

Miembro del Tribunal

Miembro del Tribunal

Calificación

Ciudad, fecha

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Yo, Greter Ramírez Díaz, declaro ser la única autora de esta investigación realizada en la Universidad de Matanzas, como requisito parcial para optar por la Especialidad de Postgrado en Perforación de Pozos de Petróleo y Producción de Petróleo. Mención Producción de petróleo y autorizo que la misma sea utilizada por la mencionada Institución y por la Empresa de Perforación y Extracción de Petróleo del Centro como material de consulta. Para que así conste, firma:

Nombre y Apellidos

Firma

A mi familia...

AGRADECIMIENTOS

- A mi tutor Yoney López Hervis por su acertada orientación y por poner sus conocimientos y su tiempo a disposición de este proyecto de forma incondicional.
- A todos los profesores que formaron parte del claustro que impartió la especialidad.
- A Yamilé Martínez Ochoa por su labor orientadora durante todo el transcurso de la especialidad.
- A Mariela Torres y Máximo Badía Díaz por aportar su experiencia en el campo que aborda la investigación.
- A Silfredo Olivares por sus enseñanzas con el trabajo del *software* Statgraphics.
- A mis amigos del Grupo de Gestión del Mantenimiento, por su colaboración y apoyo incondicional.
- A mi hijo Alejandro Pons y mi nuera Chamely Consuegra por su ayuda con la impresión y encuadernación de este trabajo.
- A mi madre y a mi esposo por su amor, apoyo y colaboración.
- A todo el que contribuyó a que ésta investigación se llevara a cabo,

A todos,

¡Muchas Gracias!

RESUMEN

Este trabajo se realiza en la planta de procesamiento de crudo perteneciente a la Empresa de Perforación y Extracción de Petróleo del Centro, cuyo objetivo es deshidratar el crudo a través de un tratamiento termoquímico en tanques dinámicos de sedimentación hasta lograr un porcentaje de agua y sedimentos de 2% y 1 500 cSt de viscosidad, según lo pactado para la venta. El calentamiento inicial del crudo se realiza en dos intercambiadores de calor de placas en espiral (4 y 6) operando en paralelo. El intercambiador 6 tiene más de un año en explotación sin evaluación ni limpieza, por lo que el objetivo de este trabajo es estimar el tiempo de limpieza de este equipo desde su puesta en marcha. El análisis estadístico de los datos de temperatura y presión en la entrada y salida, muestran que la mayoría de los parámetros medidos se encuentran bajo control. La evaluación se lleva a cabo a través del método de la eficiencia y el número de unidades de transmisión de calor (ϵ - NTU). Se obtiene una eficiencia para transferir calor entre 0,31 y 0,36, el flujo de petróleo calentado oscila entre el 91 y 99% del total que llega a la planta, la caída de presión oscila entre 2,4 y 4,6 barg, el consumo de vapor promedio, cuando trabaja solo, se mantiene entre 4,90 y 5,61 m³/h y es de 2,03 m³/h cuando opera en paralelo. El tiempo para la limpieza se estima según el método basado en el índice de pronóstico (A). De esta forma se predice una primera limpieza a los 759 días a partir de la puesta en marcha; sin embargo, al disponer la operación en paralelo con el intercambiador 4 se logra alargar el tiempo de limpieza en 423 días más.

ABSTRACT

The current work was developed in the crude oil treatment plant belonging to the Central Oil Drilling and Extraction Company (EPEP-C), aimed at dehydrating the crude oil through a thermochemical process in dynamic sedimentation tanks until achieving a water and sediment percentage of 2%, and a 1 500 Centistoke viscosity, as agreed upon for sale. The initial heating of the crude is done in two Spiral Plates Heat Exchanger (4 and 6), running in parallel. Heat exchanger 6 has been operational for more than a year without any thermal evaluation nor cleaning. Therefore, this work aims to estimate the cleaning schedule for this equipment since its start-up. Statistical analysis of the inlet and outlet temperature and pressure data showed that most of the tested parameters are under control. The evaluation is carried out through the efficiency method and the number of transfer units (ϵ - NTU). An efficiency to heat transfer between 0,31 and 0,36 is achieved. The flow of heated oil ranges between 91 and 99% of the total amount that reaches the plant, while the pressure drops ranges between 2,4 and 4,6 barg. The average steam consumption, when working on its own, remains between 4,90 and 5,61 m³/h, and is 2,03 m³/h when operating in parallel. The cleanup time according to the method based on the prognostic approach (A) is estimated. In this way, a first clean-up is expected 759 days after commissioning. However, by arranging the operation in parallel with heat exchanger 4, it is possible to extend the clean-up time by an additional 423 days.

TABLA DE CONTENIDO

Introducción.....	1
Capítulo 1: Análisis bibliográfico.....	4
1.1 Intercambiadores de Calor. Definición, criterios de clasificación	4
1.2 Intercambiadores de calor tubulares	7
1.2.1 Intercambiadores de calor de coraza y tubos	7
1.2.2 Intercambiadores de calor de Tubos Concéntricos	8
1.3 Intercambiadores de placas.....	9
1.3.1 Intercambiador de placas corrugadas	9
1.3.2 Intercambiadores de calor de placas en espiral	10
1.4 Métodos de evaluación de intercambiadores de calor	14
1.4.1 Coeficiente global de transferencia de calor (U).....	14
1.4.2 Método de la diferencia media logarítmica de temperatura (LMTD)	16
1.4.3 Eficiencia y Número de Unidades de Transmisión (ϵ - NTU).....	18
1.4.4 Caída de presión en los intercambiadores de calor	19
1.5 Ensuciamiento y factor de obstrucción.....	21
1.6 Mantenimiento aplicado a Intercambiadores de Calor	21
1.7 Conclusiones Parciales del Capítulo 1	23
Capítulo 2: Materiales y métodos.....	24
2.1 Proceso tecnológico de tratamiento de petróleo crudo de la EPEP Centro	24
2.2 Descripción detallada del caso de estudio	28
2.3 Metodología empleada para el tratamiento estadístico.....	30
2.3.1 Media de la muestra	30
2.3.2 Desviación estándar.....	31
2.3.3 Coeficiente de variación.....	31
2.4 Metodología para la evaluación del SHE 6.....	31
2.4.1 Determinación de las propiedades físicas del petróleo	33
2.4.2 Determinación del flujo de petróleo real que circula por el intercambiador de calor	33
2.4.3 Cálculo de la caída de presión.....	35

2.4.4 Metodología empleada para pronosticar el tiempo de limpieza para el intercambiador de calor.....	35
Capítulo 3: Resultados y discusión.....	37
3.1 Resultado y análisis de la evaluación estadística de la operación actual del intercambiador de calor.....	37
3.1.1 Análisis de las desviaciones significativas de los parámetros.....	38
3.2 Resultados y análisis de la evaluación del intercambiador de calor 6 en espiral de la segunda etapa de separación	41
3.2.1. Determinación de las propiedades físicas del petróleo	41
3.2.2. Determinación del flujo real de petróleo que circula por el interior del intercambiador de calor.....	41
3.2.3. Cálculo de la eficiencia y el número de unidades de transferencia (NTU).....	42
3.2.4. Cálculo de la caída de presión.....	42
3.2.5. Resultados del análisis de la caída de presión.....	42
3.2.6. Resultados del análisis del flujo de petróleo que entra al intercambiador	44
3.2.7. Resultados del análisis de la temperatura del petróleo que sale del intercambiador.....	46
3.2.8. Resultados del análisis de la eficiencia del intercambiador	48
3.2.9. Resultados del análisis del consumo de vapor en el intercambiador de calor 6.....	49
3.3 Predicción del tiempo de limpieza del intercambiador de calor 6.....	50
3.4 Conclusiones Parciales del Capítulo 3.....	52
CONCLUSIONES.....	54
RECOMENDACIONES	55
BIBLIOGRAFIA	56
ANEXOS	62

Introducción

La energía es un componente esencial en la actividad económica y es requerida para la producción de todos los bienes y servicios de una nación. La matriz energética cubana muestra una marcada dependencia de los combustibles fósiles para la generación de energía, cerca del 95 % de la energía eléctrica del país se produce a partir de combustibles fósiles: carbón, petróleo y gas natural (MINEM, 2021).

El petróleo crudo se presenta como una sustancia bituminosa, de color oscuro y textura viscosa, compuesta por una mezcla de hidrocarburos orgánicos insolubles en el agua. Sus propiedades físicas pueden ser diversas, en dependencia de la concentración de hidrocarburos que presente. En su composición se pueden encontrar parafinas, olefinas, hidrocarburos acetilénicos, aromáticos, compuestos oxigenados, sulfurados, nitrogenados, así como impurezas, tales como compuestos de azufre, oxígeno, trazas de metales y sales de sodio, calcio y magnesio (Lyons & Plisga, 2016).

Aunque existen yacimientos ubicados en diferentes puntos del país, Cuba extrae el 99 % de su petróleo en una franja norte de 750 kilómetros cuadrados de extensión ubicada entre La Habana y Varadero.

En Cuba, la empresa encargada de producir el 70% del petróleo crudo cubano es la Empresa de Perforación y Extracción de Petróleo del Centro (EPEP-Centro) ubicada en la Finca “La Cachurra”, poblado de Guásimas, municipio de Cárdenas. Creada el 18 de diciembre de 1976 su zona de operaciones está comprendida en las provincias Villa Clara, Ciego de Ávila, Cienfuegos y Matanzas. La EPEP- Centro tiene por objetivo la aplicación de un tratamiento termoquímico a los crudos provenientes de los pozos en producción, de forma tal que se alcancen los índices de calidad requeridos para posteriormente enviarlos por el Oleoducto Magistral hacia la UEB División Territorial de Comercialización de Combustibles de Matanzas. Bajo esta premisa se producen más de un millón de toneladas de petróleo y 438 millones de metros cúbicos de gas al año.

El proceso de producción de petróleo crudo de la EPEP – Centro, consta de dos etapas: la primera abarca la extracción, recolección y separación primaria de gas en los Centros Colectores y la segunda es el tratamiento termoquímico de la emulsión agua en petróleo, presentes en el fluido de producción (Epep-Centro, 2022).

El tratamiento comienza con la etapa de calentamiento, la cual contó en sus inicios con intercambiadores de tubos y coraza con aletas longitudinales, pero presentaban muchas restricciones hidráulicas, debido al elevado nivel de sedimentación de sustancias inorgánicas presentes en la corriente del fluido y no podían ser limpiados de forma mecánica, sin el desarme de los tubos, por su estructura. A partir de la necesidad de poder limpiar las incrustaciones de forma mecánica, se decide sustituir los intercambiadores de tubos y coraza por los de tipo espiral, de la firma Alfa Laval S.A. (Díaz, 2014).

En 2004 comienzan a operar tres intercambiadores en espiral del tipo 3H-C-1T hasta que en el 2012 son sustituidos por dos intercambiadores en espiral del tipo 3H-C-2T (intercambiadores de calor 4 y 5) con los que se logra elevar la temperatura del crudo de 40 a 85 °C. Desde la puesta en marcha de estos equipos la caída de presión se mantiene por encima de la recomendada por el fabricante. Esta afectación, junto a problemas de inestabilidad en el bombeo de petróleo desde las estaciones de rebombeo, inestabilidad en el suministro de vapor y otros problemas operacionales, provocó averías relacionadas con daños en las espirales y pérdida de hermeticidad de la junta. Bajo estas circunstancias operan alternadamente los intercambiadores 4 y 5 durante 2019. En 2020 se elabora un estudio de factibilidad y se aprueba la inversión para instalar un tercer intercambiador de calor (intercambiador de calor 6), que, después de llevar un año en operaciones se requiere evaluar cómo ha sido su funcionamiento durante este período de tiempo, así como determinar el tiempo óptimo para su limpieza ya que debido a las propiedades físico-químicas del crudo cubano, junto a los parámetros de operación en el equipo, pueden ocurrir obstrucciones y aumento de las pérdidas hidráulicas que inciden negativamente en el proceso.

En la EPEP-C se han realizado estudios anteriores, evaluando en diferentes circunstancias los intercambiadores de calor que se han usado en el proceso de tratamiento del crudo. Entre los aspectos que se han abordado están: la determinación del flujo de petróleo, cálculo y análisis de la caída de presión, eficiencia en los intercambiadores, cálculo del factor de ensuciamiento y determinación del tiempo óptimo de limpieza (Rizo, 2008) (Díaz, 2014) (Tanquero, 2015) (Cofiño, 2019).

Los intercambiadores de calor, en las plantas de tratamiento de crudo son de vital importancia porque disminuyen la viscosidad y favorecen la separación de la emulsión agua-petróleo, el transporte por tuberías y su posterior tratamiento.

Esta investigación se realiza con el fin de evaluar el intercambiador de calor 6 de la Segunda Etapa de Separación, operando solo y en paralelo, después de un año en operación, por ello se plantea como **Problema Científico**:

¿Cómo determinar el tiempo óptimo de limpieza del Intercambiador de calor 6 a partir de su puesta en marcha?

En cuanto a la solución de dicho problema se plantea la **hipótesis**:

Si se evalúa el intercambiador de calor 6 de segunda etapa de separación se podrían tomar decisiones para elevar la eficiencia del proceso.

Por lo que el **objetivo** de esta investigación es:

Estimar el tiempo óptimo de limpieza para el intercambiador de calor 6 a partir de su puesta en marcha.

Objetivos específicos:

1. Caracterizar estadísticamente la operación actual del intercambiador de calor 6.
2. Caracterizar el intercambiador de calor en espiral 6 ubicado en la segunda etapa de separación.
3. Evaluar la eficiencia del intercambiador de calor 6.
4. Determinar el ciclo de limpieza del intercambiador de calor en espiral 6.

Capítulo 1: Análisis bibliográfico

En la industria de hoy el aumento de la rentabilidad depende de la capacidad para mejorar la eficiencia energética, reducir costos, disminuir emisiones, usar el espacio con sentido común y optimizar el rendimiento de la producción según las demandas del mercado. Para afrontar y superar estos retos uno de los equipos más comunes encontrados en la mayoría de las industrias son los intercambiadores de calor.

En nuestro país, uno de los problemas más complejos que enfrenta la industria petrolera está relacionado con el comportamiento reológico del crudo pesado, lo cual dificulta su transporte, tratamiento de sus emulsiones y deshidratación. Para calentar las emulsiones de petróleo y agua se requiere el empleo de intercambiadores de calor.

En este capítulo se exponen aspectos fundamentales relacionados con los intercambiadores de calor, sus aplicaciones en las industrias y los métodos de evaluación más utilizados.

1.1 Intercambiadores de Calor. Definición, criterios de clasificación

Según establece la literatura (Incropera, 2011) (Walas, 2012) (Marín & Guillen, 2013) (Pita, 2015) (Kern, 2019), un intercambiador de calor es un sistema mecánico construido para transferir energía entre dos fluidos a diferentes temperaturas. Si las circunstancias lo permiten, lo más conveniente para ahorrar energía es que ambos fluidos sean de proceso.

En la literatura consultada se puede diferenciar una gran cantidad de criterios para clasificar los equipos de transferencia de calor, pero las más comunes son las que a continuación se enuncian:

Clasificación según la trayectoria de los fluidos

De acuerdo a la trayectoria que tienen los fluidos que intervienen en el proceso los intercambiadores pueden clasificarse en intercambiadores de flujo en paralelo, intercambiadores de flujo en contracorriente, intercambiadores de flujo cruzado de un solo paso o intercambiadores de flujo cruzado de pasos múltiples. Los más comunes son los dos primeros (Labat, 2018).

Flujo en paralelo: En esta distribución los fluidos caliente y frío fluyen en la misma dirección. La diferencia de temperatura es grande al principio, pero decae rápidamente al aumentar la distancia.

Flujo en contracorriente: Distribución en la que los fluidos entran por extremos opuestos de la unidad y fluyen en direcciones opuestas. El cambio en la diferencia de temperaturas a lo largo de la longitud del intercambiador es ostensiblemente menor que cuando el flujo es paralelo, figura 1.1.

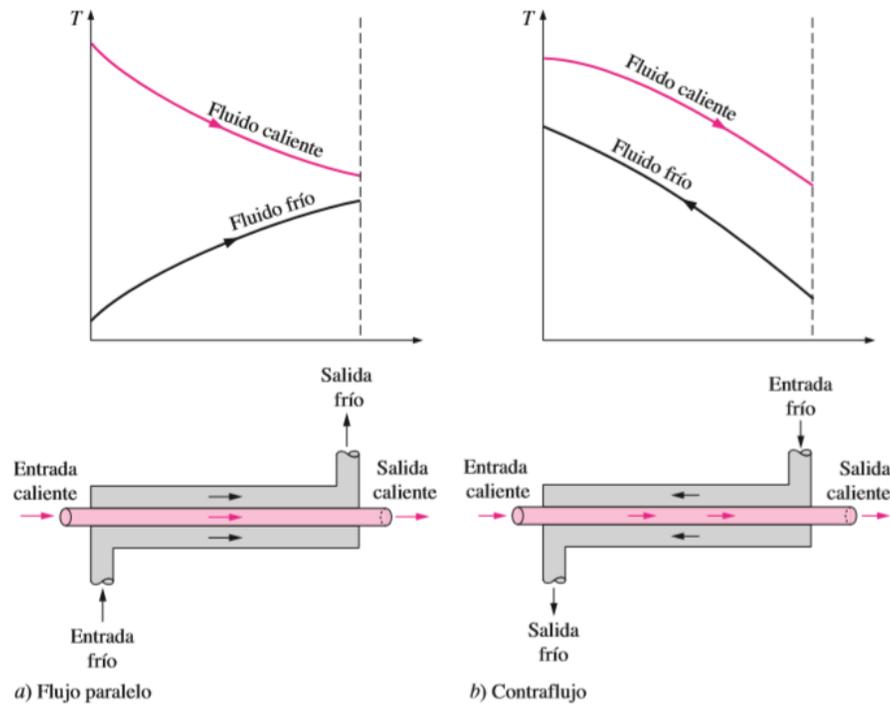


Figura 1.1 Flujo en paralelo y en contracorriente. Fuente: (Cengel & Ghajar, 2020)

Flujo cruzado de un solo paso: Distribución en donde un fluido dentro de la unidad circula perpendicularmente a la trayectoria del otro.

Flujo cruzado de pasos múltiples: En esta distribución un fluido se desplaza transversalmente en forma alternativa con respecto a la otra corriente del fluido, esta disposición se da con mayor frecuencia en el intercambio de calor de gas con líquido, figura 1.2.

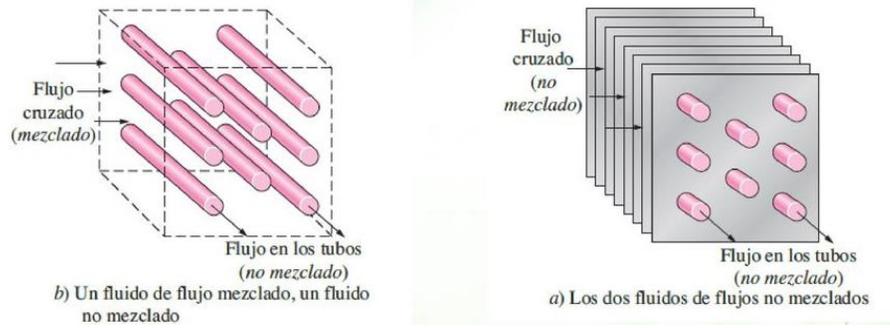


Figura 1.2 Flujo cruzado. Fuente: (Cengel & Ghajar, 2020)

Clasificación en función de la naturaleza de los fluidos.

Aunque su uso con los distintos tipos de fluidos no es rígido, unas configuraciones son más adecuadas que otras para cada pareja de fluidos, de esta forma se pueden presentar las clasificaciones que se muestran en la Tabla 1.1:

Tabla 1.1 Clasificación Intercambiadores de calor en función de la naturaleza de los fluidos

Clasificación según la naturaleza de los fluidos	Intercambiadores de calor adecuados
Ambos fluidos son líquidos	Intercambiador de carcasa redonda y tubos lisos, Intercambiador de tubos concéntrico, Intercambiador de placas corrugadas, Intercambiador en espiral
Intercambiadores líquido-gas	Intercambiadores de tubos concéntricos, Intercambiadores de carcasa redonda y tubos aleteados, Intercambiadores rectangulares de tubos y aletas externas
Ambos fluidos son gases	Intercambiadores de carcasa (habitualmente rectangular) y tubos, Intercambiadores compactos de tubos y aletas, Intercambiadores compactos de placas y aletas, Regeneradores

Fuente: (Marín & Guillen, 2013)

Clasificación en función de la configuración geométrica (Marín & Guillen, 2013); (Labat, 2018).

- ✓ Intercambiadores de coraza y tubos
- ✓ Intercambiadores de tubos concéntricos

- ✓ Intercambiadores de placas
- ✓ Intercambiadores en espiral

1.2 Intercambiadores de calor tubulares

1.2.1 Intercambiadores de calor de coraza y tubos

Los intercambiadores de calor de carcasa cilíndrica y tubos son los más utilizados, especialmente cuando los fluidos son líquidos, debido a que pueden ser diseñados para funcionar dentro de todos los rangos de presiones y temperaturas de trabajo de la mayor parte de procesos industriales, la relación de la transferencia de calor frente al volumen y peso es muy grande, pueden ser construidos con facilidad en una amplia gama de materiales y a bajo costo. Este tipo de intercambiador tiene la coraza circular y los tubos lisos organizados en un banco por donde circula uno de los fluidos y el otro fluido circula confinado entre el exterior de los tubos y la coraza, figura 1.3. Además de estos dos elementos principales, constan también de separadores de fluido / baffles / desviadores , cabezales de entrada y salida, toberas de entrada y salida de la coraza y juntas, (Levenspiel, 1993) (Marín & Guillen, 2013) (Kern, 2019).



Figura 1.3 Intercambiador de calor de Tubo y coraza. Fuente: (Gilbert, 2015)

Los intercambiadores de tubos y coraza se clasifican según el número de pasos que se realizan por la coraza y por los tubos, como muestra la figura 1.4. Por ejemplo, los intercambiadores en los que todos los tubos forman una U en la coraza se dice que son de un paso por la coraza y dos pasos por los tubos. De modo semejante, a un intercambiador que comprende dos pasos en la coraza y cuatro pasos en los tubos se le llama de dos pasos por la coraza y cuatro pasos por los tubos (Cengel & Ghajar, 2020)

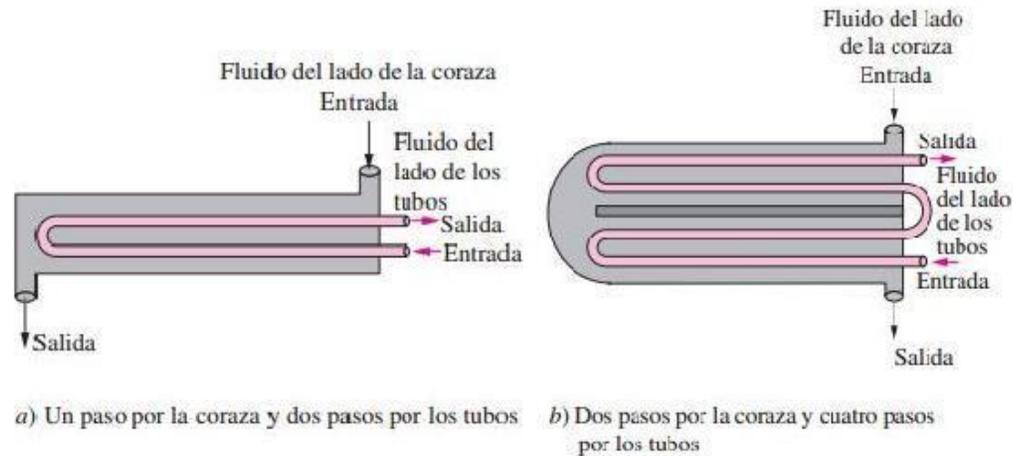


Figura 1.4 Disposiciones del flujo en pasos múltiples en los Intercambiadores de calor de coraza y tubos. Fuente: (Cengel & Ghajar, 2020)

Según la forma que presenten los tubos y su disposición se pueden diferenciar tres tipos principales: de cabezal flotante, tubos en forma de U y de cabezal fijo (Arroyo, 2014)

La norma de la Asociación de Fabricantes de Intercambiadores Tubulares (TEMA por sus siglas en inglés) en su novena edición, integrada por 16 fabricantes de equipos de intercambiadores de calor de carcasa y tubos, establece tres letras para la identificación de intercambiadores de calor. TEMA B utilizado para procesos químicos, TEMA C es el más utilizado industrialmente y en procesos comerciales y TEMA R que es el más riguroso, normalmente se utiliza en aplicaciones de procesos del petróleo y relacionados (TEMA, 2007)

En estos intercambiadores es más conveniente que el fluido que forme espuma o depósitos salinos y sea muy corrosivo transite por dentro de los tubos debido a que es más fácil la limpieza (Cheremisinoff, 2000); (Lienhard, 2008); (Tanquero, 2015).

1.2.2 Intercambiadores de calor de Tubos Concéntricos

Constituye el tipo más simple de intercambiador de calor, consta de dos tubos concéntricos de diámetros diferentes, en un intercambiador de este tipo uno de los fluidos pasa por el tubo más pequeño, en tanto que el otro lo hace por el espacio anular entre los dos tubos (Cengel & Ghajar, 2020). En la figura 1.5 se muestra un ejemplo de este tipo de intercambiador. En estos equipos los fluidos discurren en contracorriente puro. Se pueden conectar en serie o en paralelo según las necesidades, lo que permite una alta flexibilidad en su diseño. (Arroyo, 2014).



Figura 1.5 Intercambiador de calor de tubos concéntricos. Fuente: (Arroyo, 2014)

1.3 Intercambiadores de placas

Los intercambiadores de placas representan una evolución tecnológica frente a los intercambiadores tubulares, pues consiguen mejores prestaciones en un volumen más reducido, aunque involucran un proceso de fabricación más complicado. Como ventajas se pueden enunciar una elevada eficiencia y una buena respuesta frente al ensuciamiento (Marín & Guillen, 2013).

1.3.1 Intercambiador de placas corrugadas

Los intercambiadores de placas consisten en una serie de placas metálicas rectangulares, que se acoplan unas a otras en un bastidor metálico y se mantienen fijas mediante unos tornillos laterales. Consta con empaquetaduras que son útiles para sellar la placa. El marco consiste en un plato soldado fijo y uno de presión móvil. La placa móvil facilita el acceso para la limpieza o el intercambio de las superficies de transferencia de calor. Una característica importante de este tipo de intercambiador de calor es la posibilidad de agregar o quitar placas para variar la superficie de transferencia de calor según sea necesario (Energy Efficiency Best Practice Programme, 2001).

Cada placa está estampada con un patrón ondulado que forma una serie de corrugaciones por las que circula el fluido. Estas corrugaciones tienen tres funciones, la más importante, favorecer la transferencia de calor, al aumentar la superficie de intercambio y la turbulencia. En segundo lugar, logran una mayor rigidez de la placa y proveen un soporte mecánico al conjunto de placas a través de los múltiples puntos de contacto. Por último, mantienen constante la separación entre ellas.

En la figura 1.6. se muestra un intercambiador de este tipo, en el que se puede observar cómo es la circulación del fluido.

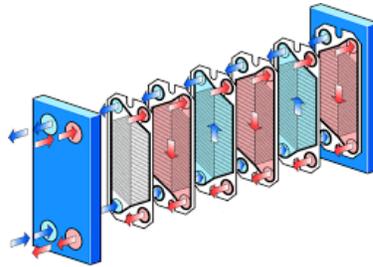


Figura 1.6: Intercambiador de calor de placas. Fuente: (Arroyo, 2014)

El caudal total del fluido se divide en partes iguales por la cantidad de placas del intercambiador. Dentro de cada canal, el fluido se divide a su vez por el número de subcanales que forman las corrugaciones. De esta forma se consigue aumentar la velocidad y la turbulencia del fluido. Éste logra, al final de cada placa, alcanzar su temperatura final (Pita, 2015). Estos intercambiadores no pueden soportar altas presiones ni temperaturas (Labat, 2018)

1.3.2 Intercambiadores de calor de placas en espiral

Como muestra la figura 1.7 los intercambiadores de placa en espiral consisten en un par de láminas enrolladas alrededor de un eje formando pasajes paralelos en espiral por entre los cuales circulan los fluidos. Los canales que se forman en la espiral se encuentran cerrados en los extremos para que los fluidos no se mezclen. Al fluir entre curvas se induce turbulencia en el fluido, lo que mejora la transferencia de calor y reduce las incrustaciones. Estos equipos son muy utilizados para fluidos viscosos, lodos y líquidos con sólidos en suspensión, así como en operaciones de condensación y vaporización (Arroyo, 2014).



Figura 1.7 Intercambiadores de placa en espiral. Fuente: (Mendizabal, 2002)

La clasificación de los Intercambiadores de placa tipo espiral depende del recorrido de los fluidos en el Intercambiador. Estos pueden tener cualquiera de las siguientes combinaciones (Romero, Barboza, & Zarate, 1998):

- Flujo en espiral para ambos fluidos: Cuando se tiene flujo en espiral en ambos canales, se utilizan cubiertas planas en cada lado de la espiral. Con este tipo de arreglo los fluidos normalmente viajan en contracorriente. El fluido caliente usualmente se introduce por el pasaje central de la unidad y fluye hacia la periferia y el fluido frío entra por el pasaje de la periferia y fluye hacia el centro del Intercambiador. Con esta disposición no se requiere el aislamiento ya que el fluido frío está en la vuelta externa de la espiral.
- Un fluido con flujo en espiral y el otro en flujo cruzado a través de la espiral: Con este diseño el canal de flujo cruzado es abierto en ambos lados y el canal en espiral esta soldado en ambos lados. Este tipo de intercambiador es recomendado cuando existe una gran diferencia entre los caudales de los fluidos a ser manejados.
- Un fluido con flujo en espiral y el otro en una combinación de flujo cruzado con flujo en espiral. Para servicios de condensación la cubierta cónica distribuye el vapor dentro de los pasajes para primero condensarlos en flujo cruzado y después de que el volumen ha sido reducido, la condensación final y el subenfriamiento ocurren en flujo espiral.

Este tipo de intercambiador presenta una serie de ventajas sobre los intercambiadores de tubo y coraza debido a la velocidad que es válido citar:

La presencia de un único canal lo hace ideal para el calentamiento y enfriamiento de fluidos que llevan incrustaciones o suciedades. La suciedad puede ser manejada en el espiral a velocidades tan bajas como 0,61 m/s sin que se deposite sobre las paredes del canal.

Para algunos tamaños y presiones de diseño, si se eliminan las barras espaciadoras, el Intercambiador puede manejar líquidos con un gran contenido de fibras, como los que se requieren en la industria papelera.

La distribución del fluido dentro del canal es buena ya que existe un único paso a través del mismo.

Los Intercambiadores de placa en espiral requieren más tiempo entre limpiezas que los intercambiadores de tubos y coraza, debido a que la curvatura de los canales crea un efecto de

flujo secundario. Esto provoca mayor turbulencia, dificulta la acumulación de las suciedades y produce un efecto de restregado sobre las paredes de los canales.

La limpieza mecánica, con agua a presión o vapor es más fácil debido a que el ancho máximo del canal es de 1,83 metros facilitando la limpieza. El Intercambiador de placa tipo espiral es muy conveniente para el calentamiento y enfriamiento de líquidos viscosos, ya que su relación D/L es más baja que para intercambiadores tubulares. Consecuentemente, la transferencia de calor en flujo laminar es mucho mayor para intercambiadores de placa tipo espiral. Cuando se requiere calentar o enfriar un líquido viscoso el Intercambiador debe orientarse con su eje en el sentido axial. Con el eje vertical el líquido viscoso se estratifica y este reduce la transferencia de calor hasta en un 50%.

Los grandes pasajes hacen que sea posible alcanzar temperaturas cercanas a la requerida y obtener un control preciso de la misma.

En flujo axial se logran bajas caídas de presión lo cual es importante cuando ocurre condensación en vacío o se manejan grandes caudales.

El intercambiador de placa tipo espiral es muy compacto. Por ejemplo: se puede tener 501.68 m² de superficie de transferencia de calor en un aparato de 1.68 metros de diámetro con un ancho de canal de 1.83 metros. De esta manera se disminuyen los costos de instalación.

Son de fácil acceso ya que removiendo las tapas todo el espiral es accesible para inspección y limpieza.

Los intercambiadores de calor en espiral pueden ser fabricados en todos los metales que puedan ser conformados en frío y soldado, como son acero al carbono, acero inoxidable y titanio. Presentan alto grado de aleación y son rutinariamente usados por la excelente resistencia a la corrosión y la erosión (Cofiño, 2019).

Según (AlfaLaval, Manual de instalación, funcionamiento y mantenimiento Intercambiador de calor espiral, 2016) para la limpieza, el procedimiento más eficaz consiste en lavar el aparato sin retirar la tapa utilizando una solución ácida o alcalina de limpieza o, cuando sea necesario, un disolvente con base de hidrocarburos. La elección del producto de limpieza, su concentración, temperatura y duración, así como el protocolo de limpieza los determinará la

composición específica de los tipos de depósito, para lo cual recomiendan los productos limpiadores de la tabla 1.2.

Tabla 1.2 Productos limpiadores usados para la limpieza de Intercambiadores de placa en espiral

Tipo de depósito	Producto limpiador	Condiciones
Orgánico (capa microbiológica, cieno, algas, proteínas, grasas, etc)	AlfaCaus	10 vol.%, 60°C
Aceitosos	Alfacon Multi CIP Super AlfaCaus	10 vol.%, 60°C
Bituminosos, asfalto, con base de hidrocarburo	Parafina o disolvente con base de nafta seguido de una limpieza AlfaCaus	
Carbonato de calcio Fosfato de calcio	Alpacon Descalant	10 vol.%, 60°C
Depósitos metálicos	AlfaPhos	10-20 vol.%, 60°C

Fuente: (AlfaLaval, Manual de instalación, funcionamiento y mantenimiento Intercambiador de calor espiral, 2016)

Para el caso de la limpieza mecánica se puede retirar manualmente los cúmulos de sólidos que se desprenden y puede resultar muy eficaz un chorro de agua caliente o de vapor a alta presión, según muestra la figura 1.8, para retirar los sólidos y los depósitos persistentes. Es recomendado por el fabricante AlfaLaval cambiar las juntas siempre que se abra la cubierta.



Figura 1.8 Limpieza mecánica. Fuente: (AlfaLaval, Manual de instalación, funcionamiento y mantenimiento Intercambiador de calor espiral, 2016)

1.4 Métodos de evaluación de intercambiadores de calor

Los métodos de evaluación de intercambiadores de calor que generalmente se usan son el Método de la diferencia media logarítmica, LMTD y el Método de la eficiencia y el número de unidades de transferencia de calor, $\epsilon - NTU$ (Incropera, 2011) (González, 2011) (Cengel & Ghajar, 2020).

1.4.1 Coeficiente global de transferencia de calor (U)

El comportamiento del coeficiente global de transferencia de calor en el transcurso del tiempo se considera un parámetro fiable para determinar con qué rapidez se deterioran las condiciones que favorecen el intercambio térmico y de esta forma estimar la vida útil de los intercambiadores de calor (Guðmundsson, 2015). Además, su cálculo previo es necesario para determinar el factor de incrustaciones e impacto de las deposiciones en la pérdida de eficiencia de la instalación (Tamayo, 2016).

El coeficiente total de transferencia de calor está influenciado por el espesor y la conductividad térmica de los materiales a través de los cuales se transfiere el calor. Cuanto mayor sea el coeficiente, mayor será la velocidad con que se transfiere el calor desde su fuente hacia el producto que está siendo calentado. En un intercambiador de calor, la relación entre el coeficiente total de transferencia de calor (U) y el flujo de transferencia de calor (Q) puede ser demostrada mediante la siguiente ecuación (Incropera, 2011) (Perry & Green, 2019):

$$Q = UA(LMTD) \quad (1.1)$$

donde,

Q: Flujo de calor transferido, W

A: Área de la superficie de transferencia de calor, m²

U: Coeficiente global de transferencia de calor, W/(m²°C)

LMTD = Diferencia media logarítmica de temperatura, °C

El coeficiente global de transferencia de calor es el inverso de la suma de las diferentes resistencias que pueden oponerse al flujo calorífico. Este coeficiente considera la resistencia del calor que se presenta entre el medio o fluido que está en contacto con la superficie interior de la pared o tubería, la resistencia al paso del calor del material que forma la pared, las distintas resistencias que se agregan por las capas que recubren la pared o tubería y la resistencia que produce por la película de líquido, gas, aire o fluido en el exterior o ambiente circundante. Todas ellas se suman y forman el coeficiente total de transferencia de calor (Quintana, 2017).

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + R_w + \frac{1}{h_o}} \quad (1.2)$$

$R_w = L / k$: Resistencia Térmica

h : Coeficiente pelicular de transferencia de calor por convección, $W/(m^2\text{°C})$

L : Espesor de pared, m

k : Conductividad térmica, $W/(m\text{°C})$

Resulta de utilidad disponer de valores tabulados del coeficiente global para varias situaciones que se pueden encontrar en la práctica (Incropera, 2011), (Kern, 2019).

El coeficiente global de transferencia de calor según la ecuación 1.2 depende de los coeficientes peliculares de transferencia de calor (h_{i0}) en las dos caras de la superficie que separa los fluidos, de las propiedades físicas de los fluidos y de cómo éstas dependen de la temperatura, además de la geometría de la pared y de sus propiedades físicas (Incropera, 2011). Tiene en cuenta las resistencias individuales y globales a la transferencia, incluida la de pared (R_w) que generalmente no se tiene en cuenta porque se trata de metales con alta conductividad térmica (Branan, 2002) (Díaz, 2014).

La resistencia de la pared depende de la conductividad térmica del material, y los coeficientes individuales de las propiedades físicas de los fluidos (Rizo, 2008); (Díaz, 2014); (Cofiño, 2019).

En un intercambiador de calor puede haber una combinación de efectos de transferencia sin embargo es la convección la que predomina. Toda la estructura del intercambiador puede equilibrarse a un nivel de temperatura mediante el proceso de conducción. Parte del calor de esa estructura pudiese ser emitido por radiación, y otra porción puede ser disipada por convección a la atmosfera circundante, a la cual se le denomina pérdidas de calor. Aunque en general este flujo de calor hay que tenerlo en cuenta, la práctica habitual es minimizarlo recubriendo la superficie exterior con aislamiento térmico. Para el cálculo del flujo de calor entre ambos fluidos, y el área de intercambio que los separa, no se suelen incluir estas pérdidas (Rizo, 2008).

1.4.2 Método de la diferencia media logarítmica de temperatura (LMTD)

En los Intercambiadores de calor las temperaturas de los fluidos por lo general, no son constantes, sino que varían de un punto a otro a medida que el calor pasa del fluido caliente al frío, e incluso para una resistencia térmica constante, el flujo de calor por unidad de área varía a lo largo del intercambiador. En consecuencia, debe determinarse un valor apropiado de ΔT consistente con el funcionamiento real del intercambiador, tal diferencia de temperaturas se denomina diferencia media logarítmica de temperaturas y se calcula según la ecuación 1.3 (Manrique, 2005).

$$\Delta T_M = F_T(LMTD) \quad (1.3)$$

Donde LMTD es la diferencia media logarítmica de temperaturas calculada para flujos en paralelo o en contracorriente puros (ecuación 1.4) y F_T es un factor de corrección usado para calcular la verdadera diferencia de temperatura; por ejemplo, para intercambiadores de calor multipaso y de flujo cruzado, este factor depende del modelo de flujo y está función de la eficiencia para el lado frío y la relación entre las capacidades calóricas. La literatura especializada ofrece gráficos para determinar el valor de F_T . Este debe ser aproximadamente 0,9 y siempre mayor que 0,75 (Incropera, 2011) (Walas, 2012) (Pita, 2015) (Sánchez, 2018).

Según las heurísticas (Walas, 2012) se puede resumir como sigue:

- a) $F_T=1$; Si la temperatura de uno de los agentes portadores de calor no varía en el proceso a lo largo de la superficie, condensación de vapor o ebullición de líquidos (Shilling, 2000) (Incropera & DeWitt, 2011) (Kern, 2019).
- b) $F_T=0.7$; Para intercambiadores de calor de flujo cruzado y para Intercambiadores de coraza y tubos (STHE) TEMA E (1 – 1).
- c) $F_T=0.8$; Para Intercambiadores de coraza y tubos (STHE) TEMA E (1 – 2).
- d) $F_T=0.95$; Para Intercambiadores de coraza y tubos (STHE) TEMA G (1–2) y coraza TEMA H (1–2).
- e) $F_T=0.79$; Para Intercambiadores de coraza y tubos (STHE) TEMA J (1–2).
- f) $F_T=0.9$; Para intercambiador de calor compacto de múltiples pasos y para Intercambiadores de coraza y tubos (STHE) TEMA E y múltiples pasos por la coraza y por los tubos.

El valor de F_T es función de los parámetros P y R , los cuales para ser calculados requieren de las temperaturas de salida y entrada del fluido del lado frío (t_2 y t_1) y las temperaturas de salida y entrada del fluido del lado caliente (T_2 y T_1), según ecuaciones 1.4 y 1.5.

$$P = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} \quad (1.4)$$

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} \quad (1.5)$$

El valor de F_T cercano a la unidad no significa que el intercambiador tenga alta eficiencia térmica, sino que su comportamiento es cercano al flujo en contracorriente puro para condiciones de operación comparables de flujos y temperaturas de entrada. Debido al alto costo capital que significa un intercambiador de coraza y tubos, generalmente se diseña para $P = 60\%$ ($F_T \geq 0,80$).

El factor de corrección depende de la configuración geométrica del intercambiador y de las temperaturas de entrada y de salida de las corrientes de fluido caliente y frío. Por lo tanto, el factor de corrección F_T para un intercambiador de calor es una medida de la desviación de la ΔT_M con respecto a los valores correspondientes para el caso de contraflujo (Cengel & Ghajar, 2020)

$$LMTD = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \quad (1.6)$$

Donde:

ΔT_1 : Diferencia de temperatura del cabezal caliente, °C

ΔT_2 : Diferencia de temperatura del cabezal frío, °C

La diferencia media logarítmica de temperatura, que es la forma apropiada de la diferencia de temperatura promedio que debe usarse en el análisis de los intercambiadores de calor. En este caso, T_1 y T_2 representan la diferencia de temperatura entre los dos fluidos en ambos extremos (de entrada y de salida) del intercambiador. No existe diferencia con respecto a cuál de los extremos de éste se designe como la entrada o la salida. Se debe hacer notar que las ecuaciones son útiles para cualquier intercambiador de calor, siempre que las diferencias de temperatura de punto final se definan de manera adecuada.

1.4.3 Eficiencia y Número de Unidades de Transmisión (ϵ - NTU)

El método de la temperatura media logarítmica (LMTD), es de suma utilidad cuando se conocen todas las temperaturas de los fluidos en las entradas y salidas del intercambiador de calor o cuando pueden calcularse sin problema con un balance de energía. En estas condiciones la diferencia media logarítmica de temperaturas puede evaluarse sin ninguna dificultad, pudiéndose así determinar fácilmente el área de transferencia de calor que se requiere, el flujo de calor transferido, o el coeficiente total de transferencia de calor. Sin embargo, en ciertas circunstancias las temperaturas de los fluidos en las salidas constituyen las incógnitas en un intercambiador de calor determinado, por lo que el análisis térmico mediante la diferencia media logarítmica de temperaturas es de naturaleza repetitiva y requiere tanteos. En estos casos es más conveniente emplear un método de análisis térmico basado en la eficiencia que tiene un intercambiador de calor para transferir energía. Tal método se conoce como el método eficiencia y número de unidades de transferencia, ϵ - NTU por sus siglas en inglés, (Manrique, 2005) (Incropera, 2011) (Cengel & Ghajar, 2020).

La eficiencia de un intercambiador de calor depende de su configuración geométrica, así como de la configuración del flujo. Por lo tanto, los diferentes tipos de intercambiadores tienen relaciones diferentes para la eficiencia (Cengel & Ghajar, 2020). Con este procedimiento se puede evaluar el funcionamiento de un intercambiador de calor ya existente cuando el área de transferencia de calor y los detalles de la construcción son conocidos (Quintana, 2017).

La eficiencia de un intercambiador de calor no es eficiencia de temperaturas sino para transferir calor. Este parámetro depende del tamaño del intercambiador de calor o de su área de transferencia, de la resistencia térmica entre ambos fluidos y de las capacidades caloríficas de éstos. Estas variables pueden agruparse en forma adimensional mediante el número de unidades de transferencia de calor en el intercambiador (Millán, 2001), (Manrique, 2005), (Gavin, 2012). esto es,

$$NTU = \frac{UA}{C_{min}} \quad (1.7)$$

Donde:

NTU : Número de Unidades de Transmisión (adimensional)

C_{min} : Capacidad calórica mínima ($W/^{\circ}C$)

Autores como (Manrique, 2005) (Incropera, 2011) (Cengel & Ghajar, 2020) plantean que la eficiencia de un intercambiador de calor se define como la relación entre la cantidad de calor transferido real y la cantidad máxima posible de calor a transferir. Como muestra la ecuación 1.8.

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_{max}} \quad (1.8)$$

$$Q = C_h(T_{h_i} - T_{h_o}) = C_c(T_{c_o} - T_{c_i}) \quad (1.9);$$

$$Q_{max} = C_{min}(T_{h_i} - T_{c_i}) \quad (1.10)$$

Donde:

T_{c_o} : Temperatura de salida del fluido frío, K

T_{c_i} : Temperatura de entrada del fluido frío, K

T_{h_i} : Temperatura de entrada fluido del caliente, K

T_{h_o} : Temperatura de salida del fluido caliente, K

C_{min} : Capacidad Calórica mínima, W/ K

C_c : Capacidad calórica del fluido frío, W/K

C_h : Capacidad calórica del fluido caliente, W/K

1.4.4 Caída de presión en los intercambiadores de calor

La caída de presión debe tenerse en cuenta tanto en el proceso de diseño como en la selección e instalación de un intercambiador de calor porque afecta los costos de operación, además porque la caída de presión puede afectar la presión absoluta de los fluidos de tal manera que se altere el funcionamiento del intercambiador de calor, sobre todo en aquellos casos en que opere cerca a la saturación o haya cambio de fase (Padilla & Silvera, 2016).

Los cálculos hidráulicos en los intercambiadores de calor son imprescindibles, para poder definir los gastos de energía que son necesarios para garantizar el movimiento de los fluidos en el intercambiador de calor. La caída de presión es función del tipo de fluido, de las características del agente calefactor, en caso de que exista cambio de fase (condensación de vapores) y de la geometría y dimensiones constructivas de los mismos (Kays & London, 1984) (Incropera, 2011) (Guach, 2016) (Cofiño, 2019).

Según (Kern, 2019) la caída de presión permitida en un intercambiador es la presión estática del fluido que debe disiparse para mover el fluido a través del intercambiador. Cuando se ha

designado una caída de presión definida para un intercambiador como parte de un circuito de bombeo, deberá siempre utilizarse tan completamente como sea posible en el intercambiador, pues de otra forma deberá disiparse mediante un reductor de presión.

En general, la caída de presión es una restricción importante en el diseño de intercambiadores de calor compactos; si el fluido es gaseoso, los intercambiadores tienden a presentar una gran área frontal. Según la ecuación 1.11, (Kays & London, 1984) (Guach, 2016) (Cofiño, 2019), la caída de presión total entre la entrada y la salida es:

$$\Delta P = \Delta P_{ent} + \Delta P_{nuc} + \Delta P_{sal} \quad (1.11)$$

Donde:

ΔP_{ent} : Caída de presión por contracción

ΔP_{nuc} : Caída de presión en el núcleo

ΔP_{sal} : Presión recuperada por expansión

Esta metodología de cálculo planteada por (Kays & London, 1984) no es aplicable para el caso específico de los intercambiadores de calor compacto en espiral, debido a los cambios y variaciones que sufren las variables independientes como son (Cofiño, 2019):

1. Disminución de la viscosidad aparente con el incremento de la temperatura y la generación de gas por vaporización instantánea, producto de los componentes ligeros de petróleo crudo.
2. Disminución de la densidad de la mezcla gas – líquido.
3. Incremento del flujo volumétrico en el interior del intercambiador de calor compacto en espiral como consecuencia del cambio de fase.

Sin embargo, la ecuación 1.12, (Perry & Green, 2019) (Cofiño, 2019), sí se puede utilizar para el cálculo de la caída de presión en los intercambiadores de calor en espiral:

$$\Delta P = \frac{LV^2\rho}{1.705 \cdot 10^3} \cdot 1.45 \quad (1.12)$$

L : Longitud característica del intercambiador de calor (m)

V : Velocidad del fluido (m/s)

ρ : Densidad del fluido (kg/m³)

1.5 Ensuciamiento y factor de obstrucción

El ensuciamiento se refiere a cualquier capa o depósito de materias extrañas en una superficie de transferencia de calor, comúnmente estos materiales tienen baja conductividad térmica (son malos conductores de calor y entorpecen la transferencia de calor), lo que provoca una mayor resistencia a la transferencia de calor.

El ensuciamiento puede ocurrir por múltiples razones: posible suciedad del flujo, posibles subproductos formados por envejecimiento o por reacciones químicas en el fluido, la corrosión efectuada por el fluido en algún punto del recorrido u oxidaciones producidas en la superficie del circuito del fluido, posibles materiales extraños al fluido arrastrados por este, como restos de segmentos de compresores, aceites lubricantes, juntas, etc. El ensuciamiento se cuantifica a través de una resistencia térmica adicional, denominado factor de ensuciamiento, cuyo valor depende de la naturaleza del fluido, de la velocidad del mismo, de la temperatura de operación y del tiempo de funcionamiento del intercambiador (Pita, 2015).

El factor de ensuciamiento es un valor matemático (generalmente denominado R_f o R_D) y es una relación entre el coeficiente de transferencia de un intercambiador de calor limpio y la misma unidad, pero con suciedad (Hale, 2020).

El factor de ensuciamiento puede obtenerse de forma experimental, algunos valores típicos se encuentran tabulados en diferentes bibliografías (Quintana, 2017)

Los dos factores más influyentes en la formación de depósitos son la temperatura de la superficie de intercambio y la velocidad del fluido. En general altas velocidades ocasionan menos depósitos, eliminando el material depositado de las superficies de intercambio, pero aumentan la erosión de las mismas superficies, al mismo tiempo que aumenta la corrosión de la superficie. Las altas temperaturas propician las reacciones químicas, corrosión y la formación de cristales, pero reduce la formación de microorganismos y previene la congelación y la precipitación de sales de solubilidad normal (Marín & Guillen, 2013)

1.6 Mantenimiento aplicado a Intercambiadores de Calor

Para cualquier equipo de transferencia de calor, el hecho de que trabaje con niveles elevados de incrustaciones o con superficies totalmente obstruidas, puede resultar en paradas de proceso imprevistas, o en su defecto una drástica disminución de las condiciones iniciales de

transferencia de diseño, por lo que una política de mantenimiento en estos equipos redundará en beneficios ulteriores económicos importantes. La finalidad de un mantenimiento radica en la eliminación de los depósitos que obstruyen o imposibilitan la correcta transferencia de calor en los intercambiadores. Las técnicas varían dependiendo del tipo de incrustación y de la configuración de los intercambiadores.

Según (Garrido, 2010), se define el mantenimiento industrial como el conjunto de técnicas destinado a conservar equipos e instalaciones en servicio durante el mayor tiempo posible (buscando la más alta disponibilidad) y con el máximo rendimiento.

Tradicionalmente, se han distinguido cinco tipos de mantenimiento, que se diferencian entre sí por el carácter de las tareas que incluyen (Sacristan, 2002) (Garrido, 2010) (García, 2016) :

Mantenimiento Correctivo: Es el conjunto de tareas destinadas a corregir los defectos que se van presentando en los distintos equipos y que son comunicados al departamento de mantenimiento por los usuarios de los mismos.

Mantenimiento Preventivo: Es el mantenimiento que tiene por misión mantener un nivel de servicio determinado en los equipos, programando las intervenciones de sus puntos vulnerables en el momento más oportuno. Suele tener un carácter sistemático, es decir, se interviene, aunque el equipo no haya dado ningún síntoma de tener un problema.

Mantenimiento Predictivo: Es el que persigue conocer e informar permanentemente del estado y operatividad de las instalaciones mediante el conocimiento de los valores de determinadas variables, representativas de tal estado y operatividad. Para aplicar este mantenimiento, es necesario identificar variables físicas (temperatura, vibración, consumo de energía, etc.) cuya variación sea indicativa de problemas que puedan estar apareciendo en el equipo. Es el tipo de mantenimiento más tecnológico, pues requiere de medios técnicos avanzados, y en ocasiones, de fuertes conocimientos matemáticos, físicos y/o técnicos.

Mantenimiento Cero Horas: Es el conjunto de tareas cuyo objetivo es revisar los equipos a intervalos programados bien antes de que aparezca ningún fallo, bien cuando la fiabilidad del equipo ha disminuido apreciablemente de manera que resulta arriesgado hacer previsiones sobre su capacidad productiva. Dicha revisión consiste en dejar el equipo a Cero horas de funcionamiento, es decir, como si el equipo fuera nuevo. En estas revisiones se sustituyen o se reparan todos los elementos sometidos a desgaste. Se pretende asegurar, con gran probabilidad un tiempo de buen funcionamiento fijado de antemano.

Mantenimiento En Uso: es el mantenimiento básico de un equipo realizado por los usuarios del mismo. Consiste en una serie de tareas elementales (tomas de datos, inspecciones visuales, limpieza, lubricación, reapriete de tornillos) para las que no es necesario una gran formación, sino tan solo un entrenamiento breve.

1.7 Conclusiones Parciales del Capítulo 1

1- Los intercambiadores de calor de placas en espiral son ideales para el calentamiento de fluidos que llevan suciedades, así como para fluidos viscosos, su diseño propicia fácil accesibilidad para inspección y limpieza, requieren más tiempo entre limpiezas que los intercambiadores de tubo y coraza.

2- El ensuciamiento en los intercambiadores de calor es inevitable y se cuantifica mediante el factor de ensuciamiento, el cual va a depender fundamentalmente de la velocidad del fluido y la temperatura de la superficie de intercambio, existen valores típicos reportados en diferentes bibliografías.

3- Para la limpieza de los intercambiadores de placas en espiral los métodos más efectivos son: la limpieza mecánica con agua o vapor de agua a alta presión y la limpieza química con disoluciones ácidas o alcalinas.

4- Para la evaluación del intercambiador se selecciona el método $\varepsilon - NTU$ por ser más sencillo, directo y adecuado para el análisis asistido por computadoras.

Capítulo 2: Materiales y métodos

En este capítulo, se ofrece la metodología que se empleó para evaluar la eficiencia del intercambiador de calor en espiral 6 de la segunda etapa de separación. Además, se establece la caracterización estadística de las variables analizadas en la operación del intercambiador y los diferentes métodos para determinar el tiempo óptimo de limpieza.

2.1 Proceso tecnológico de tratamiento de petróleo crudo de la EPEP Centro

En el Reglamento tecnológico de la Planta de Procesamiento de Crudos, PC-TV/T 0201 versión 12, del 24 de octubre del 2022, se describen cada una de las etapas del proceso de tratamiento que se les aplica a los crudos provenientes de los pozos en producción, de forma tal que se alcancen los índices de calidad requeridos (2 % v/v de agua y sedimentos y 1 500 cSt de viscosidad) para posteriormente enviarlos por el Oleoducto Magistral Varadero - Matanzas hacia la UEB División Territorial de Comercialización de Combustibles de Matanzas (Epep-Centro, 2022).

El tratamiento comienza desde los centros colectores, en esta etapa se separa el petróleo del gas en separadores horizontales de 50, 100 y 200 m³ de capacidad, y el petróleo continúa por los oleoductos hacia la Planta de Procesamiento de Crudo (PPC) y el gas natural por el gasoducto magistral hacia la planta de Ciclo Combinado de Turbinas de Gas de ENERGAS S. A. Antes de la entrada a la Planta, en la Estación de Rebombeo Oeste (ERO), al petróleo extraído de los pozos se le adiciona nafta o destilado medio y sustancia química desemulsionante. La nafta o destilado medio se utiliza como sustancia reductora de viscosidad para garantizar una mejor transportación del crudo e influir positivamente en el tratamiento posterior del mismo. El desemulsionante tiene la propiedad de destruir o neutralizar la acción de las emulsiones, lo que favorece la separación de las fases agua-petróleo. El petróleo contiene una serie de impurezas que es necesario que se eliminen hasta los límites establecidos antes de su comercialización, entre las que se destaca, el agua, las cuales provocan serios problemas de corrosión, deposiciones indeseables y otros efectos que inciden negativamente en la eficiencia de las

instalaciones. En el anexo 1 se muestra el flujo tecnológico. A continuación, se describen las etapas del proceso.

Recepción de crudos

El objetivo de esta etapa es la recepción de los crudos desde los centros colectores en producción, a través de oleoducto y de pozos aislados en producción no instalados a estos centros colectores mediante carros cisternas.

La recepción de los crudos de los pozos aislados mediante carros cisternas se realiza en el descargadero de la Planta de Procesamiento de Crudo (PPC), el cual está equipado de dos piscinas de recepción de 120 m³ de capacidad, comunicadas entre sí. Cuando el nivel de la piscina sobrepasa el nivel de los filtros de la línea de succión de las bombas, se procede al vaciado de la piscina e incorporación de este crudo al oleoducto de entrada a la batería.

- Calentamiento inicial del crudo

El objetivo de esta etapa es incrementar la temperatura del crudo que llega proveniente de las estaciones de bombeo de los centros colectores a temperatura ambiente, entre 32 a 42°C hasta un máximo de 90°C, este valor está sujeto a las condiciones de operación como son, nivel de incrustación, estado técnico de los intercambiadores, inestabilidad del proceso de bombeo en la ERO, entre otras que pueden provocar que en algún momento se excedan estos valores de temperatura. Este proceso de calentamiento garantiza una mejor separación de gas en los Separadores de la Segunda Etapa de Separación (SES) y en tanque 6, así como la continuidad del tratamiento termoquímico sobre la emulsión agua-petróleo, que garantiza una mejor separación del agua en los tanques de tratamiento.

Para el calentamiento del crudo se utiliza vapor proveniente de las calderas, donde las mismas operan con agua tratada en una columna intercambiadora de ciclo sodio.

- Segunda etapa de separación (SES)

El objetivo de esta etapa es lograr una mayor separación de gas acompañante en dos separadores horizontales ubicados a 17 m de altura a la salida de los intercambiadores de calor. Se pondrán en servicio de forma cíclica las balas separadoras por ciclos de trabajo de un mes y cinco meses fuera de servicio trasegando el flujo desde el intercambiador de calor hacia el tanque 6.

La mezcla de gas y líquido entra a los separadores por un extremo donde parte del fluido de la mezcla es separada por la acción de la gravedad, debido a la caída de velocidad, el tiempo de residencia y al proceso de turbulencia controlada a que es sometida la mezcla cuando pasa por

los diferentes elementos mecánicos con que cuentan los separadores. El petróleo separado se dirige por gravedad hacia el tanque 6 aprovechando la carga hidrostática generada por la altura de la columna de petróleo, mientras que el gas es trasegado hacia la planta de ENERGAS S.A., donde se succiona con un compresor de baja presión que está instalado en la planta y se incorpora al proceso de generación de electricidad o se quema directamente en el *flare* de la PPC.

- Trasego hacia Tanque 6

El objetivo de esta etapa es separar la mayor parte del gas que no se separa en la SES. El petróleo entra a tanque 6 por la columna desgasificadora interior central, y sale por un orificio inferior, el gas separado en la columna del tanque asciende hacia el tanque separador de vapores ubicado en el techo del tanque trabajando a bajas presiones, este gas pasa por una línea de 203 mm de diámetro nominal hacia un separador horizontal de arrastre de 25 m³, dejando parte del contenido líquido que contiene, cuando el nivel de crudo en el separador este próximo al 50%, se utiliza algún método alternativo para succionar los condensados y se depositan en la piscina de recepción de crudo.

El gas que pasa por el Separador Horizontal de Arrastre (SHA) del tanque 6, entra al SHA de ENERGAS S.A. que está debajo de las balas y se une a la corriente de gas que se separa en las balas, donde el flujo total es succionado con el compresor de baja que está instalado en la planta de ENERGAS S.A. En caso de que por alguna causa no se pueda succionar este gas entonces pasa a través del SHA del *flare* de la instalación para proceder a su quema. En la línea de salida de gas a la salida del SHA del tanque 6 hay una válvula auto operada desde la planta de ENERGAS S.A. que se mantiene cerrada cuando el compresor de baja está en funcionamiento y se abre cuando por alguna razón el compresor no está funcionando y desvía el flujo de gas hacia el *flare* de la PPC. En el cuarto de control está la señal del estado de la válvula, así como del estado del compresor de ENERGAS S.A..

- Bombeo hacia los tanques de tratamiento

El objetivo de esta etapa es bombear todo el crudo que se recibe en el tanque 6 hacia cualquier parte del proceso en dependencia de las necesidades.

Para el bombeo desde tanque 6 hacia los tanques de tratamiento se dispone de 3 bombas de cavidad progresiva del tipo moyno de 150 m³/h, accionadas a través de variadores de velocidad, que son los encargados de mantener el nivel de la columna de petróleo en el tanque. Se trabaja

con dos bombas en automático regulando la frecuencia en dependencia del nivel del tanque, se mantiene la tercera bomba de reserva.

Cuando el nivel de crudo en el tanque supere los cinco metros, el operador pone en funcionamiento la primera bomba incrementando la velocidad del motor paulatinamente hasta alcanzar la velocidad máxima establecida, si el nivel se incrementa, se pone en funcionamiento la segunda bomba, se mantiene la tercera bomba de reserva.

Si el nivel del tanque baja por debajo del nivel mínimo se activa la alarma y se detienen automáticamente las bombas, si las bombas no paran se procede a parar de forma manual en el panel de los variadores en caso de emergencia se acciona el interruptor del variador en cuestión. Este nivel facilita el tiempo suficiente para que el operador reaccione y realice las operaciones de forma manual. Además, el tanque cuenta con una alarma por alto nivel que se acciona cuando el tanque tiene una columna de 7 m, en este caso el operador revisa y si es necesario desvía el flujo de la SES para otra parte del proceso en coordinación con el jefe de turno y con el operador de recolección y tratamiento de crudo del Cuarto de Control.

- Recepción, calentamiento y reposo en los tanques de tratamiento

El objetivo de la etapa es la culminación del tratamiento para lograr 2 % de BSW para trasegarlo hacia la Estación Cabecera del Oleoducto (ECO).

El crudo se bombea del tanque 6 a los tanques de tratamiento estáticos de 5 000 m³, 10 000 m³ y 20 000 m³, según los tanques en que se esté realizando el tratamiento por condiciones del proceso. Para comenzar el calentamiento es necesario que el nivel de petróleo sobrepase el nivel de los serpentines, entonces se suministra vapor a través de los serpentines para calentar el crudo hasta alcanzar temperaturas entre 75-90°C. Cuando el crudo alcanza esta temperatura, aunque no se haya alcanzado el volumen máximo de llenado de los tanques de tratamiento se regula el vapor o se cierra totalmente, para lograr una temperatura próxima a los 80°C al término del llenado. Aunque si por alguna razón no se alcanza la temperatura de 75-90°C y el Jefe de Turno lo decide se cierra el vapor al tanque.

El agua libre, conjuntamente con el agua liberada producto de la ruptura de la emulsión agua-petróleo, sufre un proceso de decantación durante el llenado de los tanques que se completa durante el reposo de los mismos. Esa agua, depositada en el fondo de los tanques, es drenada por gravedad hacia el sistema de residuales de la instalación, esta operación se realiza una vez

concluido el llenado de los tanques o simultáneamente con el llenado una vez que se halla cerrado el vapor.

Una vez que se da por concluido el llenado de un tanque y que previamente se haya cerrado el vapor, este se deja en reposo hasta que alcance 2% de BSW requerido para trasegarlo hacia la ECO.

- Trasego hacia la Estación Cabecera del Oleoducto

El petróleo en calidad que se encuentra en los tanques de tratamiento es bombeado hacia los tanques de la estación cabecera donde es almacenado para su posterior venta por el oleoducto hacia Matanzas. El Jefe de Turno, en coordinación con los Tecnólogos A de Procesos Industriales (EP) de las áreas de tratamiento y venta, decide si es necesario trasegar crudo con BSW mayor de 2%.

2.2 Descripción detallada del caso de estudio

El calentamiento inicial del crudo se logra con dos intercambiadores de calor en espiral instalados en una base de hormigón para incrementar la temperatura del crudo, con sensores de presión y temperatura común a la entrada de los mismos, sensores de temperatura, termómetros, manómetro y/o trasmisor de presión independientes a la salida de petróleo de estos. La entrada de vapor a los intercambiadores está provista de un lazo de control cada uno para el control de la temperatura de salida del intercambiador, además se puede regular de forma manual desde el Cuarto de Control. El colector de entrada de petróleo está provisto de un bypass de 508 mm de diámetro nominal, para operarlo de forma manual en caso de ser necesario ante un incremento de presión o por condiciones operacionales, así como un lazo de control automático de 152 mm de diámetro nominal fijado a una presión entre 0,1 y 0,8 MPa, según las condiciones de operación con una válvula neumática que se abre cuando la presión de trabajo se iguala a la presión fijada y dos válvulas mecánicas. Además, para proteger los intercambiadores de una sobre presión por encima de la presión de trabajo existe una válvula neumática en el oleoducto de entrada de 609,6 mm de diámetro nominal fijada a una presión máxima hasta 1,0 MPa, que comunica el oleoducto de entrada con el tanque 6.

Ha sido instalado un tercer intercambiador de calor (Intercambiador 6) en la misma área donde se encuentran instalados los Intercambiadores 4 y 5. Desde junio del 2022 trabajan los intercambiadores 4 y 6 en paralelo (ver anexo 2).

- Descripción del Intercambiador de Calor 6

En octubre del 2019 la Empresa adquiere un Intercambiador de calor espiral Tipo 3, en posición horizontal, de tipo condensador, con un canal caliente y un canal frío doble y con un centro de tipo tubular (3H-C-2T). Según el manual de instalación, funcionamiento y mantenimiento del intercambiador de calor espiral (AlfaLaval, Manual de instalación, funcionamiento y mantenimiento Intercambiador de calor espiral, 2016), proporcionado por el fabricante Alfa Laval AB, esta unidad es usada especialmente para fluidos cargados de sólidos donde se requiere intercambiadores que funcionen en posición horizontal para reducir los riesgos de colmatación. Una extensión cilíndrica se monta en el lateral abierto del canal de vapor. Esta extensión viene equipada de un cerramiento central horizontal, prolongado por un peine que penetra en las espiras del cuerpo hasta aproximadamente dos tercios de su longitud. El vapor accede a la parte superior del lateral con cerramiento y es obligado a recorrer toda la zona superior del cuerpo en espiral. El fluido refrigerante entra por el canal exterior y circula en espiral hacia el centro del aparato, de donde sale por la tubuladura central. El equipo ha sido diseñado para funcionar en condiciones de uso continuo y estable, sus circuitos son autodesgaseables mediante las tubuladuras de entrada y de salida situadas en la tapa. El intercambiador viene equipado con una válvula ½" NPT B3 (o DN25 previo pedido), y de una tubuladura A2 para la fase de vaciado total de las espiras, a continuación, se detallan datos técnicos del mismo:

Tipo: 3H-C-2T

Código: ASME

Flujo de vapor: 13 m³/h

Flujo de petróleo: 250 m³/h

Área de transferencia de calor: 295 m²

Diámetro exterior: 1,98 m

Presión de diseño: 1,0 MPa

Temperatura de trabajo: 30-90°C

Coefficiente global de transferencia para condiciones de limpieza: 261,2 W/m² K

Coefficiente global de transferencia para condiciones de servicio: 249,3 W/m² K

Caída de presión: 4 barg

Fecha de fabricación: 2019

La ficha técnica del intercambiador se muestra en el Anexo 3

El objeto de estudio de esta investigación es estimar el tiempo óptimo de limpieza para el intercambiador de calor 6, ubicado en la Segunda Etapa de Separación de la Planta de Procesamiento de Crudos, a partir de su puesta en marcha el 1ero de junio del 2020 y teniendo en cuenta que a partir de junio del 2022 se pone a trabajar en paralelo con el Intercambiador 4. El crudo proveniente de las estaciones de Rebombado de los Centros Colectores (ERO y ERE) llega a los intercambiadores de calor de placas en espiral como un crudo único.

2.3 Metodología empleada para el tratamiento estadístico

Para el procesamiento de datos fueron seleccionados los períodos en los que el intercambiador de calor estuvo trabajando de forma continua, de esta forma fueron seleccionados los meses de junio, julio, agosto y diciembre del 2020, enero, febrero y marzo del 2021 y julio, agosto y septiembre del 2022.

El tratamiento estadístico se realiza con los datos recopilados a través del sistema supervisor instalado en la planta de procesamiento de crudos, que registra los valores de las variables de operación minuto a minuto (1 440 registros/día). Los datos se analizan a través de los estadígrafos: media, desviación estándar y coeficiente de variación. Además, se realizan cartas de control de media a las variables estudiadas. Estos definen estadísticamente el funcionamiento normal del proceso para detectar desviaciones significativas en la operación.

2.3.1 Media de la muestra

La media de la muestra se determina a través de la siguiente ecuación:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (2.1)$$

Donde:

x_i : Valor de la variable x en la medición i

n : Tamaño de la muestra.

2.3.2 Desviación estándar

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (2.2)$$

Donde:

\bar{x} : Valor medio de la variable X para n mediciones

Aunque la desviación estándar proporciona una medida de la dispersión de un conjunto de resultados alrededor del valor medio, no indica la forma de la distribución. Esta puede apreciarse fácilmente mediante un histograma; cuando es normal se muestran las medidas distribuidas de forma casi simétrica en torno a la media, con las medidas agrupadas hacia el centro (Miller & Miller, 2002)

2.3.3 Coeficiente de variación

El coeficiente de variación (CV) es otra medida de la variabilidad extensamente utilizada, también conocido como la desviación estándar relativa (DER). Se recomienda que sea menor que un 12%. Está definida por la siguiente ecuación:

$$CV = \frac{s}{\bar{x}} \cdot 100 \quad (2.3)$$

2.4 Metodología para la evaluación del SHE 6

Para la evaluación se utiliza el método que relaciona la eficiencia del lado frío con el Número de Unidades de Transferencia ($\epsilon - NTU$) (Incropera, 2011)

- La ecuación 2.4 relaciona las capacidades calóricas:

$$C^* = \frac{C_{min}}{C_{max}} \quad (0 \leq C^* \leq 1) \quad (2.4)$$

- La ecuación 2.5 muestra la eficiencia del calor intercambiado:

$$\epsilon = \frac{Q}{Q_{max}} \quad (0 \leq \epsilon \leq 1) \quad (2.5)$$

Esta es la relación del calor real transferido y el calor máximo que podría ser transferido si el intercambiador fuera en contracorriente.

- Número de Unidades de Transferencia, NTU según la ecuación 2.6 se calcula:

$$NTU \equiv \frac{UA}{C_{min}} \quad (2.6)$$

El número de unidades de transferencia es una medida del tamaño del intercambiador.

El calor transferido real se determina mediante el balance de entalpías. Por tanto, si:

$$C_h > C_c \text{ entonces } (T_1 - T_2) < (t_2 - t_1)$$

y si:

$$C_c > C_h \text{ entonces } (t_2 - t_1) < (T_1 - T_2)$$

C_c Capacidad calórica del fluido frío

C_h Capacidad calórica del fluido caliente

El fluido que puede experimentar el cambio de temperatura máximo ($T_1 - t_1$) es el fluido que tiene una capacidad calórica mínima. Entonces, el calor transferido máximo puede expresarse como:

$$Q_{max} = C_c(T_1 - t_1) \text{ si } (C_c < C_h) \quad (2.7)$$

o

$$Q_{max} = C_h(T_1 - t_1) \text{ si } (C_h < C_c) \quad (2.8)$$

Entonces, según la ecuación 2.9 la eficiencia de un intercambiador puede ser escrita como:

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_{max}} = \frac{C_h(T_1 - T_2)}{C_{min}(T_1 - t_1)} = \frac{C_c(t_2 - t_1)}{C_{min}(T_1 - t_1)} \quad (2.9)$$

Observe que los valores de ε estarán en el rango de cero a la unidad y que para un valor conocido de ε y $q_{m\acute{a}x}$, el calor real transferido puede ser calculado como se muestra en la ecuación 2.10:

$$Q = \varepsilon C_{min}(T_1 - t_1) \quad (2.10)$$

Siendo $\varepsilon = f(C^*, NTU, \text{disposición de flujos})$.

Cada tipo de intercambiador tiene su propia relación de eficiencia y NTU. Las ecuaciones de $\varepsilon = f(NTU)$ están disponibles el Anexo 4.

Como se trata de una evaluación, es posible determinar el Número de Unidades de Transferencia (NTU) correspondiente a estos intercambiadores a través de la ecuación 2.11:

$$NTU \equiv \frac{UA}{C_{min}} \quad (2.11)$$

Por otra parte, la ecuación utilizada para determinar la eficiencia es la 2.12 que corresponde a los intercambiadores de calor con cambio de fase ($C^* = 0$).

$$\varepsilon = 1 - \exp(-NTU) \quad (2.12)$$

2.4.1 Determinación de las propiedades físicas del petróleo

Las propiedades físico-químicas reales del petróleo crudo deben ser determinadas por modelos matemáticos que dependen de la temperatura, debido a que estas varían al calentarse el crudo. Se debe tener en cuenta que este flujo no está compuesto por un fluido homogéneo, sino por la mezcla de: petróleo pesado, agua libre y emulsionada, gas libre y disuelto y sedimentos inorgánicos en suspensión.

Las propiedades físicas del petróleo, se calculan a partir de las ecuaciones siguientes definidas por modelos matemáticos, aplicables a las mezclas de petróleo crudo sometidas a tratamiento termofísico del Yacimiento Varadero obtenidas por (Herrera, 2022)

$$\rho_p = \frac{1}{(0,00102602+8,85851 \cdot 10^{-7}T)} \quad (2.13)$$

$$c_{P_p} = 1,26062 + 0,00395495T \quad (2.14)$$

Donde:

ρ_p : es la densidad del petróleo, kg/m³

c_{P_p} : es el calor específico del petróleo, kJ/kgK

T : es la temperatura media del petróleo, °C

Se determina por la ecuación $T = \frac{T_s+T_e}{2}$

Siendo T_e y T_s las temperaturas de entrada y salida del petróleo crudo respectivamente.

2.4.2 Determinación del flujo de petróleo real que circula por el intercambiador de calor

Con el objetivo de mantener la temperatura de salida del petróleo, parte del fluido de producción no entra al SHE 6 y deja de ser calentado. Esto puede ocurrir cuando, provocado por las incrustaciones y las posibles obstrucciones, se crea una contrapresión a la entrada del intercambiador y hace que se abra la válvula neumática.

Como resultado de este inconveniente se hace imposible evaluar el rendimiento de los equipos a causa del desconocimiento del flujo real que pasa por el desvío.

Para el cálculo se utilizan los partes de producción de petróleo bombeado por la ERO y la ERE, que representa la cantidad de petróleo que llega a la planta, en el período de estudio. La figura

1 representa el esquema del intercambiador de calor y el punto de mezcla donde se realizan los balances de masa y energía.

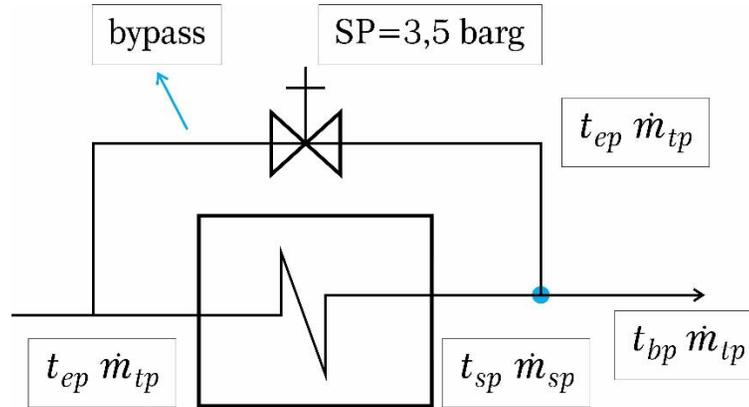


Figura 2.1: Esquema del intercambiador de calor 6. Fuente: Elaboración propia

Donde:

SP: Valor de presión fijado para la apertura de la válvula del bypass, barg

t_{ep} : temperatura de entrada del petróleo al intercambiador de calor, °C.

t_{sp} : temperatura de salida del petróleo al intercambiador de calor, °C.

t_{bp} : temperatura a la salida del punto de mezcla, °C.

\dot{m}_{tp} : Flujo total que llega a la planta de procesamiento de crudo, kg/s.

\dot{m}_{sp} : Flujo que pasa por el intercambiador de calor, kg/s.

\dot{m}_{bp} : Flujo que pasa por el desvío, kg/s.

Se aplica el balance de masa y de energía en el punto de mezcla a la salida del intercambiador (señalado en azul en la figura 1), como se muestra en las ecuaciones 2.15 y 2.16:

$$\dot{m}_{sp} + \dot{m}_{bp} = \dot{m}_{tp} \quad (2.15)$$

$$\dot{m}_{sp}c_{ps}t_{sp} + \dot{m}_{bp}c_{pe}t_{ep} = \dot{m}_{tp}c_{pt}t_{bp} \quad (2.16)$$

Sustituyendo \dot{m}_{bp} de (2.15) en (2.16) se obtiene la ecuación 2.17:

$$\dot{m}_{sp} = \frac{\dot{m}_{tp}(c_{pt}t_{bp} - c_{pe}t_{ep})}{(c_{ps}t_{sp} - c_{pe}t_{ep})} \quad (2.17)$$

Teniendo el resultado de la ecuación (2.17) se puede determinar el flujo de petróleo que pasa por el intercambiador (q_{sp}), el flujo total de petróleo que llega a la planta, \dot{m}_{tp} , se determina como se muestra en la ecuación 2.18:

$$\dot{m}_{tp} = \rho_p q_{tp} \quad (2.18)$$

Donde:

ρ_p : es la densidad del petróleo a la temperatura de entrada a la planta, kg/m³

q_{tp} : es el flujo de petróleo que entra a la planta, m³/s

El flujo de petróleo que entra a la planta se calcula según muestra la ecuación 2.19

$$q_{tp} = q_p^{ERO} + q_p^{ERE} \quad (2.19)$$

Donde:

q_p^{ERO} : es el flujo de petróleo que llega de la ERO, m³/s

q_p^{ERE} : es el flujo de petróleo que llega de la ERE, m³/s

2.4.3 Cálculo de la caída de presión

La caída de presión es una importante restricción en el diseño de intercambiadores de calor compactos. Se calcula de forma empírica con los valores obtenidos de las mediciones a la entrada y salida de ellos, por la ecuación:

$$\Delta P = P_e - P_s \quad (2.20)$$

Donde,

P_e : es la presión a la entrada del intercambiador, barg

P_s : es la presión a la salida del intercambiador, barg

2.4.4 Metodología empleada para pronosticar el tiempo de limpieza para el intercambiador de calor

Existen diversos métodos para determinar el tiempo óptimo de limpieza, entre los cuales se destacan: Método de pronóstico analítico, método del parámetro generalizado (PARGEN), método del gradiente, método de BocksWilson y el método probabilístico.

El método analítico basado en el índice de pronóstico (A) es uno de los más usados, el cual tiene la característica de indicar el grado de degradación del equipo, este método tiene la ventaja, en comparación con otros, que en él las expresiones tienen significado físico. Cuando el equipo está nuevo, A toma el mayor valor que es la unidad, en la medida que el tiempo transcurre aumenta la degradación del equipo, y el valor de A se reduce en el tiempo (Ávila & Ruano, 2000).

El índice de pronóstico para la degradación del equipo se determina por:

$$A = 1 - DIF \quad (2.21)$$

DIF - Relación adimensional de la variable de pronóstico

Para intercambiadores de calor el parámetro A puede ser calculado de las siguientes formas:

- En función del Coeficiente Global de transferencia de calor

$$A = 1 - \frac{(U_{diseño} - U)}{U_{diseño}} \quad (2.22)$$

- En función de la caída de presión en el equipo

$$A = 1 - \frac{(\Delta P - \Delta P_{diseño})}{\Delta P_{diseño}} \quad (2.23)$$

El factor A límite será fijado por el valor mínimo permisible para la operación del intercambiador de calor. En el Anexo 9 se muestra un gráfico de cómo se determina el tiempo óptimo de limpieza mediante el método del parámetro A.

En el desarrollo de este caso de estudio se determina el parámetro A en función de los coeficientes globales de transferencia de calor, pues la caída de presión en el intercambiador está sujeta a la presión de descarga de las bombas de la ERO y a la carga hidráulica que se alcance en las balas o en tanque 6 de la Segunda Etapa de Separación.

Capítulo 3: Resultados y discusión

En este capítulo se ofrecen los resultados del cálculo de los parámetros que definen la transferencia de calor cuyo objetivo es describir cómo se comporta la operación del intercambiador de calor 6 de la segunda etapa de separación de la planta de procesamiento de crudo.

3.1 Resultado y análisis de la evaluación estadística de la operación actual del intercambiador de calor

Los parámetros medidos que se obtienen del sistema supervisor instalado en la PPC para evaluar al intercambiador de calor son: presión de entrada del petróleo (Pep), presión de salida del petróleo (Psp), temperatura de entrada del petróleo (tep), temperatura de salida del petróleo (tsp) y temperatura del vapor (Tv). Los resultados que se muestran en la tabla 3.1 reflejan un mes de trabajo por año, se muestran meses fríos y cálidos, reflejando la operación con las temperaturas ambiente extremas (diciembre 2020, enero 2021 y julio 2022), el resto de los resultados se muestran en el anexo 5, donde se reflejan las mediciones promedio diarias.

Tabla 3.1 Análisis estadístico de las variables medidas para utilizar en el procedimiento de cálculo

Año	Parámetros Estadísticos	Pep	Psp	tep	tsp	Tv
Dic-2020	Media	5,21	1,44	34,81	74,12	170,37
	Desviación Estándar	0,61	0,11	0,79	4,96	4,76
	Coefficiente de variación	11,64%	7,83%	2,25%	6,69%	2,79%
Ene-2021	Media	5,49	1,44	34,45	71,51	168,58
	Desviación Estándar	0,62	0,09	0,81	4,09	4,89
	Coefficiente de variación	11,20%	6,17%	2,33%	5,73%	2,90%
Jul-2022	Media	3,36	0,60	39,20	75,14	171,11
	Desviación Estándar	0,17	0,05	0,94	4,21	5,39
	Coefficiente de variación	5,19%	8,62%	2,39%	5,65%	3,17%

Fuente: Elaboración propia

En los 799 días analizados se puede observar que el coeficiente de variación alrededor de la media se comporta según la tabla 3.2, se obtiene para la temperatura de salida que el 99,25% mantiene un coeficiente de variación por debajo del 12%, esto se debe a que existe un lazo de control automático que regula el flujo de vapor para mantener la temperatura fijada.

En el caso de la presión de entrada de petróleo al intercambiador de calor el 7,26% de los coeficientes de variación se encuentran por encima del 12%, siendo la variable más afectada, lo cual se debe a que este parámetro depende en gran medida de la presión con que se trasiega el petróleo desde la ERE y la ERO y por la presión fijada en la válvula de control automática de petróleo.

Tabla 3.2 Comportamiento del coeficiente de variación

Coeficiente de variación	Pep	Psp	tep	tsp	Tv
> 12%	58	24	0	6	2
	7,26%	3,00%	0,00%	0,75%	0,25%
4-12%	726	757	534	731	587
	90,86%	94,74%	66,83%	91,49%	73,47%
0-4%	15	18	265	62	210
	1,88%	2,25%	33,17%	7,76%	26,28%
Total Registros	799	799	799	799	799

Fuente: Elaboración propia

Con el empleo de histogramas de frecuencia, confeccionados con el *software* Statgraphics Plus v.5.0 y graficados en el anexo 6, se lograron identificar los conglomerados de valores más altos, indicadores de datos inusuales, como datos asimétricos y valores atípicos, aunque en la mayoría de los casos se identificó una distribución normal, fueron investigadas las causas de los valores inusuales y se consideró eliminar los valores de datos asociados con eventos anormales únicos.

3.1.1 Análisis de las desviaciones significativas de los parámetros

Se realizaron cartas de control a las variables reflejadas en la tabla 3.2 en todos los meses analizados con el objetivo de determinar si existen desviaciones significativas de los parámetros de diseño (Anexo 7). En la figura 3.1, se muestran los gráficos de control correspondientes a la presión de entrada en los meses de agosto y diciembre del 2020, ya que el comportamiento es prácticamente el mismo para el resto de los años.

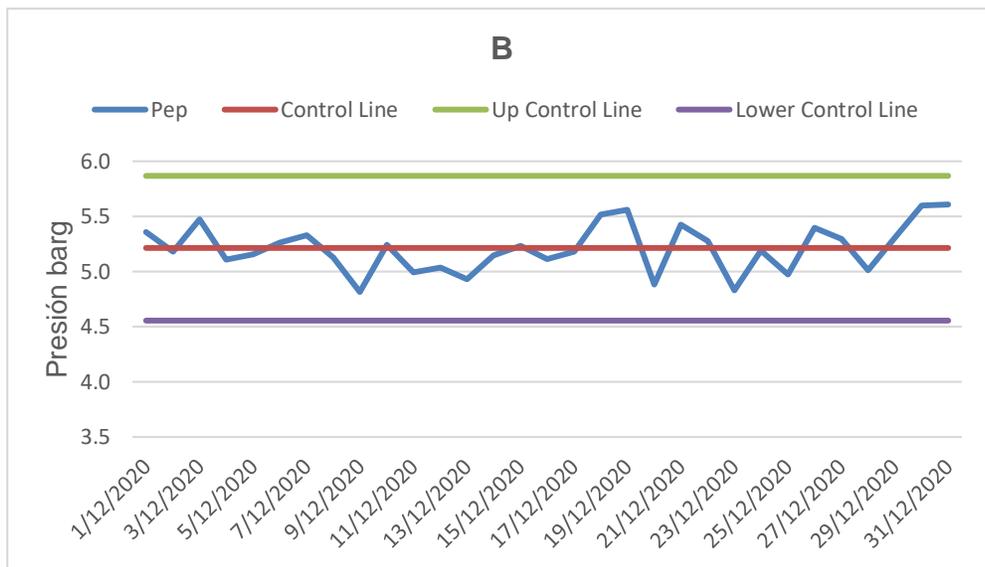
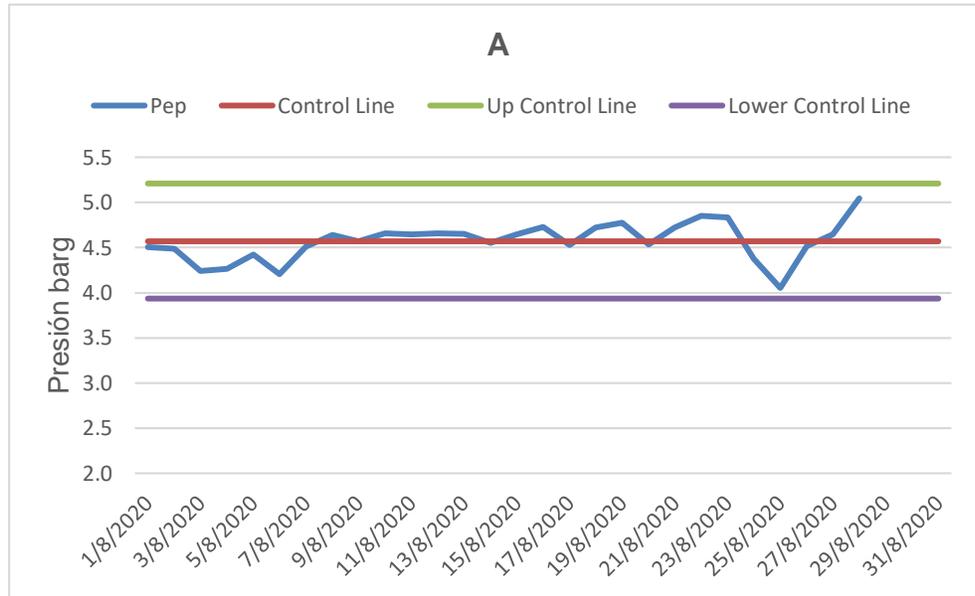


Figura 3.1: Cartas de control para la presión de entrada del petróleo para los meses de agosto (A) y diciembre (B) del 2020. Fuente: Elaboración propia

Para el análisis de los gráficos de control se tuvo en cuenta la oscilación aleatoria de los parámetros analizados, la tendencia de los parámetros superior e inferior (puntos consecutivos por encima o por debajo de la media), tendencia creciente o decreciente de los parámetros (puntos consecutivos aumentando o disminuyendo de manera constante) y puntos fuera de rango, en la tabla 3.3 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 3.3: Resultados de las cartas de control analizadas

Año	Meses analizados	Cartas de Control	Parámetros analizados			
			Pep	Psp	tsp	Tv
2020	Junio	Media	BC	⊗	BC	BC
	Julio	Media	BC	⊗	PF	PF
	Agosto	Media	BC	BC	BC	BC
	Diciembre	Media	BC	PF	BC	BC
2021	Enero	Media	BC	BC	BC	BC
	Febrero	Media	BC	BC	BC	BC
	Marzo	Media	⊗	BC	BC	⊗
2022	Julio	Media	BC	BC	⊗	BC
	Agosto	Media	⊗	BC	BC	BC
	Septiembre	Media	BC	PF	BC	⊗

Fuente: Elaboración propia

Donde:

⊗: Más de cinco puntos consecutivos en un mismo lado

PF: Puntos fuera de rango

BC: Bajo control estadístico

Como se observa en la tabla 3.3 la mayoría de los parámetros se encuentran bajo control estadístico, las afectaciones que existen pueden estar relacionadas con problemas operacionales, fallos de corriente en la planta, errores en el canal de transmisión de datos y fallos en el sensor del instrumento.

La presión de entrada de petróleo al intercambiador de calor, por ejemplo, se ha visto afectada por inestabilidad del bombeo desde los centros colectores, ya sea por problemas operacionales o por fallos de corriente. En la ERO al no existir grupo electrógeno cualquier fallo de corriente inactiva la transportación del fluido, lo cual provoca la disminución brusca de la presión a la entrada de los intercambiadores. Por otra parte, la temperatura de salida del petróleo depende del suministro de vapor con que se cuente en ese momento, que está sujeto a su vez del suministro de gas dulce desde la Planta de Ciclo Combinado de ENERGAS S.A. Varadero; así como del nivel de ensuciamiento que pueda tener el intercambiador de calor.

3.2 Resultados y análisis de la evaluación del intercambiador de calor 6 en espiral de la segunda etapa de separación

La evaluación del intercambiador de calor en espiral 6 se lleva a cabo a través del método de la eficiencia y el número de unidades de transmisión de calor (ε - NTU). Para eso se necesitan las propiedades físicas reales del petróleo crudo y el flujo real que circula por el interior de estos. Los cálculos siguientes son el resultado del análisis de los datos tomados en un día de trabajo. El resto de los resultados se encuentran reflejados en forma de gráfica en el documento.

3.2.1. Determinación de las propiedades físicas del petróleo

Las propiedades físicas del petróleo (densidad y calor específico) se calculan a partir de las ecuaciones definidas en el Capítulo 2. En la tabla 3.4 se muestra el resultado

Tabla 3.4: Propiedades física del petróleo

Propiedad	Valor	Ecuación
$\rho_p (kg/m^3)$	944,60	$\rho_p = \frac{1}{(0,00102602 + 8,85851 \cdot 10^{-7}T)}$
$c_{P_p} (kJ/kgK)$	1,41	$c_{P_p} = 1,26062 + 0,00395495T$

Fuente: Elaboración propia

3.2.2. Determinación del flujo real de petróleo que circula por el interior del intercambiador de calor

El flujo real de petróleo que circula por el intercambiador de calor se determina mediante los balances de masa y energía en el punto mezcla. A continuación, se muestran los resultados obtenidos en la tabla 3.5.

Tabla 3.5: Resultados del cálculo del flujo de petróleo

Propiedad	Valor	Ecuación
$q_{tp} (m^3/d)$	4 271	$q_{tp} = q_p^{ERO} + q_p^{ERE}$
$q_{sp} (m^3/d)$	3 995	$\dot{m}_{sp} = \frac{\dot{m}_{tp}(c_{pt}t_{bp} - c_{pe}t_{ep})}{(c_{ps}t_{sp} - c_{pe}t_{ep})}$; $q_{sp} = \frac{\dot{m}_{sp}}{\rho_p}$

Fuente: Elaboración propia

3.2.3. Cálculo de la eficiencia y el número de unidades de transferencia (NTU)

Tabla 3.6: Resultados de la evaluación del intercambiador de calor

Propiedad	Valor	Ecuación
$Q(W)$	3 098 500	$Q = C_{pp}(T_{sp} - T_{ep})$
$Q_{m\acute{a}x}(W)$	8 759 512	$Q_{max} = C_{pp}(T_v - T_{ep})$
ε	0,35	$\varepsilon = \frac{Q}{Q_{max}}$
NTU	0,44	$NTU = -Ln(1 - \varepsilon)$
$U_{exp} (W/m^2K)$	105,64	$NTU = \frac{UA}{C_{min}}$

Fuente: Elaboración propia

3.2.4. Cálculo de la caída de presión

El análisis de la caída de presión se realiza de manera empírica con los valores obtenidos de las mediciones a la entrada y salida de los intercambiadores de calor.

$$\Delta P = P_{ep} - P_{sp} = 4,6 - 1,4 = 3,3 \text{ barg}$$

Donde:

Pep: Presión de entrada al intercambiador de calor, barg

Psp: Presión de salida del intercambiador de calor, barg

3.2.5. Resultados del análisis de la caída de presión

Se aprecia en el año 2020, figura 3.2, cómo el intercambiador de calor inicia su operación con una caída de presión por debajo de la caída de presión de diseño, oscilando entre 2,7 y 4,0 barg. En el año 2021 se observan valores entre 3,3 y 4,6 barg ligeramente superior a la caída de presión recomendada por el fabricante para este tipo de intercambiador de calor (4 barg). En el 2022 se aprecia como la caída de presión disminuye a valores entre 2,4 y 2,9 barg lo cual se corresponde con tres aspectos fundamentalmente, primero con la decisión de poner a operar al intercambiador 6 en paralelo con el intercambiador 4, en segundo lugar se cambia la presión

fijada en la válvula de control automática de petróleo que mantiene la presión constante en el colector de succión de un rango de 4 a 5 barg a 3,5 barg y en tercer lugar se redirecciona el flujo de crudo directamente hacia el tanque 6, eliminando su tránsito por las balas de la SES, éstas últimas imponían una presión de salida de 1,6 barg.

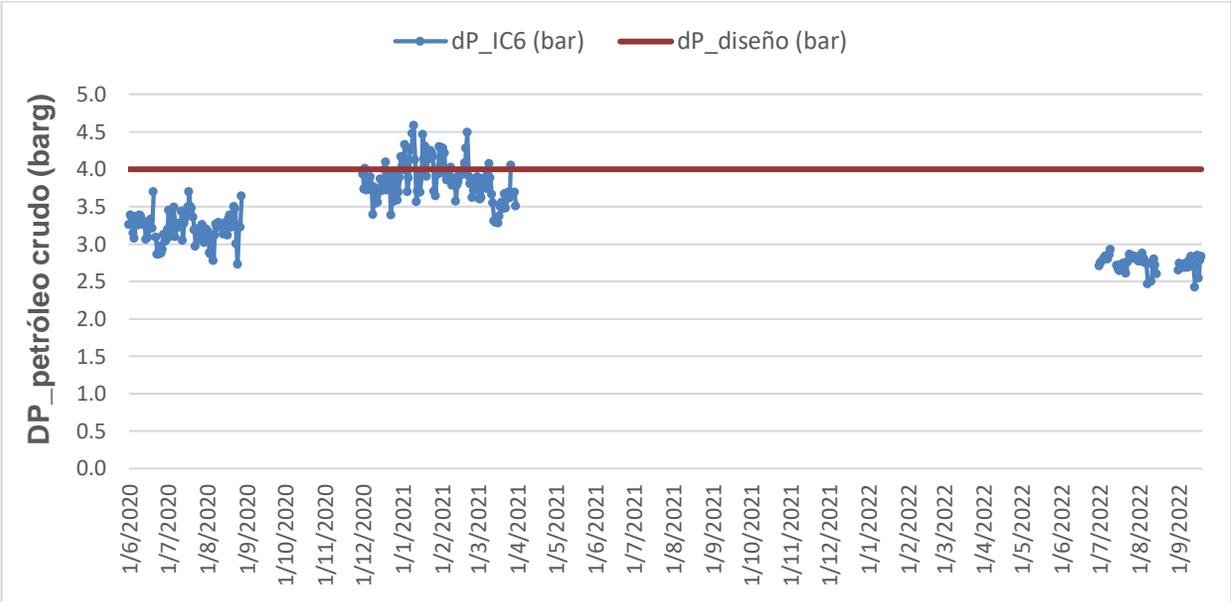


Figura 3.2: Caída de presión en el intercambiador de calor 6 desde el 2020 hasta septiembre del 2022. Fuente: Elaboración propia

En comparación con los resultados obtenidos por (Cofiño, 2019) , figura 3.3, tenemos que a diferencia del 2019, en el intercambiador 6, la caída de presión se mantuvo prácticamente todo el tiempo por debajo de la presión de diseño, esto se debe a que hubo una disminución del valor de presión fijado para la apertura de la válvula del bypass de 7- 8 barg a valores entre 6,8 -7 barg en la válvula de control automática de petróleo, se logra una mayor estabilidad en el proceso tecnológico y menores aperturas de la válvula de regulación.

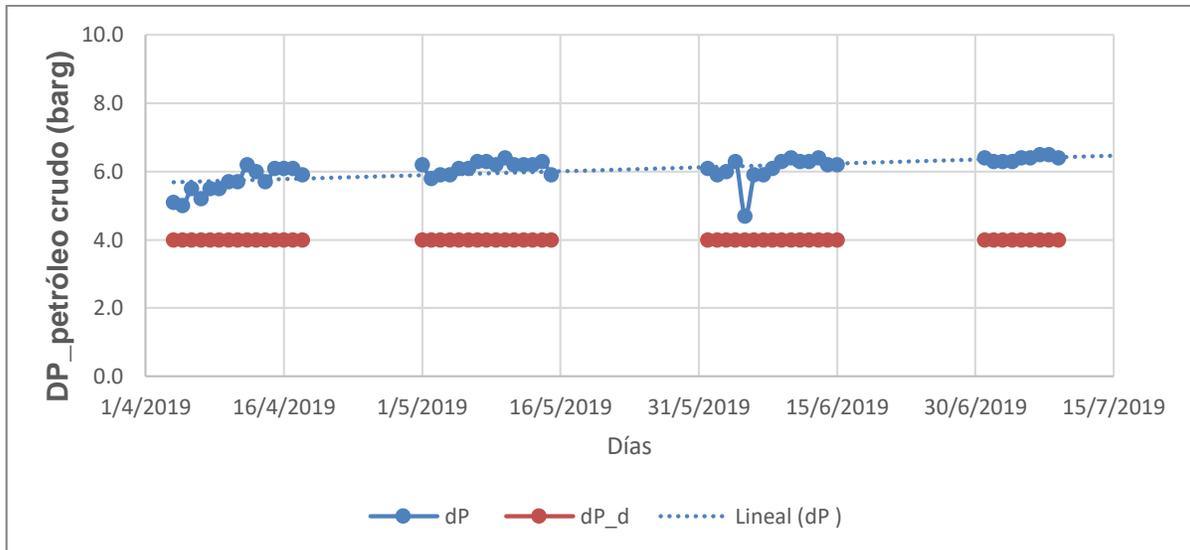


Figura 3.3: Caída de presión en el intercambiador de calor 4, tres meses después de ponerlo en servicio. Fuente: (Cofiño, 2019)

3.2.6. Resultados del análisis del flujo de petróleo que entra al intercambiador

En la figura 3.4 se observa como prácticamente se superponen las líneas azul y marrón, teniendo en cuenta que la línea azul es el crudo proveniente de las estaciones de rebombeo este y oeste y la línea marrón es la porción de este flujo que pasa por el intercambiador de calor nos damos cuenta que prácticamente todo el crudo pasa por el intercambiador, lo que significa que en el período analizado solamente en casos muy puntuales la presión del petróleo a la entrada del Intercambiador de calor se iguala a la presión fijada para que automáticamente se accione la válvula de petróleo del *bypass*. Por otra parte, se evidencia que el flujo de crudo se mantiene sobre los 177,42 m³/h durante los años 2020 y 2021. Para el año 2022 el intercambiador 6 opera en paralelo con el intercambiador de Calor 4 por lo que solamente asimila la mitad del flujo que calentaba en años anteriores es por eso que se observa una disminución del flujo marcada para este año.

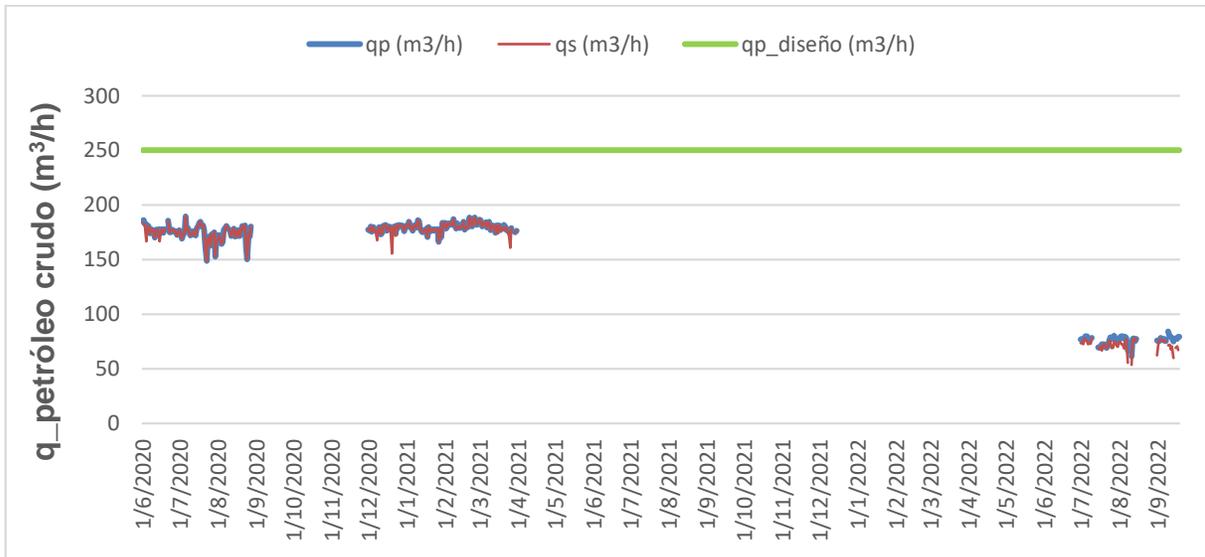


Figura 3.4: Flujo de petróleo que entra y sale del intercambiador de calor 6 años 2020, 2021 y 2022.

Fuente: Elaboración propia

Comparándolo con el intercambiador de Calor 4 en el 2019, figura 3.5, el flujo en el intercambiador de Calor 6 es ligeramente superior durante los años 2020 y 2021 y el flujo que pasa por el bypass es mucho menor, resultado lógico teniendo en cuenta que al bajar la presión fijada se logra aumentar la estabilidad en todo el esquema y menores aperturas de la válvula de regulación de la presión en el colector de entrada. También es válido señalar que la puesta en marcha del intercambiador de Calor 6 se lleva a cabo con la experiencia adquirida con el intercambiador de Calor 4.

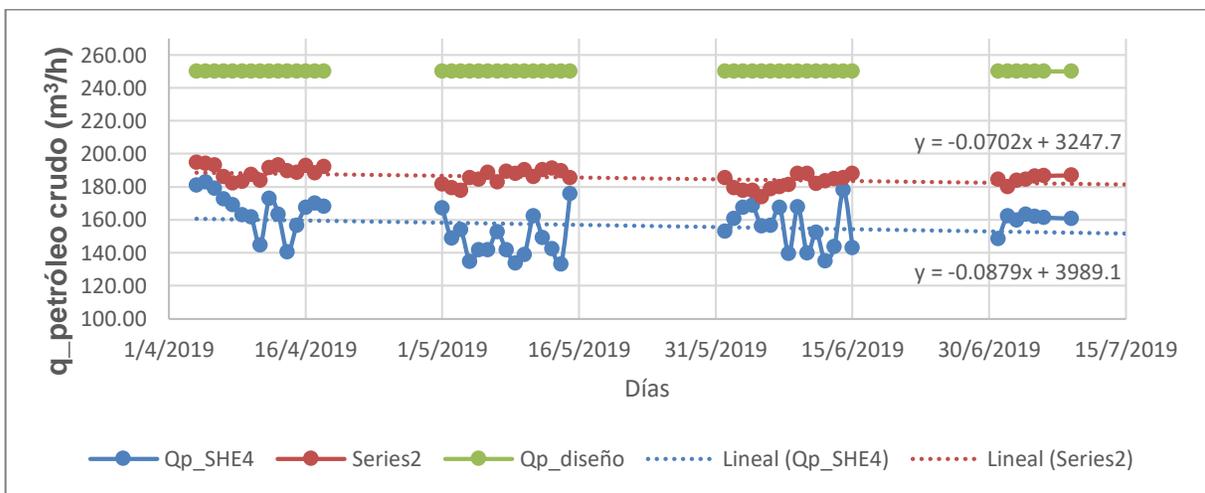


Figura 3.5: Flujo de petróleo que entra al intercambiador de calor 4 tres meses después de puesto en servicio. Fuente: (Cofiño, 2019)

En la gráfica 3.6 se muestra la fracción del flujo total que no pasa por el intercambiador de calor 6, o lo que es lo mismo el porcentaje de petróleo que se va por el *bypass*. Se observa que durante los años 2020 y 2021 este porcentaje no es significativo, solamente en determinados días se acciona la válvula de petróleo del *bypass*. Sin embargo, en el 2022 hay un incremento de la periodicidad en que se activa la válvula y del porcentaje, el autor infiere que puede estar dado por inestabilidades en el bombeo desde la ERO.

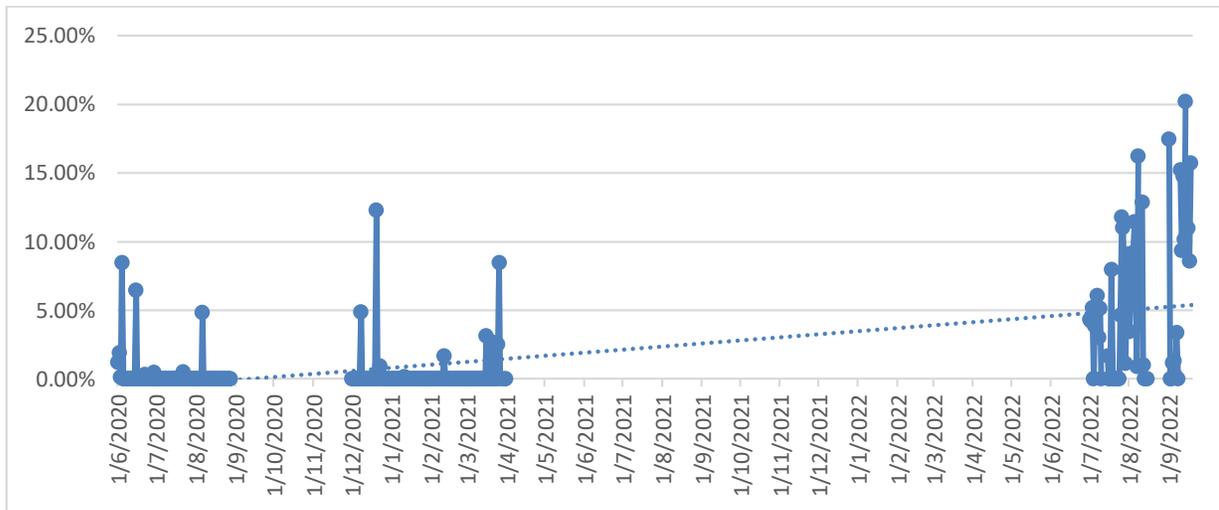


Figura 3.6: Diferencia porcentual relativa entre el flujo que entra al intercambiador de calor 6 y el flujo total que llega a la PPC. Fuente: Elaboración propia

3.2.7. Resultados del análisis de la temperatura del petróleo que sale del intercambiador

En la Figura 3.7 se muestra el comportamiento de la temperatura de salida del intercambiador después de entrar en operación (línea azul) y la temperatura a la que debería salir si no pasara flujo por el *bypass* (línea marrón). Se toma como referencia la temperatura a la que debe salir el petróleo por diseño (90°C, línea verde).

Durante el período en que opera el intercambiador de calor 6 en el 2020 la temperatura de salida promedio es de 85,84°C, para el 2021 la temperatura de salida promedio disminuye a 77,46°C, aunque para el 2022 se observa que aumenta la temperatura de salida promedio a 80,13°C.

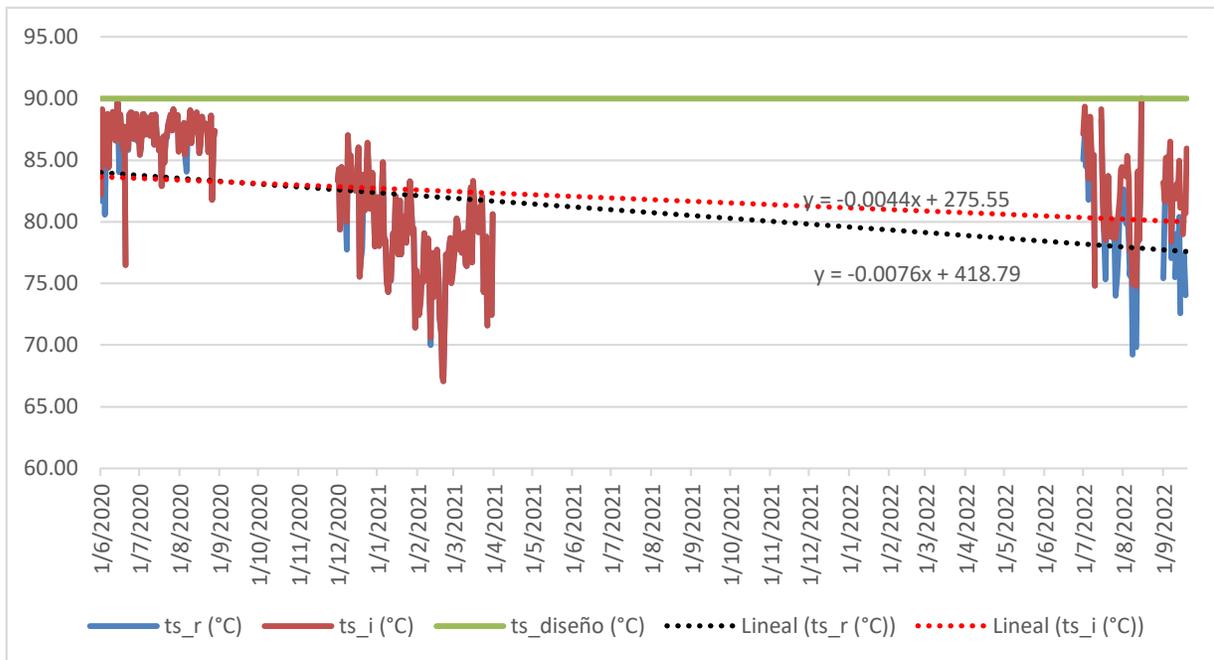


Figura 3.7: Temperatura del petróleo que sale del intercambiador de calor. Fuente: Elaboración propia

Haciendo una comparación con la operación del intercambiador de calor 4 en el 2019, figura 3.8, se observa que a partir del 2020 se alcanzan temperaturas más altas en el flujo de salida.

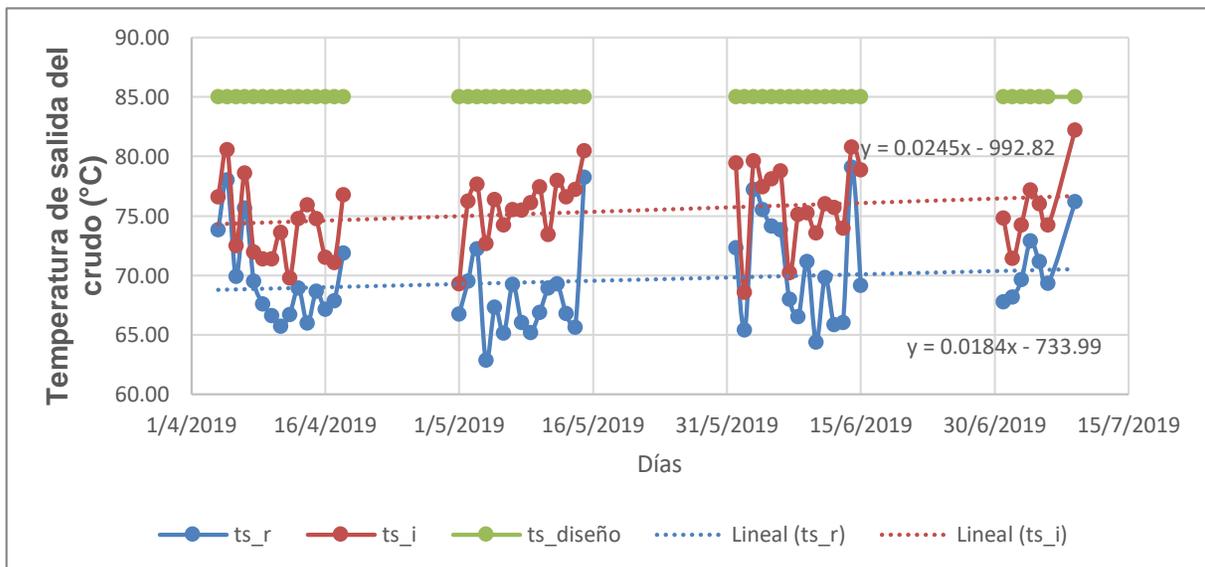


Figura 3.8: Temperatura del petróleo que sale del intercambiador de calor 4 antes y después de la limpieza. Fuente: (Cofiño, 2019)

En la figura 3.9 se observa que, en el 2020, la diferencia entre la temperatura de salida con respecto a la que debería salir si todo el flujo pasara por el intercambiador es de 0,17 °C como promedio, siendo el valor más alto de 5,98 °C en el mes de diciembre. En el 2021 prácticamente no existe diferencia entre la temperatura de salida con respecto a la que debería salir si todo el flujo pasara por el intercambiador, el valor más alto se aprecia el 26 de mayo con una diferencia de 3,54°C. en el 2022 la diferencia aumenta, oscilando entre 0,11 y 8,58 °C

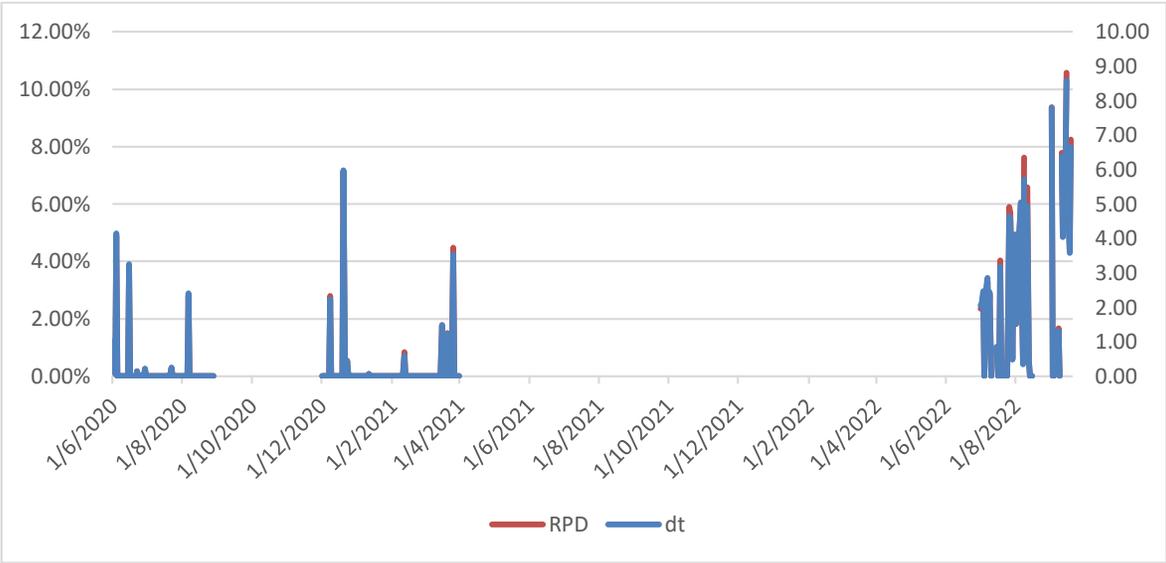


Figura 3.9: Diferencia porcentual relativa entre el flujo que entra al intercambiador de calor 6 y el flujo total que llega a la PPC. Fuente: Elaboración propia

3.2.8. Resultados del análisis de la eficiencia del intercambiador

En la Figura 3.10 se muestra la eficiencia del intercambiador de calor después de ponerlo en servicio (línea azul) con respecto a la eficiencia que debería tener si todo el flujo que llega a la PPC pasara por el intercambiador (línea marrón) y se toma como criterio comparativo la eficiencia según el fabricante (44%, línea verde).

La eficiencia promedio del intercambiador en el año 2020 fue de 0,36 de 0,36 posible si el flujo de petróleo que llega a la PPC pasara completamente por el intercambiador, en el 2021 el promedio fue de 0,32 de 0,32 posible y en el 2022 la eficiencia promedio fue de 0,31 de 0,33 posible.

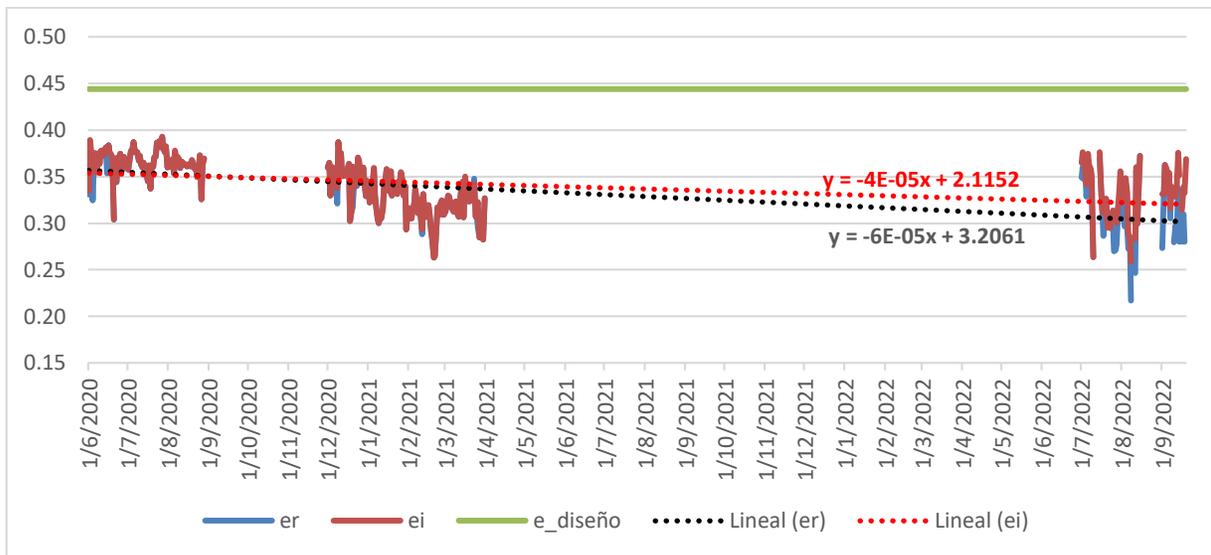


Figura 3.10: Eficiencia del intercambiador de calor 6. Fuente: Elaboración propia

Comparando con el año 2019, figura 3.11, el intercambiador de calor trabaja con más eficiencia, aunque se aprecia una tendencia al deterioro de este parámetro del 2020 al 2022.

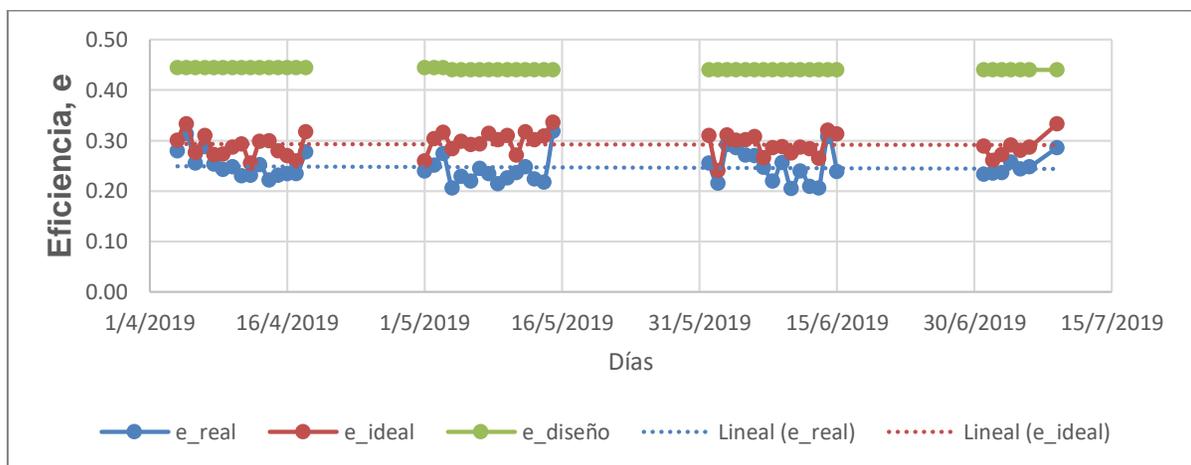


Figura 3.11: Eficiencia del intercambiador de calor 4 después de tres meses de puesto en servicio. Fuente: (Cofño, 2019)

3.2.9. Resultados del análisis del consumo de vapor en el intercambiador de calor 6

El consumo de vapor promedio, Figura 3.12, en el año 2020 fue de 5,61 m³/h (con valores entre 4,73 y 6,33 m³/h). En el año 2021, el consumo de vapor promedio estuvo entre 3,70 y 5,79 m³/h, para un promedio de 4,90 m³/h. En el 2022 el promedio fue de 2,03 m³/h (con valores entre

1,29 y 2,59 m³/h). la disminución de vapor en el intercambiador de calor 6 en el 2022 se debe a que se pone a funcionar en paralelo junto al intercambiador de calor 4.

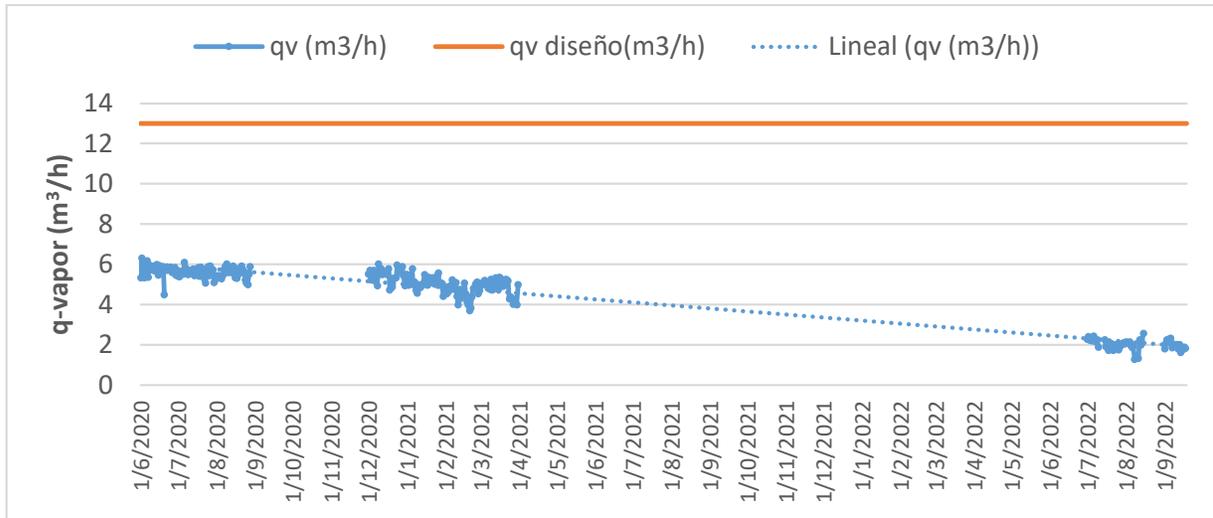


Figura 3.12: Consumo de vapor en el intercambiador 6 en el periodo analizado. Fuente: Elaboración propia

3.3 Predicción del tiempo de limpieza del intercambiador de calor 6

Para predecir el tiempo óptimo para la limpieza del equipo se utilizó el método analítico basado en el índice de pronóstico (A), calculado en función del coeficiente global de transferencia de calor. Se analizaron dos períodos de tiempo: operación del intercambiador de calor 6, operando solo en el período del 2020 al 2021 y operación del intercambiador de calor 6, operando en paralelo con el intercambiador 4 durante el 2022.

Para ambos períodos se determinó el índice de pronóstico límite para lo cual se tuvo en cuenta la temperatura de salida mínima con la que se garantiza la separación de la emulsión agua-petróleo y asumiendo que todo el crudo pasa por el equipo, los resultados se muestran en la tabla 3.7.

Tabla 3.7: Resultados del índice de pronóstico mínimo

	Ts Mínima (°C)	Ud _i (W/m ² K)	U _{diseño} (W/m ² K)	A (límite)
IC 6 operando solo	65	65,47	249,30	0,26
IC 6 operando en paralelo	65	25,40	249,30	0,10

Fuente: Elaboración propia

IC 6 operando solo: Con la ecuación obtenida en la figura 3.13 se determinó el tiempo en el cual la línea alcanza el índice de pronóstico límite, el resultado fue de 759 días a partir del primer día de operación, lo cual nos lleva hacia junio del 2022 como fecha posible para llevar a cabo la limpieza, teniendo en cuenta el pronóstico de la degradación de las condiciones del equipo.

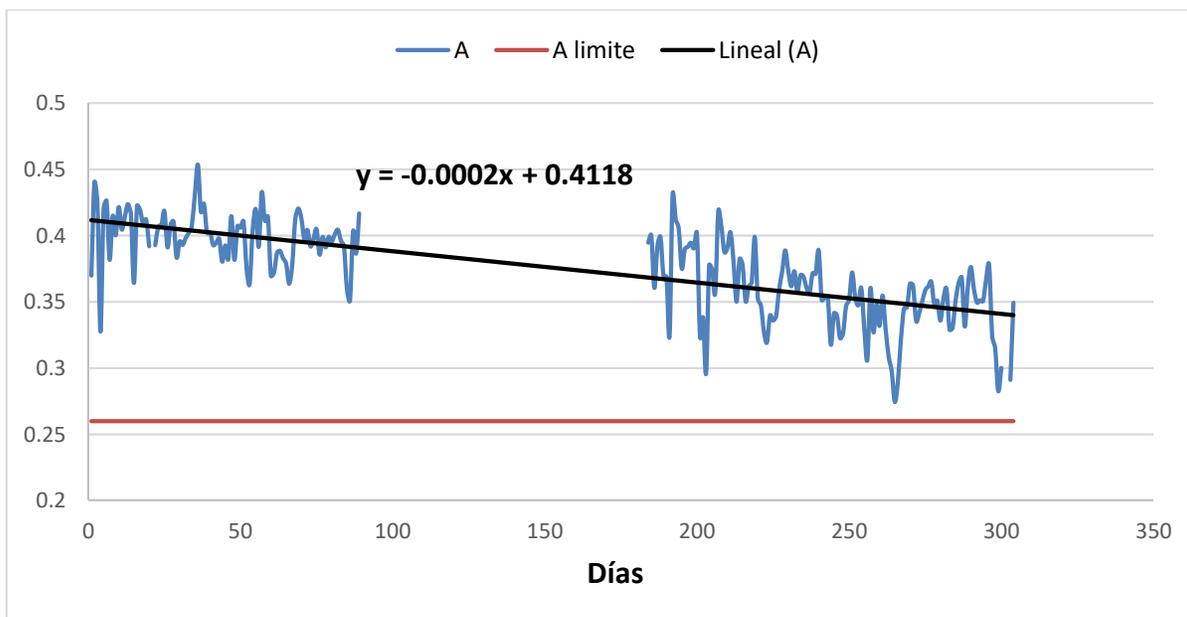


Figura 3.13: Línea de tendencia obtenida en el período 2020-2021. Fuente: Elaboración propia

La limpieza mecánica no se llevó a cabo debido a la inexistencia en la empresa de las juntas para las tapas de las cámaras de petróleo y vapor, respectivamente, y no se pudo realizar la limpieza química porque en el momento analizado no había disponibilidad de destilado medio y la nafta que se estaba utilizando en el proceso tenía una temperatura inicial de ebullición de 34°C.

Por esta razón y que además no se cumplía con la caída de presión fijada por el fabricante se decide operar con dos intercambiadores en paralelo.

IC 6 operando en paralelo: Con la ecuación obtenida en la figura 3.14 se determinó el tiempo en el cual la línea alcanza el índice de pronóstico límite, el resultado fue de 423 días a partir del primer día de estar operando en paralelo, lo cual nos lleva hacia agosto del 2023 como fecha posible para llevar a cabo la limpieza, teniendo en cuenta el pronóstico de la degradación de las condiciones del equipo.

Por tanto, la decisión de operar en paralelo los intercambiadores extiende el tiempo de limpieza por poco más de un año.

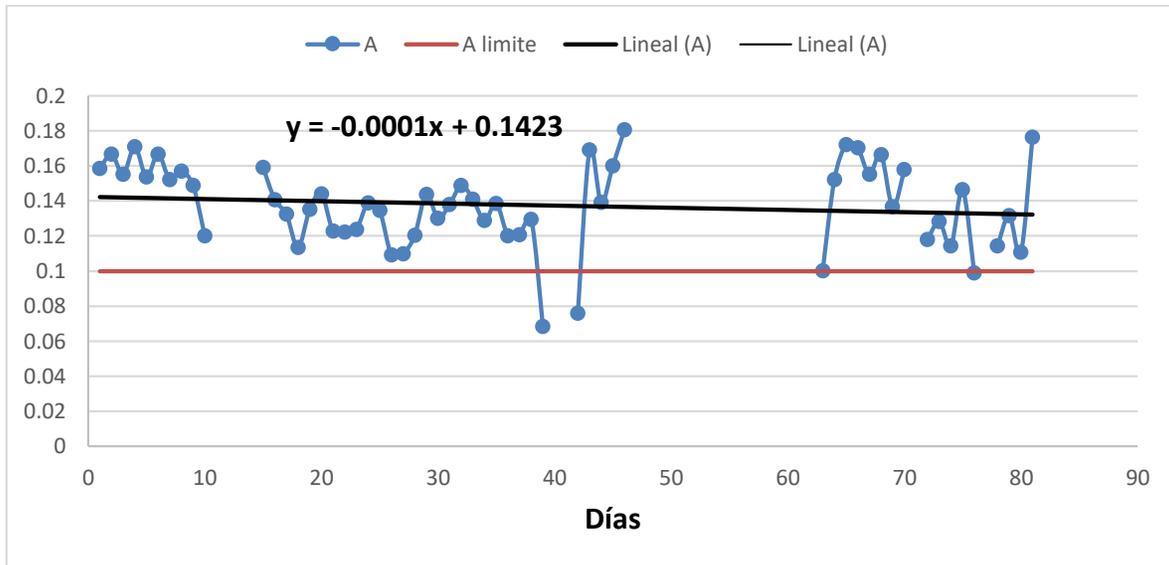


Figura 3.14: Línea de tendencia obtenida en el período 2022 operando en paralelo. Fuente: Elaboración propia

3.4 Conclusiones Parciales del Capítulo 3

1. El coeficiente de variación alrededor de la muestra para las variables medidas, resultó ser menor de un 12% en más del 96% de los registros, excepto para la presión de entrada del petróleo, donde el coeficiente de variación fue menor de un 12% en más del 90% de los registros.
2. Con el gráfico de las cartas de control se concluye que la mayoría de los parámetros medidos se encuentran bajo control estadístico, las afectaciones que existen pueden estar relacionadas con problemas operacionales, fallos de corriente en la planta, errores en el canal de transmisión de datos y fallos en el sensor del instrumento.
3. Con la disminución del valor de presión fijado para la apertura de la válvula del bypass de petróleo a la entrada de los intercambiadores de calor, durante el 2020, se logra disminuir la caída de presión en el intercambiador de calor 6, oscilando entre 2,7 y 4,0 barg. En el año 2021 se observan valores entre 3,3 y 4,6 barg ligeramente superior a la caída de presión recomendada por el fabricante y para el 2022 con los intercambiadores de calor trabajando en paralelo disminuye a valores entre 2,4 y 2,9 barg.
4. El 99% del crudo que llega a la PPC, durante los años 2020 y 2021, pasa por el intercambiador de calor, disminuyendo este valor para el 2022 en un 91%.

5. Durante el 2020 el intercambiador de calor trabajó con una eficiencia promedio de 0,36, en el 2021 trabaja con 0,32 y para el 2022 opera con 0,31 de eficiencia promedio.
6. El intercambiador de calor 6 en el período 2020-2021, se pronostica que en junio del 2022 (759 días a partir del primer día de operación) ya el intercambiador de calor se encontraba sucio y debía ser limpiado.
7. A partir de comenzar a trabajar en paralelo, se estima que el intercambiador de calor 6 deberá ser limpiado en agosto del 2023 (423 días a partir del primer día de estar operando en paralelo).

CONCLUSIONES

- 1- El tiempo óptimo de limpieza, pronosticado para el intercambiador de calor 6, operando solo, es de 759 días a partir de su puesta en marcha, al agregar el intercambiador 4 en paralelo con el intercambiador de calor 6 se logra alargar el tiempo de limpieza en 423 días más.
- 2- Durante la operación del intercambiador de calor 6, el 99% del flujo de petróleo que llega a la PPC es calentado, al agregar el intercambiador 4 en paralelo con el intercambiador de calor 6, el flujo de petróleo que llega a la PPC se divide entre ambos equipos y los cálculos arrojan que el 91% del flujo que llega al intercambiador 6 es calentado.
- 3- En el intercambiador de calor 6 la eficiencia oscila de 0,32 a 0,36 y cuando opera en paralelo junto al intercambiador 4 la eficiencia es de 0,31.
- 4- El consumo de vapor promedio, en el intercambiador de calor 6, en el período analizado se mantiene entre 4,90 y 5,61 m³/h cuando trabaja solo y 2,03 m³/h cuando opera en paralelo.

RECOMENDACIONES

1. Efectuar una limpieza química con un disolvente base hidrocarburo en agosto de 2023 y evaluar el comportamiento de la operación del intercambiador de calor 6 después de la limpieza.

BIBLIOGRAFIA

- AlfaLaval. (2016). Manual de instalación, funcionamiento y mantenimiento Intercambiador de calor espiral.
- Arroyo Andrés, A. (diciembre de 2014). Diseño bajo norma TEMA de intercambiadores tubo-carcasa. *proyecto fin de carrera Universidad Carlos III de Madrid. Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos*. Madrid, España. Recuperado el 7 de diciembre de 2021, de <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/22784>
- Ávila, J. S., & Ruano, J. G. (2000). Desarrollo y aplicación del diagnóstico y pronóstico técnico al mantenimiento de los sistemas centralizados de aire acondicionado. *Ingeniería Mecánica*, 3(4), 71-77.
- Branan, C. (2002). *Rules of Thumb for Chemical Engineers. A manual of quids, accurate solutions to everyday process engineering problems*. Houston: Editorial Gulf Publishing Company.
- Cengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2020). *Transferencia de calor y masa, fundamentos y aplicaciones* (sexta ed.). Mc Graw Hill Interamericana de España.
- Cheremisinoff, N. P. (2000). *Handbook of chemical processing Equipment*. Boston Oxford Auckland Johannesburg Melbourne New Delhi: Butterworth Heinemann.
- Cofiño, M. T. (2019). Evaluación del efecto de la limpieza química y mecánica en la operación del Intercambiador de Calor 4 de la Segunda Etapa de Separación en la Planta de Procesamiento de Crudos de la EPEC – Centro. *Trabajo de Diploma presentado como requisito parcial para optar por el título de Ingeniero Químico*. Matanzas, Cuba.
- Díaz Galbán, Y. (2014). Evaluación de la eficiencia de la limpieza mecánica del intercambiador de calor en espiral de la segunda etapa de separación en la batería central de la EPEP-C. *Trabajo final en opción al Título Académico de*

Especialista en Perforación de pozos de petróleo y producción de petróleo.
Mención: Producción de petróleo. Matanzas.

Energy Efficiency Best Practice Programme. (2001). Compact Heat Exchangers a Training Package for Engineers. 255.

Epep-Centro. (24 de octubre de 2022). PC-TV/T 0201 Reglamento Tecnológico de la Planta de Procesamiento de Crudos, Versión 12.

Garcia, R. H. (2016). *Mantenimiento Industrial: Organización, control y gestión*. Buenos Aires, Alsina, Argentina: Mantenimiento Industrial.

Garrido, S. G. (2010). *Organización y gestión integral de mantenimiento*. Madrid, España: Ediciones Díaz de Santos, S.A. Obtenido de <http://www.diazdesantos.es/ediciones>

Gavin, T. (2012). *Chemical Engineering Design: Principles, Practice and Economics of Plant and Process Design*. New York: Butterworth Heinemann.

Gilbert, V. A. (9 de Septiembre de 2015). *Ecuador Documents*. Obtenido de <https://fdocuments.ec/document/disenio-de-intercambiadores-de-calor-de-tubo-y-coraza.html>

González, J. I. (septiembre-diciembre de 2011). Evaluación de un Intercambiador de calor. estudio de su empleo como recuperador de calor. *Tecnología Química*, XXXI(3), 37-44. Recuperado el 20 de diciembre de 2021, de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=445543774005>

Guach, A. C. (2016). Determinación del tiempo óptimo de limpieza de un pasteurizador de jugos y. *Trabajo de Diploma presentado como requisito parcial para optar por el título de Ingeniero Químico Universidad de Matanzas*. Matanzas, Cuba.

Guðmundsson, O. (November de 2015). Detection of Fouling in Heat Exchangers using model comparison. *Tesis Doctoral. Facultad de Ingeniería Industrial, Ingeniería*

Mecánica y Ciencias de la Computación, Universidad de Islandia, Reykjavik.
Recuperado el 17 de diciembre de 2021, de
<https://skemman.is/bitstream/1946/23909/1/Oddgeir%20-%20PhD%20thesis%20wp.pdf>

Hale, M. (octubre/diciembre de 2020). Comprender y prevenir el ensuciamiento del intercambiador de calor. *Industria Ambiente, Gestión Medioambiental y Energética*, 32-34.

Herrera Zaidiris, G. (noviembre de 2022). Desarrollo de un modelo matemático para describir el proceso de calentamiento en los tanques de tratamiento de 10 000 m³ de la EPEP-Centro. *Trabajo final en opción al Título Académico de Especialista en Perforación de pozos de petróleo y producción de petróleo*. Matanzas, Cuba.

Incropera, F. P. (2011). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Editorial Prentice Hall 7th Ed.

Kays, W. M., & London, A. (1984). *Compact Heat Exchangers*. New York: Mc Graw Hill Book Company.

Kern, D. Q. (2019). *Procesos de transferencia de calor* (4ta ed.). Compañía Editorial Continental.

Labat, J. C. (Mayo de 2018). *Repositorio Digital, Universidad Central del Ecuador*. Recuperado el 22 de Noviembre de 2021, de <https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/13702/407960.pdf?sequence=1>

Levenspiel, O. (1993). *Flujo de fluidos e intercambio de calor*. Barcelona: Reverté, S.A.

Lienhard, J. H. (2008). *A Heat Transfer Textbook* (Third Edition ed.). Cambridge, Massachusetts, U.S.A.: Phlogiston Press.

- Lyons, W., & Plisga, G. (2016). *Standard Handbook of Petroleum and Natural Gas Engineering* (3rd edition ed.). Gulf Professional Publishing.
- Manrique, J. A. (2005). *Transferencia de calor* (segunda ed.). Alfaomega y Oxford University Press México S.A. de C.V.
- Marín, J., & Guillen. (2013). *Diseño y cálculo de Intercambiadores de calor monofásicos*. Paraninfo, S.A.
- Mendizabal, D. G. (2002). *Docplayer*.
- Millán, M. I. (10 de Diciembre de 2001). *Ingeniería Térmica y de fluidos. Apuntes de Intercambiadores de calor*. Recuperado el 31 de enero de 2022, de Ecuador Documents: <https://fdocuments.ec/document/apuntes-de-intercambiadores.html>
- Miller, J., & Miller, J. (2002). *Estadística y Quimiometría para Química Analítica*. Madrid: Pearson Educación.
- MINEM. (26 de Octubre de 2021). *Ministerio de Energía y Minas*. Recuperado el 13 de Enero de 2022, de <https://www.minem.gob.cu:https://www.minem.gob.cu/es/noticias/minem/cuba-requiere-transformar-su-matriz-energetica-hacia-fuentes-limpias>
- Padilla, N. N., & Silvera, A. J. (2016). *Diseño de sistemas termofluidos: Una visión integradora* (Vol. ISBN: 9789587417425). Barranquilla, Colombia: Editorial Universidad del Norte.
- Perry, R. H., & Green, D. W. (2019). *Perry's Chemical Engineers' Handbook* (Ninth Edition ed.). McGraw-Hill Education. .
- Pita, M. J. (2015). *Teoría y Problemas de Transmisión de Calor*. Madrid: Universidad Nacional de Educación a distancia (UNED).

Procesador de cálculo. (s.f.). *Coficiente Global de Transferencia de Calor*. Recuperado el 17 de diciembre de 2021, de http://www.energianow.com/tools/tool3/transfcalor_total.php

Quintana, J. E. (2017). Mejoras para reducir las pérdidas de calor e incrementar la eficiencia del proceso de acondicionamiento del electrolito en una planta de lixiviación de cobre. *Para optar el Título Profesional de Ingeniera Química*. Lima, Perú. Recuperado el 6 de enero de 2022, de https://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12672/6383/Castillo_qj.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Rizo, L. B. (2008). Evaluación energética en la planta de procesamiento de crudo de la EPEP Centro. Matanzas.

Romero, H. A., Barboza, R. N., & Zarate, L. J. (1998). *Repositorio UTB, Universidad Tecnológica de Bolívar*. Recuperado el 14 de diciembre de 2021, de <https://repositorio.utb.edu.co/bitstream/handle/20.500.12585/2248/0058136ab.pdf?sequence=6&isAllowed=y>

Sacristan, F. R. (2002). *El Automantenimiento en la Empresa: Etapas y Experiencias para su Implantación*. Madrid: FC Editorial.

Sánchez Escalona, E. G. (15 de mayo de 2018). Determinación de los coeficientes globales de transferencia de calor comparando los métodos DTML y ϵ -NUT. *Ingeniería Energética*, XXXIX(3), 203-212. Recuperado el 17 de diciembre de 2021, de <https://www.redalyc.org/journal/3291/329158816008/html/>

Shilling, R. L. (2000). *A new perspective on the impact of fouling on the performance of finned heat exchangers in comparison to heat exchangers without extended surfaces*. Houston, Texas, U.S.A: Editorial Brown Fintube Company.

Tamayo, E. (2016). Overall heat transfer coefficients, pressure drop and power demand in plate heat exchangers during the ammonia liquor cooling process. *International Journal of Mechanics*, 10, 342-348. Recuperado el 17 de diciembre

de 2021, de <http://www.naun.org/main/NAUN/mechanics/2016/b022003-204.pdf>

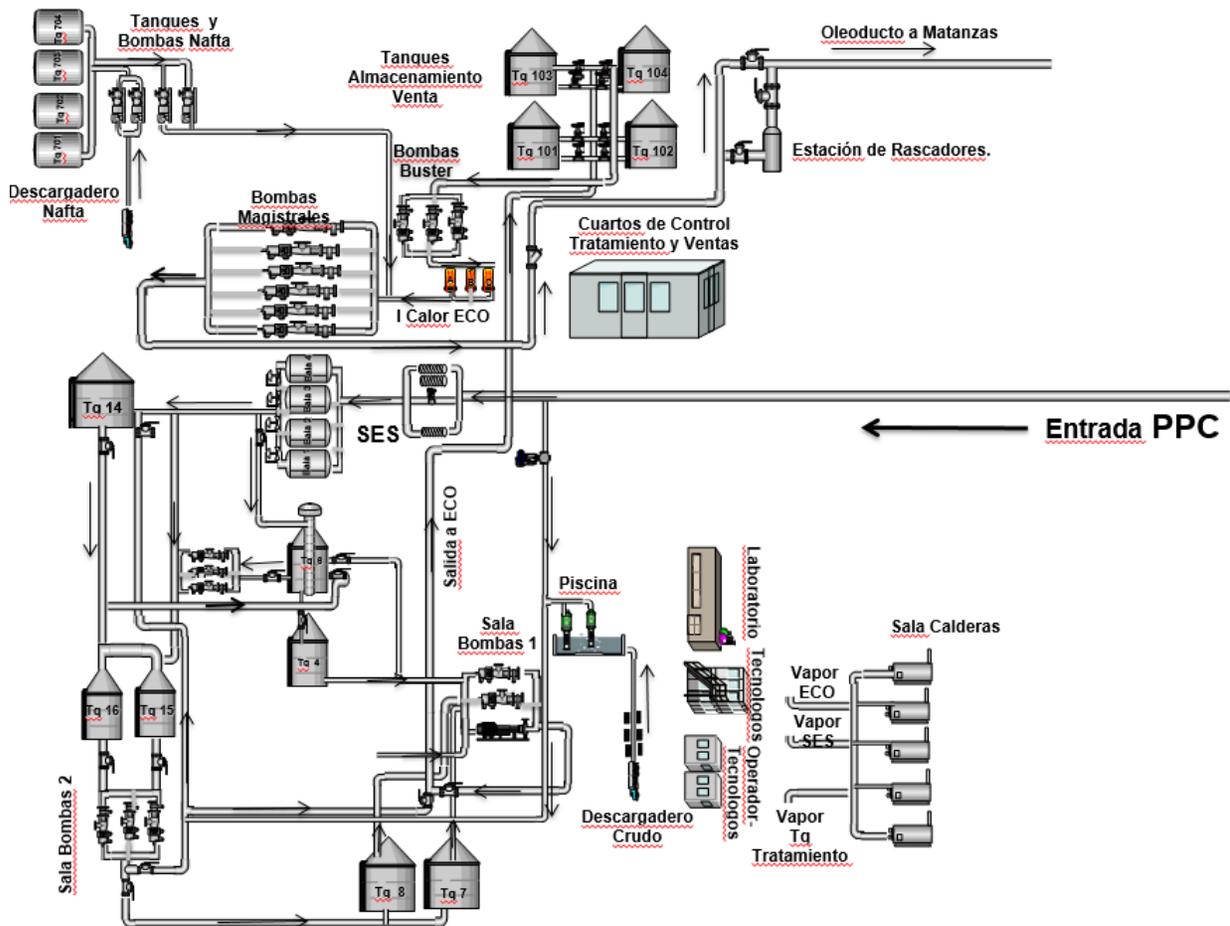
Tanquero, I. L. (2015). Obtención y validación de un modelo matemático para estimar el coeficiente pelicular de transferencia de calor del petróleo en los intercambiadores en espiral de batería central en la EPEP-C. *Trabajo de Diploma presentado como requisito parcial para optar por el título de Ingeniero Químico. Universidad de Matanzas.*

TEMA. (2007). Recuperado el 7 de diciembre de 2021, de http://www1.frm.utn.edu.ar/electromecanica/materias%20pagina%20nuevas/INSTALACIONES%20TERMICAS%20MECANICAS%20Y%20FRIGORIFICAS/material/apuntes/TEMA_9TH_EDITION_2007.pdf

Walas, S. M. (2012). *Chemical Process Equipment Selection and Design*. Massachusetts: Butterworth-Heinemann Series in Chemical Engineering.

ANEXOS

Anexo 1: Flujo tecnológico de la Planta de procesamiento de Crudo.



Anexo 2: Intercambiadores de calor de la Segunda Etapa de Separación.





Anexo 3: Ficha Técnica Intercambiador de Calor en espiral SES.

Spiral Heat Exchanger

ESPECIFICACIONES TECNICAS:		
Fluid	Hot Side Water-Steam	Cold side CRUDO NO NEWTONIANO
	Condensing Countercurrent	Liquid Heating Countercurrent
Mass flow rate kg/h	13030	250000
Fluid Condensed/Vapourized kg/h	13030	0.000
Inlet Temperature °C	165.0	30.0
Outlet Temperature °C	165.0/162.9	90.0
Operating pressure in/out bara	7.00/7.00	
Pressure Drop kPa	0.493	409
Velocity connection in/out m/s	49.33/1.291/1.307	
Heat transfer		
Heat Exchanged	kW	7500
M.T.D.	K	101.9
O.H.T.C clean conditions	W/(m ² *K)	261.2
O.H.T.C service	W/(m ² *K)	249.3
Heat transfer area	m ²	295.3
Plate area	m ²	310.0
Fouling resistance* 10000	m ² *K/W	0.000
Duty Margin	%	4.8
Construction		
Cylindrical Width	mm	2000
Outer Diameter	mm	1980
Spacing	mm	2*8.0 2*24.0
Plate Material	316/316L Dual certif	
Connection Size	ND 150/ND 80_ND 50	ND 250->ND 300
Channel Closure	Open-Roll	Open-Roll
Manhole	No	
Pressure vessel code	ASME U stamp	
Design Overpressure	bar 10.0	10.0
Design Temperature	°C 200	200
Weight Empty/Operating	kg	1640 / 2680

Fluid Composition

Hot Side

Water-Steam

Condensing

Water-Steam = 13030 kg/h

inlet v/l 13030/0.000

outlet v/l 0.000/13030

Cold side

CRUDO NO NEWTONIANO

Liquid Heating

CRUDO NO NE = 250000

inlet v/l 0.000/250000

outlet v/l 0.000/250000

Physical Properties

		Hot Side		Cold side	
		Liquid	Vapour	Liquid	
		In/Out	In/Out	In/Out	
Dens	kg/m ³	903.4/903.5	3.582/3.579	990.0/978.0	/
Sp.heat	kJ/(kg*K)	4.372/4.372	1.915/1.915	1.800/1.800	/
Th.Cond	W/(m*K)	0.683/0.683	0.0309/0.0309	0.118/0.118	/
Con.. Index	Pa*s ⁿ			24.78 / 0.2760	
Flow behav	n			0.8836 / 0.9196	
Visc	cP	0.167/0.167	0.0145/0.0145	/	/
Bub. p.	°C		165.0		
Dew p.	°C		165.0		
Mol.W.	u		18.02/18.02		
Cr.pr.	bara		221.29/221.29		
Cr.Temp.	°C		374.1/374.1		
Lat.heat	kJ/kg		2062.5/2062.6		

CONDICIONES DE OPERACIÓN:

Fluido: **Crudo emulsionado con 25% BSW**

Contenido de sólidos: No es Significativo

Densidad: **970 Kg/m³.**

Presencia de H₂S

Anexo 4: Ecuaciones para el cálculo de $\varepsilon = f(\text{NTU})$ en intercambiadores de calor. (Incropera, 2011).

Flow Arrangement	Relation
Parallel ow	$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-\text{NTU}(1 + C_r)]}{1 + C_r} \quad (11.28a)$
Counterow	$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-\text{NTU}(1 - C_r)]}{1 - C_r \exp[-\text{NTU}(1 - C_r)]} \quad (C_r < 1)$
	$\varepsilon = \frac{\text{NTU}}{1 + \text{NTU}} \quad (C_r = 1) \quad (11.29a)$
Shell-and-tube	
One shell pass (2, 4, . . . tube passes)	$\varepsilon_1 = 2 \left\{ 1 + C_r + (1 + C_r^2)^{1/2} \times \frac{1 + \exp[-(\text{NTU})_1(1 + C_r^2)^{1/2}]}{1 - \exp[-(\text{NTU})_1(1 + C_r^2)^{1/2}]} \right\}^{-1} \quad (11.30a)$
n shell passes ($2n, 4n, . . .$ tube passes)	$\varepsilon = \left[\left(\frac{1 - \varepsilon_1 C_r}{1 - \varepsilon_1} \right)^n - 1 \right] \left[\left(\frac{1 - \varepsilon_1 C_r}{1 - \varepsilon_1} \right)^n - C_r \right]^{-1} \quad (11.31a)$
Cross-ow (single pass)	
Both fluids unmixed	$\varepsilon = 1 - \exp \left[\left(\frac{1}{C_r} \right) (\text{NTU})^{0.22} \{ \exp[-C_r(\text{NTU})^{0.78}] - 1 \} \right] \quad (11.32)$
C_{\max} (mixed), C_{\min} (unmixed)	$\varepsilon = \left(\frac{1}{C_r} \right) (1 - \exp \{ -C_r [1 - \exp(-\text{NTU})] \}) \quad (11.33a)$
C_{\min} (mixed), C_{\max} (unmixed)	$\varepsilon = 1 - \exp(-C_r^{-1} \{ 1 - \exp[-C_r(\text{NTU})] \}) \quad (11.34a)$
All exchangers ($C_r = 0$)	$\varepsilon = 1 - \exp(-\text{NTU}) \quad (11.35a)$

Anexo 5: Análisis estadístico de las variables medidas para utilizar en el procedimiento de cálculo.

Fecha	Parámetros Estadísticos	Pep	Psp	tep	tsp	Tv
1/6/2020	Media	4.69	1.44	37.57	74.50	170.87
	Desviación Estándar	0.69	0.11	0.56	10.82	9.92
	Coeficiente de variación	14.72%	7.58%	1.49%	14.52%	5.80%
2/6/2020	Media	4.81	1.42	36.05	79.43	172.31
	Desviación Estándar	0.48	0.08	0.41	2.33	4.16
	Coeficiente de variación	9.90%	5.77%	1.15%	2.93%	2.41%
3/6/2020	Media	4.74	1.38	35.95	77.73	172.65
	Desviación Estándar	0.49	0.08	0.51	5.46	5.96
	Coeficiente de variación	10.41%	6.05%	1.42%	7.03%	3.45%
4/6/2020	Media	4.59	1.45	35.76	76.07	173.77
	Desviación Estándar	0.59	0.17	0.52	7.93	4.48
	Coeficiente de variación	12.75%	11.85%	1.45%	10.43%	2.58%
5/6/2020	Media	4.50	1.43	36.25	78.39	173.74
	Desviación Estándar	0.43	0.09	0.84	4.37	5.61
	Coeficiente de variación	9.57%	6.46%	2.33%	5.58%	3.23%
6/6/2020	Media	4.74	1.38	36.60	79.25	175.58
	Desviación Estándar	0.43	0.07	0.50	2.00	3.46
	Coeficiente de variación	9.13%	4.76%	1.38%	2.52%	1.97%
7/6/2020	Media	4.74	1.40	37.03	76.08	170.59
	Desviación Estándar	0.40	0.06	0.85	4.32	4.38
	Coeficiente de variación	8.33%	4.62%	2.30%	5.68%	2.57%
8/6/2020	Media	4.61	1.36	37.63	79.34	174.95
	Desviación Estándar	0.35	0.07	0.93	3.59	3.76
	Coeficiente de variación	7.57%	5.42%	2.47%	4.53%	2.15%
9/6/2020	Media	4.75	1.37	37.90	78.51	174.03
	Desviación Estándar	0.36	0.06	0.84	3.80	4.58
	Coeficiente de variación	7.52%	4.12%	2.20%	4.84%	2.63%
10/6/2020	Media	4.76	1.38	37.95	79.62	172.94
	Desviación Estándar	0.36	0.07	0.79	1.91	4.94
	Coeficiente de variación	7.61%	4.89%	2.08%	2.40%	2.86%
11/6/2020	Media	4.67	1.34	37.16	79.34	173.57
	Desviación Estándar	0.40	0.07	0.56	2.48	6.73
	Coeficiente de variación	8.61%	5.07%	1.50%	3.13%	3.88%
12/6/2020	Media	4.64	1.39	37.22	77.74	169.78
	Desviación Estándar	0.53	0.09	1.10	5.50	7.30
	Coeficiente de variación	11.33%	6.16%	2.95%	7.08%	4.30%
13/6/2020	Media	4.69	1.41	37.26	78.01	168.29

	Desviación Estándar	0.64	0.10	0.51	4.99	6.78
	Coeficiente de variación	13.59%	6.86%	1.37%	6.39%	4.03%
14/6/2020	Media	4.41	1.35	36.80	79.98	175.53
	Desviación Estándar	0.32	0.06	0.61	2.03	3.39
	Coeficiente de variación	7.30%	4.65%	1.66%	2.54%	1.93%
15/6/2020	Media	4.64	1.38	36.83	78.18	170.23
	Desviación Estándar	0.56	0.12	0.99	4.02	6.90
	Coeficiente de variación	12.11%	8.48%	2.69%	5.14%	4.05%
16/6/2020	Media	4.48	1.40	36.44	79.19	172.65
	Desviación Estándar	0.39	0.14	0.83	4.10	5.39
	Coeficiente de variación	8.68%	10.28%	2.28%	5.18%	3.12%
17/6/2020	Media	4.66	1.39	36.24	77.48	170.03
	Desviación Estándar	0.47	0.08	0.41	5.21	6.40
	Coeficiente de variación	10.05%	6.08%	1.13%	6.72%	3.76%
18/6/2020	Media	4.73	1.40	36.43	77.08	168.84
	Desviación Estándar	0.65	0.09	0.93	3.97	5.53
	Coeficiente de variación	13.79%	6.20%	2.56%	5.15%	3.28%
19/6/2020	Media	4.59	1.39	36.99	78.56	173.88
	Desviación Estándar	0.39	0.06	0.83	2.32	4.44
	Coeficiente de variación	8.52%	4.46%	2.25%	2.95%	2.55%
20/6/2020	Media	4.82	1.43	37.24	75.44	167.33
	Desviación Estándar	0.29	0.06	0.43	3.22	2.92
	Coeficiente de variación	6.10%	4.23%	1.16%	4.27%	1.75%
22/6/2020	Media	4.58	1.49	39.25	77.64	174.70
	Desviación Estándar	0.42	0.07	0.70	5.83	6.61
	Coeficiente de variación	9.09%	4.60%	1.79%	7.51%	3.79%
23/6/2020	Media	4.25	1.39	38.21	79.52	174.53
	Desviación Estándar	0.30	0.08	1.00	3.01	6.37
	Coeficiente de variación	6.99%	5.45%	2.62%	3.79%	3.65%
24/6/2020	Media	4.26	1.40	38.29	79.65	174.71
	Desviación Estándar	0.32	0.09	0.95	2.70	4.86
	Coeficiente de variación	7.46%	6.39%	2.49%	3.39%	2.78%
25/6/2020	Media	4.38	1.42	38.47	79.64	172.92
	Desviación Estándar	0.30	0.07	0.76	2.20	5.78
	Coeficiente de variación	6.95%	4.87%	1.98%	2.76%	3.34%
26/6/2020	Media	4.36	1.49	38.35	78.05	174.12
	Desviación Estándar	0.44	0.08	0.87	5.99	5.53
	Coeficiente de variación	10.18%	5.08%	2.28%	7.68%	3.17%
27/6/2020	Media	4.36	1.44	38.26	79.50	174.46
	Desviación Estándar	0.41	0.05	0.72	2.34	6.55
	Coeficiente de variación	9.48%	3.67%	1.88%	2.94%	3.75%

28/6/2020	Media	4.55	1.43	38.28	79.57	174.20
	Desviación Estándar	0.33	0.05	1.02	1.82	5.96
	Coeficiente de variación	7.30%	3.73%	2.68%	2.28%	3.42%
29/6/2020	Media	4.46	1.43	38.14	78.05	172.95
	Desviación Estándar	0.55	0.10	0.73	5.44	5.81
	Coeficiente de variación	12.35%	6.85%	1.91%	6.97%	3.36%
30/6/2020	Media	4.46	1.42	38.40	79.06	175.64
	Desviación Estándar	0.37	0.06	0.88	3.26	5.51
	Coeficiente de variación	8.33%	4.31%	2.29%	4.12%	3.14%
1/7/2020	Media	4.62	1.43	38.40	77.10	169.96
	Desviación Estándar	0.39	0.07	0.71	4.86	7.09
	Coeficiente de variación	8.47%	5.16%	1.86%	6.30%	4.17%
2/7/2020	Media	4.87	1.42	38.35	77.55	168.75
	Desviación Estándar	0.49	0.08	0.54	5.20	7.16
	Coeficiente de variación	10.01%	5.44%	1.40%	6.71%	4.24%
3/7/2020	Media	4.50	1.41	38.03	79.49	172.34
	Desviación Estándar	0.41	0.07	0.89	2.88	6.20
	Coeficiente de variación	9.23%	5.04%	2.33%	3.62%	3.60%
4/7/2020	Media	4.65	1.38	38.46	79.58	172.28
	Desviación Estándar	0.29	0.06	0.83	2.37	5.77
	Coeficiente de variación	6.20%	4.30%	2.17%	2.98%	3.35%
5/7/2020	Media	4.75	1.40	38.19	78.30	164.44
	Desviación Estándar	0.35	0.05	0.55	3.37	4.32
	Coeficiente de variación	7.28%	3.25%	1.43%	4.30%	2.63%
6/7/2020	Media	4.87	1.38	38.16	78.78	169.01
	Desviación Estándar	0.54	0.09	0.51	2.89	6.06
	Coeficiente de variación	11.07%	6.50%	1.34%	3.66%	3.59%
7/7/2020	Media	4.45	1.35	37.92	79.28	172.42
	Desviación Estándar	0.48	0.10	0.71	3.32	6.05
	Coeficiente de variación	10.73%	7.30%	1.89%	4.19%	3.51%
8/7/2020	Media	4.61	1.33	38.65	79.17	170.15
	Desviación Estándar	0.48	0.08	0.79	2.43	5.57
	Coeficiente de variación	10.45%	5.74%	2.05%	3.07%	3.27%
9/7/2020	Media	4.57	1.36	38.72	78.33	170.13
	Desviación Estándar	0.34	0.08	0.53	4.25	6.39
	Coeficiente de variación	7.38%	5.70%	1.37%	5.43%	3.75%
10/7/2020	Media	4.64	1.37	38.56	79.55	173.17
	Desviación Estándar	0.35	0.04	0.82	2.24	4.83
	Coeficiente de variación	7.55%	2.89%	2.14%	2.82%	2.79%
11/7/2020	Media	4.61	1.37	38.50	79.07	174.88
	Desviación Estándar	0.46	0.10	0.90	2.57	4.94

	Coeficiente de variación	9.89%	7.42%	2.35%	3.25%	2.82%
12/7/2020	Media	4.87	1.44	38.03	77.63	172.02
	Desviación Estándar	0.30	0.12	0.55	4.42	4.98
	Coeficiente de variación	6.10%	8.37%	1.44%	5.70%	2.89%
13/7/2020	Media	4.45	1.41	38.50	79.55	176.08
	Desviación Estándar	0.35	0.07	1.20	2.02	3.68
	Coeficiente de variación	7.92%	5.12%	3.11%	2.54%	2.09%
14/7/2020	Media	4.62	1.35	38.75	78.22	173.94
	Desviación Estándar	0.29	0.07	0.85	3.68	4.48
	Coeficiente de variación	6.28%	4.87%	2.20%	4.71%	2.58%
15/7/2020	Media	4.69	1.36	38.68	78.13	174.42
	Desviación Estándar	0.45	0.08	0.78	3.35	4.56
	Coeficiente de variación	9.62%	6.00%	2.01%	4.29%	2.62%
16/7/2020	Media	4.76	1.38	38.86	77.42	174.83
	Desviación Estándar	0.26	0.05	0.76	4.53	3.20
	Coeficiente de variación	5.37%	3.61%	1.95%	5.85%	1.83%
17/7/2020	Media	4.84	1.35	37.92	77.90	172.36
	Desviación Estándar	0.43	0.06	0.51	2.86	5.67
	Coeficiente de variación	8.87%	4.26%	1.33%	3.67%	3.29%
18/7/2020	Media	5.12	1.42	37.97	75.09	171.20
	Desviación Estándar	0.36	0.07	0.70	5.93	4.60
	Coeficiente de variación	7.11%	4.96%	1.84%	7.90%	2.69%
19/7/2020	Media	4.88	1.38	37.36	78.01	174.11
	Desviación Estándar	0.50	0.11	0.51	4.22	3.78
	Coeficiente de variación	10.30%	8.02%	1.38%	5.41%	2.17%
20/7/2020	Media	4.90	1.43	37.09	76.38	169.46
	Desviación Estándar	0.38	0.09	0.93	3.80	7.36
	Coeficiente de variación	7.72%	6.58%	2.50%	4.97%	4.34%
21/7/2020	Media	4.74	1.38	37.23	78.12	171.80
	Desviación Estándar	0.31	0.05	0.51	3.44	6.88
	Coeficiente de variación	6.47%	3.90%	1.38%	4.40%	4.01%
22/7/2020	Media	4.48	1.29	36.75	78.01	171.57
	Desviación Estándar	0.70	0.26	0.59	5.52	6.63
	Coeficiente de variación	15.75%	20.24%	1.60%	7.08%	3.87%
23/7/2020	Media	4.30	1.33	35.40	78.33	171.08
	Desviación Estándar	0.43	0.10	0.56	3.64	7.26
	Coeficiente de variación	9.97%	7.71%	1.58%	4.64%	4.24%
24/7/2020	Media	4.49	1.29	35.48	78.75	173.67
	Desviación Estándar	0.36	0.08	0.38	2.89	6.54
	Coeficiente de variación	7.95%	6.19%	1.08%	3.68%	3.77%
25/7/2020	Media	4.45	1.34	35.65	79.03	172.26

	Desviación Estándar	0.46	0.08	0.79	2.94	6.47
	Coeficiente de variación	10.34%	6.32%	2.21%	3.72%	3.76%
26/7/2020	Media	4.40	1.36	35.91	78.13	170.98
	Desviación Estándar	0.31	0.09	1.23	3.99	7.38
	Coeficiente de variación	6.94%	6.27%	3.44%	5.10%	4.32%
27/7/2020	Media	4.47	1.31	36.47	79.53	170.49
	Desviación Estándar	0.38	0.06	1.27	1.68	4.40
	Coeficiente de variación	8.50%	4.43%	3.48%	2.12%	2.58%
28/7/2020	Media	4.63	1.37	37.25	78.78	170.60
	Desviación Estándar	0.39	0.08	1.11	2.92	7.79
	Coeficiente de variación	8.38%	5.84%	2.97%	3.70%	4.57%
29/7/2020	Media	4.58	1.37	37.51	78.70	171.05
	Desviación Estándar	0.29	0.07	0.82	2.75	6.52
	Coeficiente de variación	6.25%	5.46%	2.19%	3.49%	3.81%
30/7/2020	Media	4.39	1.37	37.56	79.36	171.18
	Desviación Estándar	0.42	0.06	0.66	2.66	6.52
	Coeficiente de variación	9.65%	4.59%	1.77%	3.35%	3.81%
31/7/2020	Media	4.59	1.40	37.33	77.11	171.82
	Desviación Estándar	0.47	0.09	0.83	4.79	8.81
	Coeficiente de variación	10.20%	6.59%	2.22%	6.21%	5.12%
1/8/2020	Media	4.51	1.33	37.50	78.07	171.89
	Desviación Estándar	0.50	0.09	0.95	3.77	5.26
	Coeficiente de variación	11.14%	6.78%	2.54%	4.83%	3.06%
2/8/2020	Media	4.49	1.33	37.71	77.42	171.55
	Desviación Estándar	0.35	0.07	0.85	3.29	5.45
	Coeficiente de variación	7.85%	5.01%	2.25%	4.25%	3.18%
3/8/2020	Media	4.24	1.36	37.87	78.03	172.64
	Desviación Estándar	0.50	0.11	0.79	3.45	7.82
	Coeficiente de variación	11.70%	8.31%	2.10%	4.42%	4.53%
4/8/2020	Media	4.26	1.40	37.48	78.87	174.58
	Desviación Estándar	0.27	0.07	0.64	3.07	5.68
	Coeficiente de variación	6.43%	4.77%	1.70%	3.89%	3.25%
5/8/2020	Media	4.42	1.38	36.95	76.83	174.08
	Desviación Estándar	0.52	0.11	0.58	6.27	6.58
	Coeficiente de variación	11.73%	7.74%	1.57%	8.16%	3.78%
6/8/2020	Media	4.21	1.43	36.56	77.52	168.47
	Desviación Estándar	0.80	0.10	1.14	6.68	21.52
	Coeficiente de variación	19.14%	7.17%	3.12%	8.61%	12.77%
7/8/2020	Media	4.51	1.40	37.35	78.02	171.48
	Desviación Estándar	0.47	0.06	0.99	3.20	6.74
	Coeficiente de variación	10.43%	4.02%	2.66%	4.10%	3.93%

8/8/2020	Media	4.64	1.38	37.69	78.61	172.29
	Desviación Estándar	0.31	0.03	0.93	2.40	5.23
	Coeficiente de variación	6.73%	2.37%	2.46%	3.06%	3.03%
9/8/2020	Media	4.57	1.36	37.94	79.71	176.64
	Desviación Estándar	0.22	0.04	0.81	1.96	4.68
	Coeficiente de variación	4.90%	2.64%	2.13%	2.46%	2.65%
10/8/2020	Media	4.66	1.37	38.17	77.75	172.40
	Desviación Estándar	0.39	0.06	0.67	3.00	5.91
	Coeficiente de variación	8.34%	4.05%	1.74%	3.86%	3.43%
11/8/2020	Media	4.64	1.38	38.02	78.92	174.40
	Desviación Estándar	0.30	0.06	0.80	2.48	5.94
	Coeficiente de variación	6.36%	4.13%	2.11%	3.14%	3.41%
12/8/2020	Media	4.66	1.40	38.40	79.04	174.29
	Desviación Estándar	0.36	0.06	0.78	2.57	5.79
	Coeficiente de variación	7.63%	3.97%	2.02%	3.25%	3.32%
13/8/2020	Media	4.65	1.41	38.37	78.51	173.31
	Desviación Estándar	0.27	0.05	0.76	3.03	7.72
	Coeficiente de variación	5.85%	3.76%	1.97%	3.85%	4.46%
14/8/2020	Media	4.55	1.42	38.55	79.70	177.00
	Desviación Estándar	0.27	0.06	0.91	2.30	5.42
	Coeficiente de variación	6.00%	4.36%	2.36%	2.89%	3.06%
15/8/2020	Media	4.65	1.43	38.93	79.20	175.20
	Desviación Estándar	0.37	0.06	0.91	2.30	5.33
	Coeficiente de variación	8.00%	3.93%	2.33%	2.90%	3.04%
16/8/2020	Media	4.73	1.45	39.08	77.31	167.57
	Desviación Estándar	0.34	0.04	0.81	2.54	5.86
	Coeficiente de variación	7.09%	2.66%	2.07%	3.29%	3.49%
17/8/2020	Media	4.53	1.42	38.78	77.75	169.09
	Desviación Estándar	0.41	0.06	0.81	4.35	7.79
	Coeficiente de variación	9.14%	4.41%	2.10%	5.60%	4.61%
18/8/2020	Media	4.72	1.39	39.01	79.54	176.25
	Desviación Estándar	0.33	0.07	0.73	1.90	4.28
	Coeficiente de variación	7.01%	4.93%	1.87%	2.39%	2.43%
19/8/2020	Media	4.77	1.39	38.26	78.62	172.11
	Desviación Estándar	0.47	0.06	0.55	2.63	6.45
	Coeficiente de variación	9.92%	4.22%	1.43%	3.35%	3.75%
20/8/2020	Media	4.53	1.32	38.13	78.83	175.18
	Desviación Estándar	0.38	0.07	0.93	2.24	5.28
	Coeficiente de variación	8.33%	5.08%	2.44%	2.85%	3.02%
21/8/2020	Media	4.72	1.35	38.48	79.01	176.41
	Desviación Estándar	0.49	0.06	0.46	2.31	3.91

	Coeficiente de variación	10.37%	4.58%	1.21%	2.92%	2.22%
22/8/2020	Media	4.85	1.36	38.36	78.58	175.61
	Desviación Estándar	0.42	0.05	0.85	2.43	3.73
	Coeficiente de variación	8.57%	3.51%	2.21%	3.10%	2.12%
23/8/2020	Media	4.84	1.37	38.41	77.26	173.67
	Desviación Estándar	0.39	0.06	1.10	4.60	4.74
	Coeficiente de variación	8.01%	4.04%	2.85%	5.96%	2.73%
24/8/2020	Media	4.38	1.38	37.64	78.32	175.58
	Desviación Estándar	0.57	0.10	0.83	4.96	4.39
	Coeficiente de variación	13.04%	7.19%	2.21%	6.33%	2.50%
25/8/2020	Media	4.06	1.34	37.18	79.25	175.02
	Desviación Estándar	0.42	0.09	1.03	2.49	5.31
	Coeficiente de variación	10.40%	6.47%	2.76%	3.14%	3.04%
26/8/2020	Media	4.52	1.41	37.77	78.93	173.75
	Desviación Estándar	0.46	0.08	0.65	2.82	7.71
	Coeficiente de variación	10.24%	5.66%	1.71%	3.57%	4.44%
27/8/2020	Media	4.65	1.43	37.42	77.96	173.55
	Desviación Estándar	0.57	0.10	1.02	5.41	5.42
	Coeficiente de variación	12.19%	6.80%	2.73%	6.94%	3.12%
28/8/2020	Media	5.04	1.40	37.33	78.35	172.76
	Desviación Estándar	0.53	0.07	0.43	2.90	4.46
	Coeficiente de variación	10.49%	4.67%	1.15%	3.70%	2.58%
1/12/2020	Media	5.36	1.43	35.04	74.91	169.26
	Desviación Estándar	0.56	0.08	0.63	5.74	6.22
	Coeficiente de variación	10.52%	5.89%	1.80%	7.67%	3.67%
2/12/2020	Media	5.18	1.45	34.44	75.50	170.89
	Desviación Estándar	0.64	0.08	0.82	4.98	3.42
	Coeficiente de variación	12.34%	5.27%	2.37%	6.60%	2.00%
3/12/2020	Media	5.47	1.46	34.65	71.82	170.23
	Desviación Estándar	0.75	0.10	0.85	6.14	4.34
	Coeficiente de variación	13.74%	6.74%	2.44%	8.55%	2.55%
4/12/2020	Media	5.11	1.39	34.98	75.72	172.12
	Desviación Estándar	0.46	0.08	0.87	4.46	3.60
	Coeficiente de variación	8.91%	5.58%	2.49%	5.90%	2.09%
5/12/2020	Media	5.15	1.42	35.05	75.38	171.24
	Desviación Estándar	0.45	0.06	0.71	4.58	4.09
	Coeficiente de variación	8.79%	4.51%	2.02%	6.08%	2.39%
6/12/2020	Media	5.26	1.45	35.43	73.01	167.90
	Desviación Estándar	0.57	0.08	0.83	4.34	3.93
	Coeficiente de variación	10.76%	5.73%	2.35%	5.94%	2.34%
7/12/2020	Media	5.33	1.43	35.22	73.63	171.01

	Desviación Estándar	0.44	0.07	0.51	5.77	5.44
	Coeficiente de variación	8.35%	5.09%	1.44%	7.84%	3.18%
8/12/2020	Media	5.12	1.41	34.41	72.24	169.35
	Desviación Estándar	1.11	0.21	0.58	7.78	5.14
	Coeficiente de variación	21.69%	14.86%	1.68%	10.77%	3.03%
9/12/2020	Media	4.82	1.42	34.31	77.54	170.59
	Desviación Estándar	0.47	0.07	0.63	3.71	3.93
	Coeficiente de variación	9.72%	5.04%	1.84%	4.79%	2.31%
10/12/2020	Media	5.24	1.48	33.84	74.49	167.35
	Desviación Estándar	0.53	0.09	0.62	4.99	5.72
	Coeficiente de variación	10.02%	6.24%	1.83%	6.70%	3.42%
11/12/2020	Media	4.99	1.45	33.77	76.23	171.32
	Desviación Estándar	0.59	0.13	0.92	5.36	4.86
	Coeficiente de variación	11.86%	8.79%	2.72%	7.03%	2.84%
12/12/2020	Media	5.03	1.40	34.88	75.00	173.41
	Desviación Estándar	0.58	0.11	1.07	5.31	4.97
	Coeficiente de variación	11.45%	7.90%	3.07%	7.08%	2.87%
13/12/2020	Media	4.93	1.37	35.15	74.62	171.47
	Desviación Estándar	0.58	0.07	0.63	4.44	5.73
	Coeficiente de variación	11.77%	4.84%	1.78%	5.95%	3.34%
14/12/2020	Media	5.15	1.44	35.38	74.85	171.47
	Desviación Estándar	0.62	0.14	1.08	5.42	5.29
	Coeficiente de variación	12.01%	9.60%	3.05%	7.24%	3.09%
15/12/2020	Media	5.23	1.37	35.53	74.37	168.92
	Desviación Estándar	0.57	0.08	0.80	4.33	5.24
	Coeficiente de variación	10.89%	5.62%	2.24%	5.82%	3.10%
16/12/2020	Media	5.11	1.40	35.70	75.30	170.00
	Desviación Estándar	0.47	0.11	0.68	4.32	6.09
	Coeficiente de variación	9.26%	7.55%	1.90%	5.73%	3.58%
17/12/2020	Media	5.18	1.37	36.09	77.14	173.41
	Desviación Estándar	0.65	0.13	0.97	5.50	5.09
	Coeficiente de variación	12.60%	9.74%	2.69%	7.13%	2.93%
18/12/2020	Media	5.52	1.53	35.00	68.95	169.22
	Desviación Estándar	0.80	0.15	0.66	5.61	4.41
	Coeficiente de variación	14.57%	10.02%	1.87%	8.14%	2.60%
19/12/2020	Media	5.56	1.47	35.05	69.82	167.81
	Desviación Estándar	0.56	0.09	0.87	3.69	2.96
	Coeficiente de variación	10.12%	6.01%	2.47%	5.28%	1.77%
20/12/2020	Media	4.88	1.16	35.23	75.33	170.00
	Desviación Estándar	0.88	0.35	0.74	7.28	8.41
	Coeficiente de variación	18.01%	30.06%	2.09%	9.67%	4.95%

21/12/2020	Media	5.42	1.46	35.67	73.77	168.88
	Desviación Estándar	0.63	0.08	0.89	3.61	3.18
	Coeficiente de variación	11.60%	5.71%	2.50%	4.90%	1.89%
22/12/2020	Media	5.27	1.42	35.18	72.95	169.80
	Desviación Estándar	0.39	0.08	0.66	3.88	2.78
	Coeficiente de variación	7.32%	5.39%	1.87%	5.31%	1.63%
23/12/2020	Media	4.83	1.44	34.95	74.27	173.54
	Desviación Estándar	0.55	0.22	0.75	6.72	5.06
	Coeficiente de variación	11.37%	14.91%	2.15%	9.05%	2.91%
24/12/2020	Media	5.19	1.37	35.75	77.37	172.55
	Desviación Estándar	0.54	0.08	1.22	4.94	6.55
	Coeficiente de variación	10.38%	6.12%	3.42%	6.38%	3.80%
25/12/2020	Media	4.97	1.41	34.71	75.48	169.60
	Desviación Estándar	0.69	0.10	0.91	6.85	3.94
	Coeficiente de variación	13.81%	7.09%	2.61%	9.08%	2.33%
26/12/2020	Media	5.40	1.46	33.35	72.86	170.11
	Desviación Estándar	0.69	0.09	0.64	4.12	3.64
	Coeficiente de variación	12.78%	6.25%	1.92%	5.65%	2.14%
27/12/2020	Media	5.30	1.47	33.38	73.15	170.01
	Desviación Estándar	0.67	0.08	0.64	2.78	3.07
	Coeficiente de variación	12.65%	5.30%	1.91%	3.80%	1.80%
28/12/2020	Media	5.01	1.43	33.92	75.17	172.94
	Desviación Estándar	0.52	0.07	0.87	3.44	3.82
	Coeficiente de variación	10.39%	4.75%	2.56%	4.57%	2.21%
29/12/2020	Media	5.31	1.62	34.26	72.94	169.77
	Desviación Estándar	0.67	0.15	0.84	4.46	5.40
	Coeficiente de variación	12.58%	8.99%	2.44%	6.12%	3.18%
30/12/2020	Media	5.59	1.71	34.34	70.72	167.09
	Desviación Estándar	0.58	0.16	0.84	4.90	5.67
	Coeficiente de variación	10.44%	9.19%	2.44%	6.93%	3.40%
31/12/2020	Media	5.61	1.45	34.34	73.22	170.18
	Desviación Estándar	0.56	0.06	0.66	4.17	5.52
	Coeficiente de variación	10.03%	4.03%	1.93%	5.69%	3.24%
1/1/2021	Media	5.48	1.45	34.89	73.85	172.07
	Desviación Estándar	0.68	0.07	1.12	4.09	3.70
	Coeficiente de variación	12.45%	5.12%	3.20%	5.54%	2.15%
2/1/2021	Media	5.48	1.47	35.27	70.89	167.96
	Desviación Estándar	0.68	0.07	0.85	4.04	4.02
	Coeficiente de variación	12.42%	5.06%	2.41%	5.70%	2.40%
3/1/2021	Media	5.82	1.49	35.56	71.80	169.84
	Desviación Estándar	0.60	0.06	1.00	3.57	4.98

	Coeficiente de variación	10.26%	4.05%	2.80%	4.98%	2.93%
4/1/2021	Media	5.43	1.45	36.09	73.41	170.87
	Desviación Estándar	0.66	0.06	0.90	4.19	5.28
	Coeficiente de variación	12.20%	4.12%	2.48%	5.71%	3.09%
5/1/2021	Media	5.16	1.46	35.38	76.08	173.02
	Desviación Estándar	0.38	0.04	0.75	2.57	3.62
	Coeficiente de variación	7.36%	3.02%	2.12%	3.37%	2.09%
6/1/2021	Media	5.34	1.47	34.80	71.38	167.93
	Desviación Estándar	0.73	0.09	0.86	5.19	6.35
	Coeficiente de variación	13.71%	6.22%	2.47%	7.28%	3.78%
7/1/2021	Media	5.76	1.48	34.83	71.16	171.57
	Desviación Estándar	0.59	0.07	0.89	4.50	4.35
	Coeficiente de variación	10.22%	4.42%	2.56%	6.33%	2.53%
8/1/2021	Media	5.73	1.48	34.70	68.61	167.33
	Desviación Estándar	0.59	0.08	0.59	4.58	4.95
	Coeficiente de variación	10.26%	5.61%	1.69%	6.68%	2.96%
9/1/2021	Media	5.95	1.48	34.56	67.90	167.03
	Desviación Estándar	0.66	0.08	0.78	4.29	5.04
	Coeficiente de variación	11.05%	5.45%	2.27%	6.32%	3.02%
10/1/2021	Media	6.04	1.46	34.53	69.24	169.94
	Desviación Estándar	0.72	0.10	0.87	4.91	4.88
	Coeficiente de variación	11.96%	6.73%	2.51%	7.09%	2.87%
11/1/2021	Media	5.61	1.49	34.65	68.66	167.56
	Desviación Estándar	0.70	0.11	0.99	3.46	4.80
	Coeficiente de variación	12.44%	7.25%	2.85%	5.04%	2.87%
12/1/2021	Media	5.06	1.50	34.68	70.10	168.94
	Desviación Estándar	0.61	0.09	0.74	4.70	4.14
	Coeficiente de variación	12.09%	6.22%	2.14%	6.70%	2.45%
13/1/2021	Media	5.15	1.45	34.91	71.63	165.99
	Desviación Estándar	0.59	0.09	0.77	3.94	6.43
	Coeficiente de variación	11.47%	6.03%	2.20%	5.51%	3.87%
14/1/2021	Media	5.29	1.45	33.60	71.38	164.15
	Desviación Estándar	0.64	0.08	0.47	4.70	8.05
	Coeficiente de variación	12.05%	5.84%	1.40%	6.58%	4.91%
15/1/2021	Media	5.14	1.45	33.60	73.69	169.02
	Desviación Estándar	0.48	0.07	0.59	4.16	5.72
	Coeficiente de variación	9.40%	5.18%	1.75%	5.65%	3.39%
16/1/2021	Media	5.36	1.45	34.01	72.15	166.28
	Desviación Estándar	0.60	0.08	0.61	4.27	4.55
	Coeficiente de variación	11.23%	5.42%	1.81%	5.92%	2.74%
17/1/2021	Media	5.87	1.41	33.82	70.13	164.01

	Desviación Estándar	0.70	0.17	0.71	4.38	5.14
	Coeficiente de variación	11.85%	11.87%	2.09%	6.25%	3.13%
18/1/2021	Media	5.52	1.39	32.88	73.32	170.15
	Desviación Estándar	0.64	0.09	0.55	4.40	3.87
	Coeficiente de variación	11.55%	6.14%	1.67%	6.00%	2.28%
19/1/2021	Media	5.74	1.43	33.30	70.03	166.98
	Desviación Estándar	0.81	0.18	0.92	4.40	5.43
	Coeficiente de variación	14.10%	12.78%	2.75%	6.28%	3.25%
20/1/2021	Media	5.37	1.47	33.86	72.12	167.53
	Desviación Estándar	0.56	0.07	0.83	2.67	3.38
	Coeficiente de variación	10.49%	4.85%	2.45%	3.70%	2.02%
21/1/2021	Media	5.59	1.44	33.80	72.49	170.22
	Desviación Estándar	0.78	0.07	0.96	2.53	4.60
	Coeficiente de variación	14.04%	4.95%	2.84%	3.50%	2.70%
22/1/2021	Media	5.51	1.38	34.50	72.04	168.93
	Desviación Estándar	0.61	0.18	1.05	4.57	5.22
	Coeficiente de variación	11.04%	13.29%	3.04%	6.34%	3.09%
23/1/2021	Media	5.63	1.38	34.33	70.95	166.98
	Desviación Estándar	0.58	0.07	0.88	3.20	3.56
	Coeficiente de variación	10.31%	4.94%	2.55%	4.51%	2.13%
24/1/2021	Media	5.56	1.35	34.93	73.79	171.39
	Desviación Estándar	0.71	0.08	0.72	3.67	5.19
	Coeficiente de variación	12.71%	5.69%	2.07%	4.97%	3.03%
25/1/2021	Media	5.51	1.34	34.53	73.65	172.22
	Desviación Estándar	0.83	0.10	0.88	4.29	4.58
	Coeficiente de variación	15.12%	7.11%	2.55%	5.83%	2.66%
26/1/2021	Media	5.07	1.36	34.87	74.82	171.31
	Desviación Estándar	0.48	0.08	1.10	4.58	4.49
	Coeficiente de variación	9.56%	6.23%	3.15%	6.12%	2.62%
27/1/2021	Media	5.02	1.38	35.33	73.61	169.30
	Desviación Estándar	0.43	0.08	1.21	4.30	5.09
	Coeficiente de variación	8.55%	5.75%	3.44%	5.84%	3.00%
28/1/2021	Media	5.38	1.41	34.66	71.52	169.12
	Desviación Estándar	0.55	0.11	0.52	4.87	6.44
	Coeficiente de variación	10.32%	8.18%	1.51%	6.81%	3.81%
29/1/2021	Media	5.34	1.42	33.55	71.70	168.67
	Desviación Estándar	0.66	0.09	0.69	4.70	5.88
	Coeficiente de variación	12.35%	6.08%	2.06%	6.55%	3.49%
30/1/2021	Media	5.82	1.52	33.65	65.48	162.39
	Desviación Estándar	0.71	0.09	0.80	3.81	4.08
	Coeficiente de variación	12.24%	5.61%	2.38%	5.83%	2.51%

31/1/2021	Media	5.59	1.54	33.82	69.14	167.36
	Desviación Estándar	0.13	0.03	0.37	3.28	3.70
	Coeficiente de variación	2.40%	2.18%	1.09%	4.75%	2.21%
1/2/2021	Media	5.77	1.49	34.01	68.17	165.48
	Desviación Estándar	0.61	0.09	0.57	5.30	7.14
	Coeficiente de variación	10.54%	6.12%	1.67%	7.77%	4.32%
2/2/2021	Media	5.78	1.50	32.47	66.12	163.56
	Desviación Estándar	0.68	0.07	0.59	3.46	2.60
	Coeficiente de variación	11.83%	4.65%	1.81%	5.24%	1.59%
3/2/2021	Media	5.74	1.52	33.13	67.10	165.55
	Desviación Estándar	0.76	0.08	0.98	4.84	6.80
	Coeficiente de variación	13.24%	5.17%	2.97%	7.21%	4.10%
4/2/2021	Media	5.53	1.60	33.53	68.63	165.98
	Desviación Estándar	0.50	0.09	1.15	3.50	4.62
	Coeficiente de variación	9.06%	5.80%	3.44%	5.11%	2.78%
5/2/2021	Media	5.40	1.55	33.99	68.38	162.34
	Desviación Estándar	0.68	0.09	0.92	4.64	5.76
	Coeficiente de variación	12.60%	5.89%	2.69%	6.78%	3.55%
6/2/2021	Media	5.49	1.53	34.47	71.57	167.14
	Desviación Estándar	0.66	0.07	0.88	3.42	3.83
	Coeficiente de variación	12.05%	4.46%	2.54%	4.78%	2.29%
7/2/2021	Media	5.44	1.52	35.70	70.36	164.72
	Desviación Estándar	0.78	0.09	1.16	5.97	6.48
	Coeficiente de variación	14.42%	6.16%	3.24%	8.48%	3.94%
8/2/2021	Media	5.60	1.58	35.49	68.79	163.51
	Desviación Estándar	0.67	0.10	0.86	3.55	2.76
	Coeficiente de variación	12.02%	6.09%	2.43%	5.16%	1.69%
9/2/2021	Media	5.30	1.52	35.45	71.41	168.01
	Desviación Estándar	0.68	0.10	1.13	5.87	7.91
	Coeficiente de variación	12.77%	6.44%	3.20%	8.22%	4.71%
10/2/2021	Media	5.35	1.54	35.27	67.82	160.87
	Desviación Estándar	0.60	0.08	1.10	4.96	7.62
	Coeficiente de variación	11.28%	4.88%	3.12%	7.32%	4.74%
11/2/2021	Media	5.26	1.39	35.42	65.13	155.48
	Desviación Estándar	0.91	0.25	1.00	7.19	8.37
	Coeficiente de variación	17.35%	17.85%	2.83%	11.04%	5.38%
12/2/2021	Media	4.91	1.34	35.90	70.59	161.45
	Desviación Estándar	0.56	0.05	0.99	4.28	4.58
	Coeficiente de variación	11.42%	3.67%	2.77%	6.06%	2.84%
13/2/2021	Media	5.14	1.35	35.95	67.78	159.71
	Desviación Estándar	0.60	0.07	0.83	6.30	6.14

	Coeficiente de variación	11.75%	4.87%	2.31%	9.30%	3.84%
14/2/2021	Media	5.16	1.33	35.90	69.63	162.14
	Desviación Estándar	0.68	0.07	1.10	5.68	8.97
	Coeficiente de variación	13.20%	5.01%	3.08%	8.16%	5.53%
15/2/2021	Media	5.28	1.33	35.18	69.14	166.73
	Desviación Estándar	0.66	0.06	0.61	5.11	5.64
	Coeficiente de variación	12.43%	4.60%	1.72%	7.39%	3.38%
16/2/2021	Media	5.24	1.32	35.27	70.68	168.38
	Desviación Estándar	0.58	0.04	0.84	3.18	3.67
	Coeficiente de variación	11.02%	3.38%	2.39%	4.49%	2.18%
17/2/2021	Media	5.40	1.44	35.68	68.95	163.87
	Desviación Estándar	0.46	0.12	1.02	3.32	5.24
	Coeficiente de variación	8.45%	8.14%	2.86%	4.82%	3.20%
18/2/2021	Media	5.51	1.52	35.96	66.48	160.52
	Desviación Estándar	0.62	0.08	1.38	3.98	4.09
	Coeficiente de variación	11.17%	5.54%	3.84%	5.98%	2.55%
19/2/2021	Media	5.62	1.54	35.83	65.44	160.14
	Desviación Estándar	0.71	0.10	0.97	6.04	8.55
	Coeficiente de variación	12.59%	6.73%	2.70%	9.23%	5.34%
20/2/2021	Media	5.88	1.60	35.18	62.66	158.23
	Desviación Estándar	0.82	0.11	0.61	4.01	5.04
	Coeficiente de variación	13.97%	6.69%	1.74%	6.41%	3.19%
21/2/2021	Media	6.11	1.62	34.81	62.23	156.64
	Desviación Estándar	0.68	0.08	0.79	2.61	3.65
	Coeficiente de variación	11.11%	5.08%	2.28%	4.20%	2.33%
22/2/2021	Media	5.42	1.52	35.09	66.85	162.34
	Desviación Estándar	0.80	0.14	1.01	4.96	7.82
	Coeficiente de variación	14.79%	9.52%	2.87%	7.42%	4.82%
23/2/2021	Media	5.17	1.37	36.01	70.49	166.24
	Desviación Estándar	0.52	0.18	1.28	5.10	7.79
	Coeficiente de variación	10.04%	13.09%	3.56%	7.23%	4.68%
24/2/2021	Media	5.36	1.48	36.03	69.58	165.85
	Desviación Estándar	0.58	0.11	1.17	4.69	5.44
	Coeficiente de variación	10.89%	7.23%	3.25%	6.73%	3.28%
25/2/2021	Media	5.07	1.45	36.25	70.70	165.41
	Desviación Estándar	0.69	0.11	1.08	5.95	8.30
	Coeficiente de variación	13.68%	7.92%	2.97%	8.41%	5.02%
26/2/2021	Media	5.14	1.43	35.68	71.46	168.20
	Desviación Estándar	0.55	0.08	1.24	3.95	4.63
	Coeficiente de variación	10.67%	5.34%	3.47%	5.52%	2.75%
27/2/2021	Media	5.33	1.55	35.98	68.71	162.42

	Desviación Estándar	0.60	0.21	0.91	3.43	3.76
	Coeficiente de variación	11.23%	13.25%	2.53%	4.99%	2.31%
28/2/2021	Media	5.28	1.45	36.15	69.19	163.80
	Desviación Estándar	0.49	0.08	0.90	3.76	5.26
	Coeficiente de variación	9.24%	5.19%	2.48%	5.43%	3.21%
1/3/2021	Media	5.31	1.42	36.14	70.38	167.37
	Desviación Estándar	0.46	0.07	1.19	4.09	5.46
	Coeficiente de variación	8.72%	5.09%	3.30%	5.81%	3.26%
2/3/2021	Media	5.08	1.48	36.41	71.03	166.47
	Desviación Estándar	0.48	0.17	1.09	3.41	4.45
	Coeficiente de variación	9.40%	11.17%	2.99%	4.80%	2.67%
3/3/2021	Media	5.01	1.41	36.65	72.85	168.89
	Desviación Estándar	0.44	0.07	1.08	3.51	5.59
	Coeficiente de variación	8.82%	4.82%	2.96%	4.81%	3.31%
4/3/2021	Media	5.02	1.41	35.87	72.35	169.50
	Desviación Estándar	0.45	0.07	0.66	2.83	4.53
	Coeficiente de variación	9.04%	4.69%	1.83%	3.92%	2.67%
5/3/2021	Media	5.32	1.45	35.34	70.71	168.94
	Desviación Estándar	0.59	0.12	0.77	3.73	6.41
	Coeficiente de variación	11.07%	8.01%	2.19%	5.28%	3.80%
6/3/2021	Media	5.17	1.41	36.12	70.92	167.89
	Desviación Estándar	0.46	0.07	1.25	2.96	4.76
	Coeficiente de variación	8.97%	4.67%	3.47%	4.17%	2.84%
7/3/2021	Media	5.24	1.44	35.85	70.56	168.96
	Desviación Estándar	0.60	0.10	0.71	3.62	4.51
	Coeficiente de variación	11.37%	6.90%	1.98%	5.13%	2.67%
8/3/2021	Media	5.18	1.44	35.06	71.17	169.54
	Desviación Estándar	0.61	0.13	0.73	5.79	6.86
	Coeficiente de variación	11.72%	8.95%	2.08%	8.14%	4.05%
9/3/2021	Media	5.42	1.47	35.24	71.72	170.96
	Desviación Estándar	0.51	0.12	0.80	5.33	7.95
	Coeficiente de variación	9.38%	8.29%	2.27%	7.43%	4.65%
10/3/2021	Media	5.55	1.48	35.05	69.71	168.46
	Desviación Estándar	0.50	0.09	0.87	4.44	5.46
	Coeficiente de variación	8.99%	6.39%	2.49%	6.36%	3.24%
11/3/2021	Media	5.36	1.48	35.58	69.70	168.74
	Desviación Estándar	0.77	0.14	0.97	7.36	8.65
	Coeficiente de variación	14.38%	9.67%	2.74%	10.56%	5.13%
12/3/2021	Media	5.12	1.46	35.58	71.53	170.09
	Desviación Estándar	0.54	0.13	0.73	6.75	8.37
	Coeficiente de variación	10.56%	8.65%	2.04%	9.44%	4.92%

13/3/2021	Media	5.03	1.48	35.85	73.49	172.57
	Desviación Estándar	0.62	0.13	1.04	6.48	7.65
	Coeficiente de variación	12.26%	8.83%	2.90%	8.81%	4.43%
14/3/2021	Media	4.82	1.52	35.98	74.66	171.99
	Desviación Estándar	0.28	0.07	1.21	3.35	2.83
	Coeficiente de variación	5.75%	4.30%	3.35%	4.49%	1.65%
15/3/2021	Media	4.85	1.57	36.08	70.01	168.83
	Desviación Estándar	0.00	0.13	1.14	6.72	5.26
	Coeficiente de variación	0.00%	8.13%	3.17%	9.60%	3.11%
16/3/2021	Media	4.87	1.55	35.99	75.07	171.20
	Desviación Estándar	0.30	0.14	1.09	9.18	9.53
	Coeficiente de variación	6.08%	8.98%	3.03%	12.23%	5.57%
17/3/2021	Media	4.86	1.59	36.06	73.54	169.24
	Desviación Estándar	0.50	0.13	1.08	4.05	5.94
	Coeficiente de variación	10.23%	8.21%	2.99%	5.51%	3.51%
18/3/2021	Media	4.92	1.55	36.65	73.08	168.29
	Desviación Estándar	0.48	0.08	1.07	4.69	7.43
	Coeficiente de variación	9.68%	4.97%	2.91%	6.41%	4.41%
19/3/2021	Media	5.03	1.53	37.04	72.31	168.22
	Desviación Estándar	0.48	0.07	0.94	3.61	5.74
	Coeficiente de variación	9.58%	4.40%	2.53%	5.00%	3.41%
20/3/2021	Media	5.12	1.57	36.08	71.91	169.17
	Desviación Estándar	0.46	0.10	0.89	2.81	4.76
	Coeficiente de variación	9.02%	6.14%	2.47%	3.91%	2.81%
21/3/2021	Media	5.03	1.57	35.40	73.32	171.37
	Desviación Estándar	0.71	0.11	1.09	5.34	5.76
	Coeficiente de variación	14.19%	7.00%	3.09%	7.29%	3.36%
22/3/2021	Media	5.17	1.51	35.64	72.96	169.90
	Desviación Estándar	0.60	0.08	0.95	4.02	5.48
	Coeficiente de variación	11.64%	5.49%	2.68%	5.51%	3.22%
23/3/2021	Media	4.91	1.44	36.11	73.58	168.20
	Desviación Estándar	0.47	0.15	1.28	4.65	4.94
	Coeficiente de variación	9.63%	10.31%	3.55%	6.32%	2.94%
24/3/2021	Media	5.13	1.52	36.38	68.21	159.91
	Desviación Estándar	0.47	0.08	1.08	2.60	2.64
	Coeficiente de variación	9.22%	5.18%	2.97%	3.82%	1.65%
25/3/2021	Media	5.12	1.43	36.97	70.42	163.69
	Desviación Estándar	0.50	0.09	1.01	4.56	6.76
	Coeficiente de variación	9.82%	6.16%	2.74%	6.48%	4.13%
26/3/2021	Media	5.06	1.45	37.02	71.81	166.58
	Desviación Estándar	0.46	0.11	1.17	3.64	4.41

	Coeficiente de variación	9.05%	7.45%	3.15%	5.07%	2.65%
27/3/2021	Media	5.49	1.44	36.32	66.06	160.25
	Desviación Estándar	0.62	0.17	0.69	5.59	7.43
	Coeficiente de variación	11.21%	11.77%	1.91%	8.46%	4.64%
30/3/2021	Media	5.20	1.51	36.97	66.85	162.76
	Desviación Estándar	0.48	0.12	0.72	6.87	7.75
	Coeficiente de variación	9.20%	7.99%	1.96%	10.28%	4.76%
31/3/2021	Media	4.91	1.41	36.93	73.17	170.68
	Desviación Estándar	0.33	0.07	1.12	3.29	2.99
	Coeficiente de variación	6.63%	5.16%	3.04%	4.50%	1.75%
1/7/2022	Media	3.31	0.60	39.48	78.54	170.06
	Desviación Estándar	0.23	0.05	0.68	3.89	3.74
	Coeficiente de variación	6.88%	8.11%	1.72%	4.95%	2.20%
2/7/2022	Media	3.35	0.61	39.30	80.19	172.30
	Desviación Estándar	0.18	0.05	0.80	3.77	2.02
	Coeficiente de variación	5.44%	8.54%	2.03%	4.70%	1.17%
3/7/2022	Media	3.38	0.62	39.49	78.45	169.34
	Desviación Estándar	0.19	0.06	0.94	3.38	5.05
	Coeficiente de variación	5.56%	9.63%	2.39%	4.30%	2.98%
4/7/2022	Media	3.39	0.61	39.53	77.10	168.91
	Desviación Estándar	0.14	0.04	0.96	4.93	7.35
	Coeficiente de variación	4.11%	7.40%	2.43%	6.40%	4.35%
5/7/2022	Media	3.40	0.60	39.40	75.79	168.42
	Desviación Estándar	0.15	0.08	0.73	8.07	12.41
	Coeficiente de variación	4.30%	13.31%	1.85%	10.65%	7.37%
6/7/2022	Media	3.43	0.60	39.19	79.58	171.00
	Desviación Estándar	0.11	0.04	1.01	3.08	3.70
	Coeficiente de variación	3.31%	7.36%	2.57%	3.87%	2.16%
7/7/2022	Media	3.40	0.60	39.54	77.94	168.50
	Desviación Estándar	0.19	0.05	0.95	2.98	4.83
	Coeficiente de variación	5.45%	8.02%	2.40%	3.82%	2.87%
8/7/2022	Media	3.39	0.60	39.02	76.70	166.49
	Desviación Estándar	0.21	0.05	0.77	4.73	15.95
	Coeficiente de variación	6.07%	8.61%	1.99%	6.16%	9.58%
9/7/2022	Media	3.44	0.59	38.28	77.07	172.54
	Desviación Estándar	0.11	0.05	1.18	4.48	4.61
	Coeficiente de variación	3.25%	9.09%	3.07%	5.81%	2.67%
10/7/2022	Media	3.50	0.57	38.01	68.84	177.47
	Desviación Estándar	0.01	0.04	0.62	11.42	1.15
	Coeficiente de variación	0.24%	6.56%	1.64%	16.58%	0.65%
15/7/2022	Media	3.27	0.56	38.65	79.92	172.78

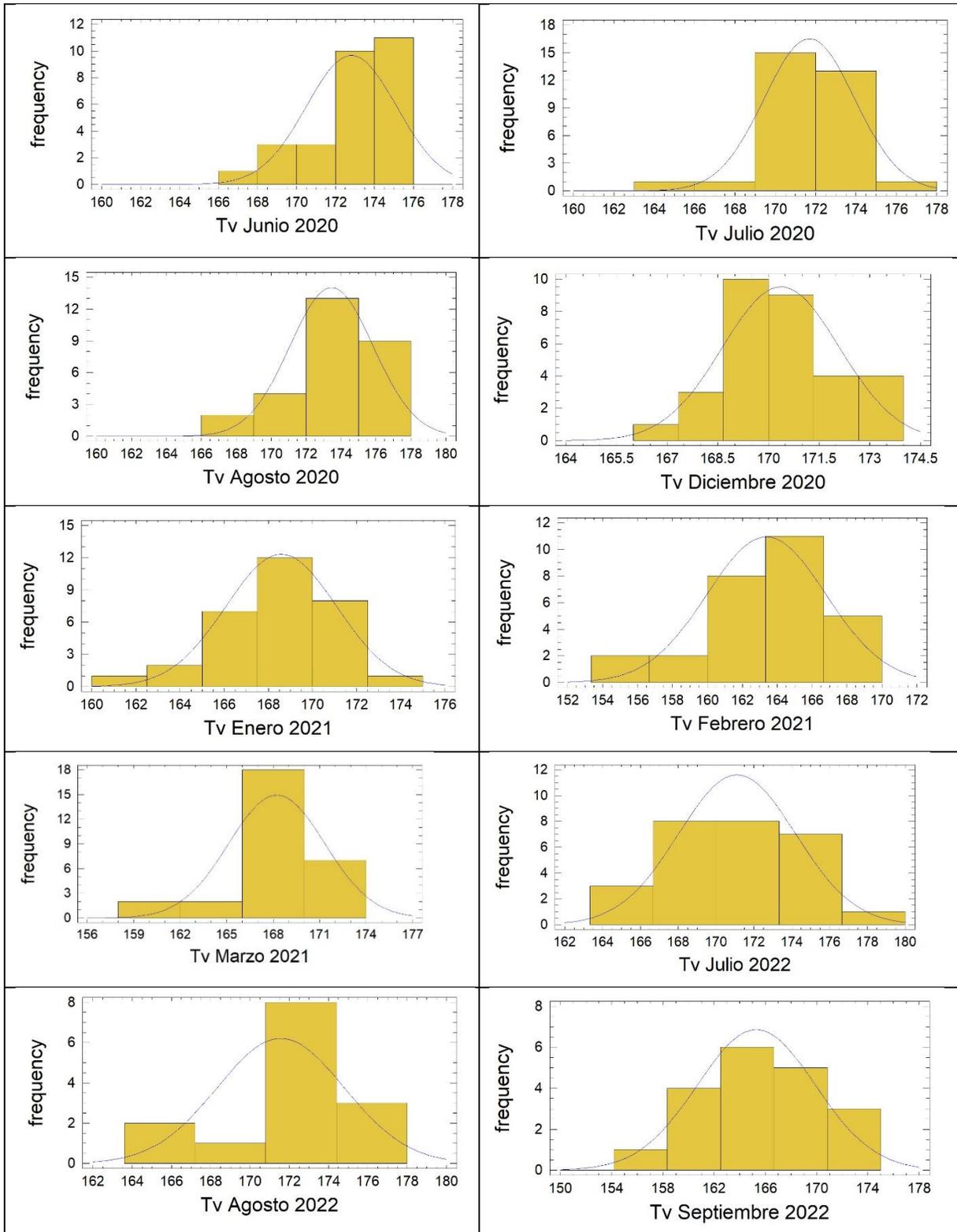
	Desviación Estándar	0.22	0.03	0.62	3.99	4.54
	Coeficiente de variación	6.87%	6.11%	1.62%	4.99%	2.63%
16/7/2022	Media	3.23	0.57	38.78	74.40	168.01
	Desviación Estándar	0.23	0.06	0.81	3.10	11.80
	Coeficiente de variación	7.01%	10.56%	2.09%	4.16%	7.02%
17/7/2022	Media	3.21	0.57	38.67	72.55	169.04
	Desviación Estándar	0.24	0.07	0.90	4.06	6.00
	Coeficiente de variación	7.50%	11.43%	2.34%	5.60%	3.55%
18/7/2022	Media	3.34	0.62	38.67	71.84	166.61
	Desviación Estándar	0.12	0.07	1.10	4.38	6.55
	Coeficiente de variación	3.65%	10.49%	2.85%	6.10%	3.93%
19/7/2022	Media	3.25	0.58	39.35	73.47	171.22
	Desviación Estándar	0.23	0.05	1.31	5.02	5.20
	Coeficiente de variación	7.09%	8.59%	3.32%	6.84%	3.04%
20/7/2022	Media	3.33	0.59	40.00	76.07	174.05
	Desviación Estándar	0.19	0.03	1.03	3.91	4.98
	Coeficiente de variación	5.77%	5.52%	2.59%	5.14%	2.86%
21/7/2022	Media	3.25	0.60	40.13	73.39	175.64
	Desviación Estándar	0.28	0.04	1.23	4.23	2.29
	Coeficiente de variación	8.58%	6.11%	3.08%	5.76%	1.30%
22/7/2022	Media	3.23	0.62	40.27	72.34	170.23
	Desviación Estándar	0.32	0.07	1.59	5.65	5.33
	Coeficiente de variación	9.80%	11.15%	3.96%	7.81%	3.13%
23/7/2022	Media	3.32	0.57	39.03	72.09	173.75
	Desviación Estándar	0.24	0.04	0.89	3.53	4.40
	Coeficiente de variación	7.29%	7.13%	2.27%	4.90%	2.53%
24/7/2022	Media	3.36	0.59	39.08	73.15	173.38
	Desviación Estándar	0.22	0.05	0.84	2.81	4.13
	Coeficiente de variación	6.52%	8.28%	2.16%	3.85%	2.38%
25/7/2022	Media	3.46	0.60	39.56	73.18	168.67
	Desviación Estándar	0.07	0.05	0.99	3.01	5.18
	Coeficiente de variación	2.16%	8.12%	2.50%	4.12%	3.07%
26/7/2022	Media	3.46	0.61	39.21	72.03	168.15
	Desviación Estándar	0.11	0.06	0.57	4.18	7.82
	Coeficiente de variación	3.26%	9.66%	1.45%	5.80%	4.65%
27/7/2022	Media	3.47	0.63	38.73	73.09	174.70
	Desviación Estándar	0.08	0.05	1.04	3.54	2.90
	Coeficiente de variación	2.41%	8.16%	2.68%	4.84%	1.66%
28/7/2022	Media	3.45	0.63	39.50	73.53	175.81
	Desviación Estándar	0.11	0.06	0.85	2.57	2.75
	Coeficiente de variación	3.17%	9.26%	2.14%	3.49%	1.57%

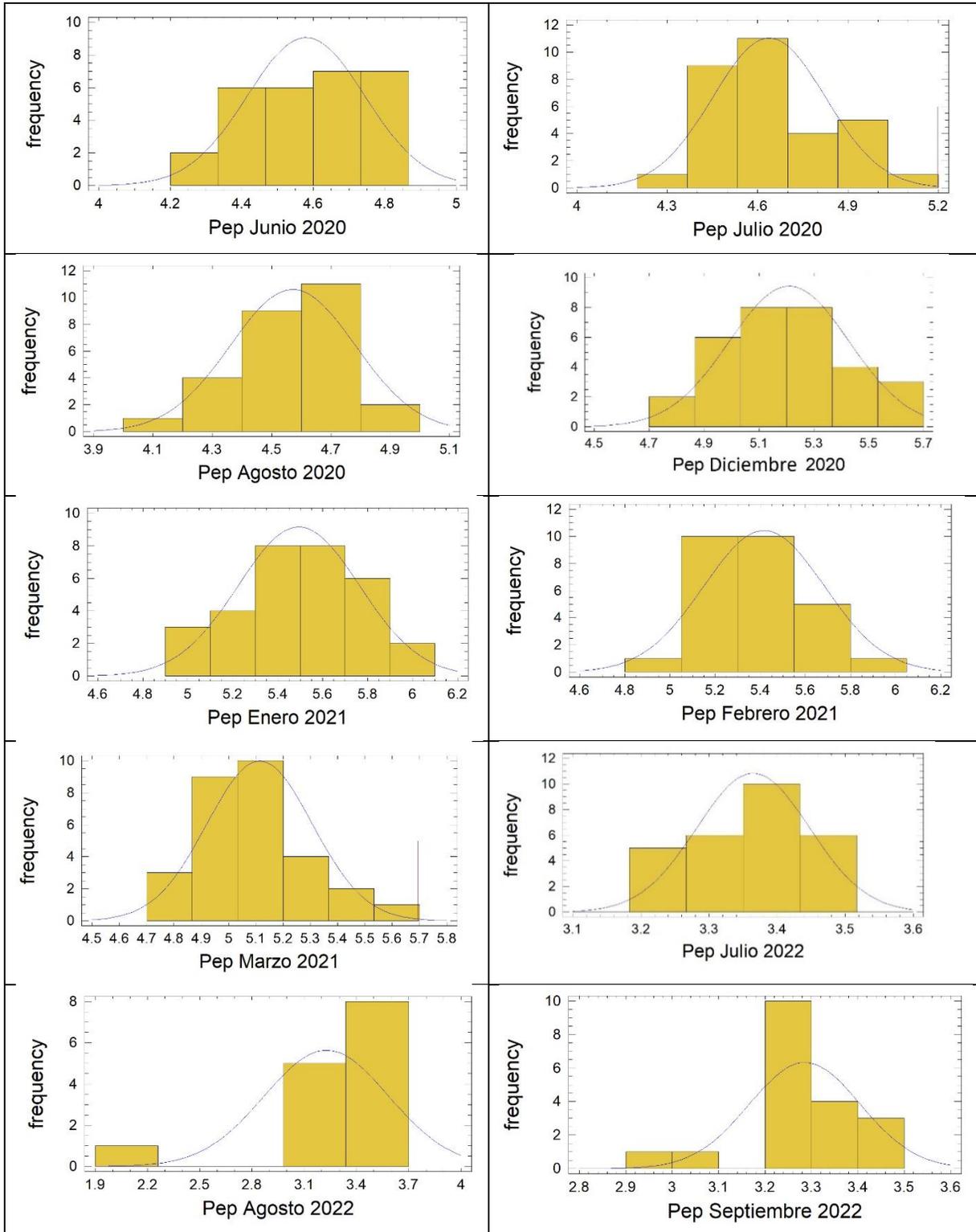
29/7/2022	Media	3.42	0.59	39.55	74.68	172.14
	Desviación Estándar	0.17	0.04	1.04	3.49	3.12
	Coeficiente de variación	4.83%	7.07%	2.64%	4.68%	1.81%
30/7/2022	Media	3.38	0.59	38.89	76.27	174.32
	Desviación Estándar	0.16	0.06	0.91	2.54	2.45
	Coeficiente de variación	4.81%	9.90%	2.34%	3.33%	1.40%
31/7/2022	Media	3.43	0.60	39.10	76.48	166.50
	Desviación Estándar	0.16	0.05	0.97	2.89	5.20
	Coeficiente de variación	4.77%	8.49%	2.47%	3.77%	3.13%
1/8/2022	Media	3.37	0.60	39.73	76.37	169.93
	Desviación Estándar	0.20	0.05	1.02	3.54	5.79
	Coeficiente de variación	5.79%	9.05%	2.57%	4.64%	3.41%
2/8/2022	Media	3.44	0.68	39.75	76.10	171.35
	Desviación Estándar	0.11	0.13	0.86	2.69	5.08
	Coeficiente de variación	3.23%	18.62%	2.16%	3.53%	2.96%
3/8/2022	Media	3.40	0.60	39.77	76.00	174.88
	Desviación Estándar	0.16	0.06	0.82	3.83	4.23
	Coeficiente de variación	4.72%	10.51%	2.07%	5.04%	2.42%
4/8/2022	Media	3.47	0.60	39.59	77.24	171.00
	Desviación Estándar	0.07	0.05	0.65	3.43	5.67
	Coeficiente de variación	1.96%	8.01%	1.63%	4.44%	3.32%
5/8/2022	Media	3.43	0.62	39.36	75.73	171.92
	Desviación Estándar	0.13	0.13	0.68	4.01	5.15
	Coeficiente de variación	3.80%	20.43%	1.72%	5.30%	2.99%
6/8/2022	Media	3.37	0.62	39.61	71.35	171.75
	Desviación Estándar	0.17	0.07	0.89	3.44	6.10
	Coeficiente de variación	4.98%	10.90%	2.25%	4.81%	3.55%
7/8/2022	Media	3.38	0.63	39.77	71.51	173.12
	Desviación Estándar	0.16	0.07	0.54	3.69	9.94
	Coeficiente de variación	4.79%	10.83%	1.36%	5.16%	5.74%
8/8/2022	Media	3.07	0.60	39.75	69.23	175.72
	Desviación Estándar	0.66	0.18	1.25	8.33	5.37
	Coeficiente de variación	21.55%	29.56%	3.14%	12.04%	3.05%
10/8/2022	Media	2.07	0.75	37.68	61.73	173.19
	Desviación Estándar	0.92	0.19	2.95	10.46	12.85
	Coeficiente de variación	44.52%	24.91%	7.84%	16.94%	7.42%
11/8/2022	Media	3.11	0.61	36.49	68.57	171.77
	Desviación Estándar	0.60	0.10	1.26	6.23	5.31
	Coeficiente de variación	19.28%	16.10%	3.45%	9.08%	3.09%
12/8/2022	Media	3.28	0.56	38.39	76.09	165.37
	Desviación Estándar	0.19	0.03	0.84	2.85	7.74

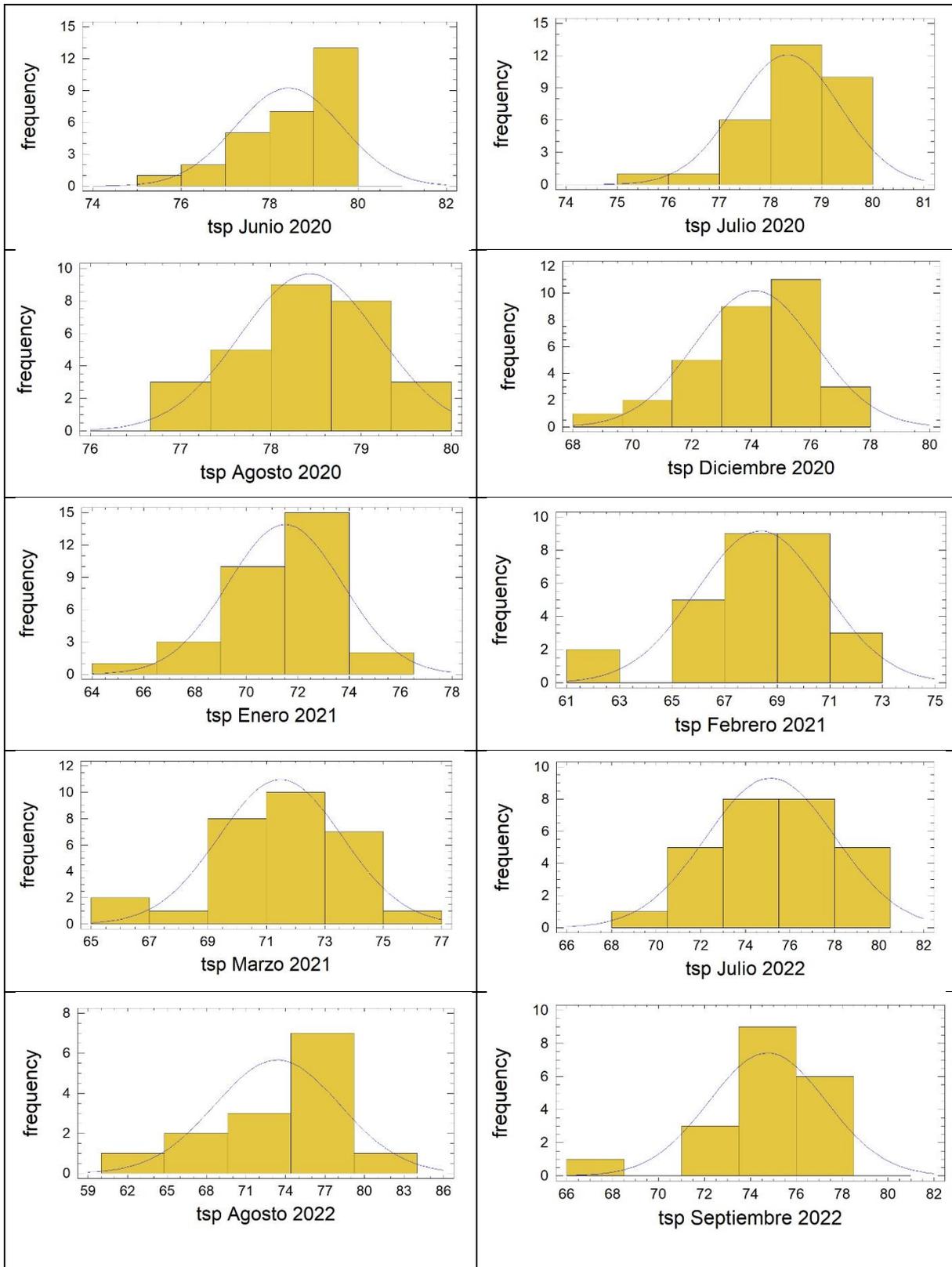
	Coeficiente de variación	5.79%	5.69%	2.19%	3.75%	4.68%
13/8/2022	Media	3.38	0.58	38.89	71.84	171.13
	Desviación Estándar	0.16	0.04	0.65	5.32	9.38
	Coeficiente de variación	4.60%	6.06%	1.68%	7.40%	5.48%
14/8/2022	Media	3.28	0.56	39.11	74.90	164.96
	Desviación Estándar	0.23	0.04	0.61	3.30	3.65
	Coeficiente de variación	7.04%	7.64%	1.57%	4.41%	2.21%
15/8/2022	Media	3.13	0.54	39.12	80.63	175.76
	Desviación Estándar	0.19	0.02	0.33	2.88	2.07
	Coeficiente de variación	5.95%	3.72%	0.83%	3.57%	1.18%
1/9/2022	Media	3.26	0.62	38.65	75.45	173.16
	Desviación Estándar	0.59	0.14	0.84	7.27	6.09
	Coeficiente de variación	17.99%	23.16%	2.18%	9.64%	3.51%
2/9/2022	Media	3.28	0.54	39.09	74.35	167.54
	Desviación Estándar	0.16	0.02	0.73	2.94	5.82
	Coeficiente de variación	5.01%	4.04%	1.87%	3.96%	3.47%
3/9/2022	Media	3.24	0.57	39.35	77.08	165.77
	Desviación Estándar	0.21	0.03	0.62	2.26	3.25
	Coeficiente de variación	6.46%	5.66%	1.57%	2.93%	1.96%
4/9/2022	Media	3.30	0.58	39.43	77.15	167.20
	Desviación Estándar	0.19	0.02	0.78	3.39	4.77
	Coeficiente de variación	5.85%	4.27%	1.99%	4.39%	2.85%
5/9/2022	Media	3.29	0.58	39.43	75.52	168.31
	Desviación Estándar	0.24	0.04	0.70	4.71	6.47
	Coeficiente de variación	7.43%	6.18%	1.76%	6.23%	3.84%
6/9/2022	Media	3.24	0.56	39.53	78.11	172.23
	Desviación Estándar	0.21	0.03	0.48	3.92	4.22
	Coeficiente de variación	6.55%	5.97%	1.21%	5.03%	2.45%
7/9/2022	Media	3.32	0.58	39.41	71.86	162.78
	Desviación Estándar	0.21	0.03	0.90	4.27	8.72
	Coeficiente de variación	6.43%	5.76%	2.30%	5.95%	5.36%
8/9/2022	Media	3.24	0.56	39.30	74.33	163.86
	Desviación Estándar	0.23	0.03	0.52	3.06	8.68
	Coeficiente de variación	7.06%	4.97%	1.33%	4.12%	5.30%
9/9/2022	Media	2.96	0.70	39.81	76.47	162.14
	Desviación Estándar	0.76	0.19	1.76	9.75	10.97
	Coeficiente de variación	25.72%	26.89%	4.41%	12.75%	6.76%
10/9/2022	Media	3.42	0.64	40.00	74.67	167.09
	Desviación Estándar	0.16	0.14	1.02	5.80	5.60
	Coeficiente de variación	4.56%	22.43%	2.55%	7.77%	3.35%
11/9/2022	Media	3.44	0.60	39.94	75.56	171.13

	Desviación Estándar	0.11	0.07	1.09	3.20	5.82
	Coeficiente de variación	3.30%	10.92%	2.73%	4.23%	3.40%
12/9/2022	Media	3.36	0.62	40.40	74.76	164.27
	Desviación Estándar	0.21	0.09	0.96	4.47	18.15
	Coeficiente de variación	6.11%	15.38%	2.38%	5.98%	11.05%
13/9/2022	Media	3.30	0.62	40.10	77.05	159.46
	Desviación Estándar	0.22	0.15	0.72	3.36	13.71
	Coeficiente de variación	6.69%	24.05%	1.78%	4.36%	8.60%
14/9/2022	Media	3.07	0.65	38.74	73.89	159.40
	Desviación Estándar	0.88	0.13	0.91	5.92	20.63
	Coeficiente de variación	28.82%	19.78%	2.35%	8.01%	12.94%
15/9/2022	Media	3.29	0.83	38.43	67.05	154.67
	Desviación Estándar	0.50	0.42	0.69	6.30	10.70
	Coeficiente de variación	15.13%	50.17%	1.79%	9.39%	6.92%
16/9/2022	Media	3.44	0.60	38.90	72.25	166.34
	Desviación Estándar	0.12	0.06	1.05	3.91	4.81
	Coeficiente de variación	3.48%	9.33%	2.70%	5.41%	2.89%
17/9/2022	Media	3.21	0.67	39.22	73.77	162.24
	Desviación Estándar	0.51	0.28	0.48	4.35	15.40
	Coeficiente de variación	15.86%	42.06%	1.22%	5.90%	9.49%
18/9/2022	Media	3.38	0.59	38.43	73.48	165.52
	Desviación Estándar	0.19	0.07	0.60	4.33	9.50
	Coeficiente de variación	5.66%	12.40%	1.56%	5.90%	5.74%
19/9/2022	Media	3.39	0.56	38.35	77.46	167.41
	Desviación Estándar	0.14	0.03	0.51	1.59	2.26
	Coeficiente de variación	4.15%	5.41%	1.33%	2.05%	1.35%

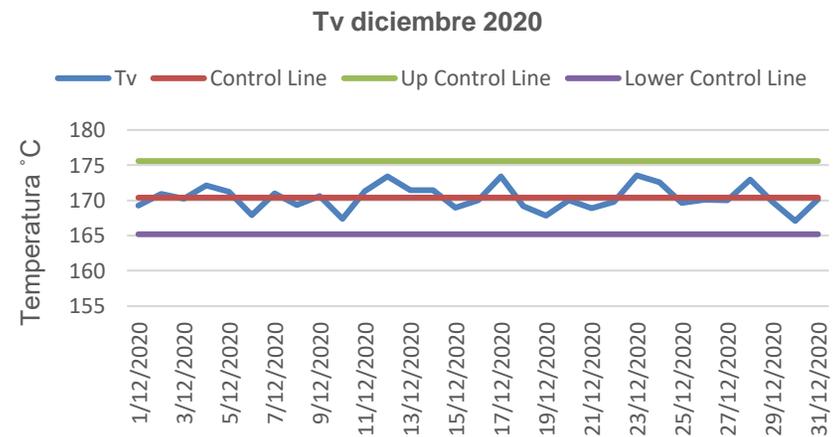
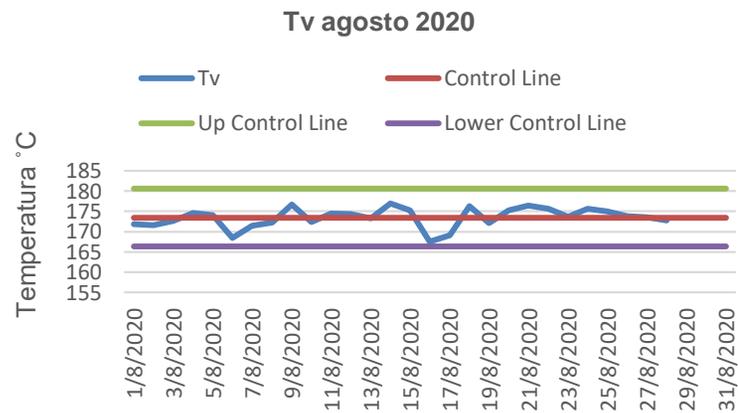
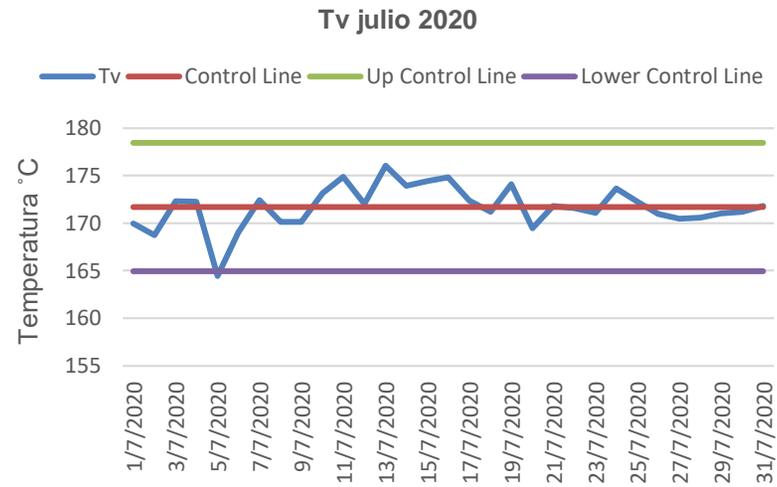
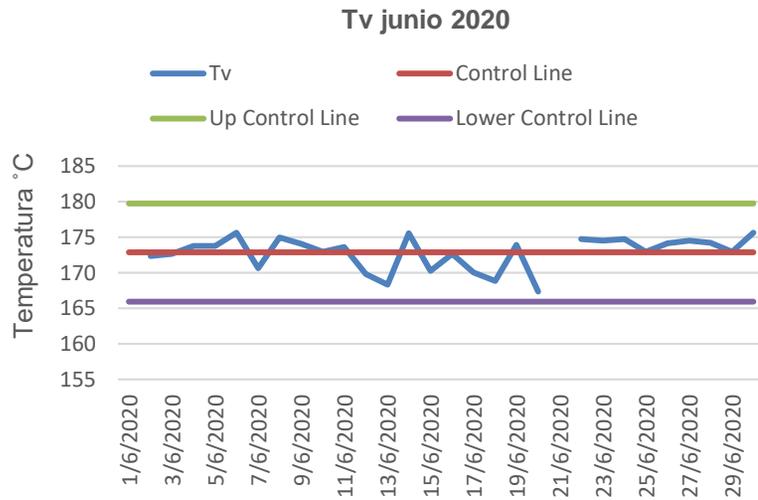
Anexo 6: Histogramas de frecuencia para las variables analizadas.



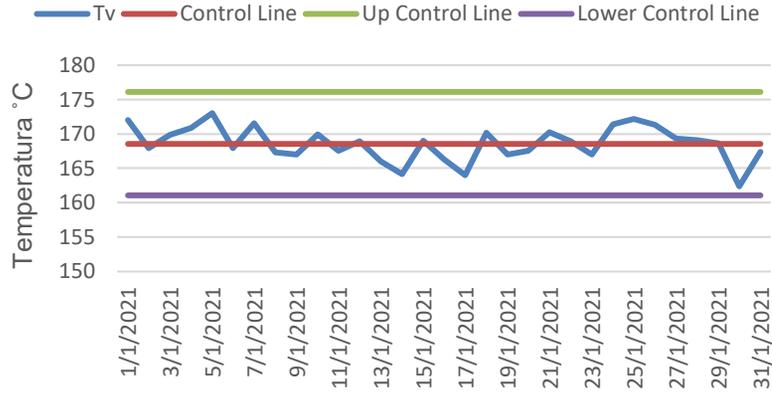




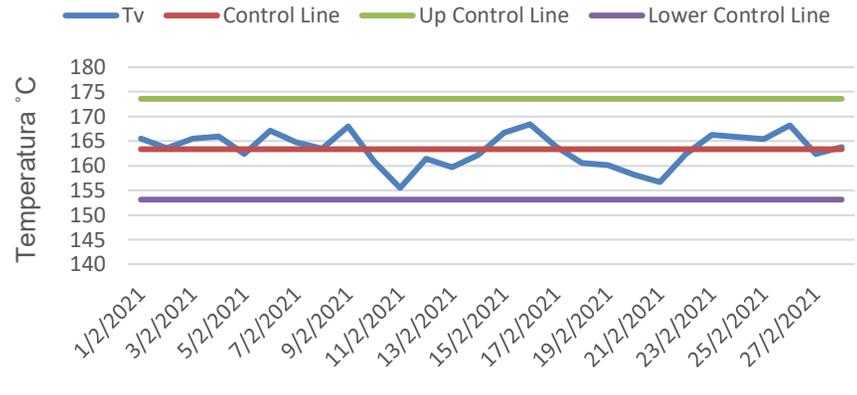
Anexo 7: Cartas de control estadístico para las variables: temperatura de salida de petróleo y temperatura de vapor para los meses de junio, julio, agosto y diciembre del 2020, enero, febrero y marzo del 2021 y julio, agosto y septiembre del 2022.



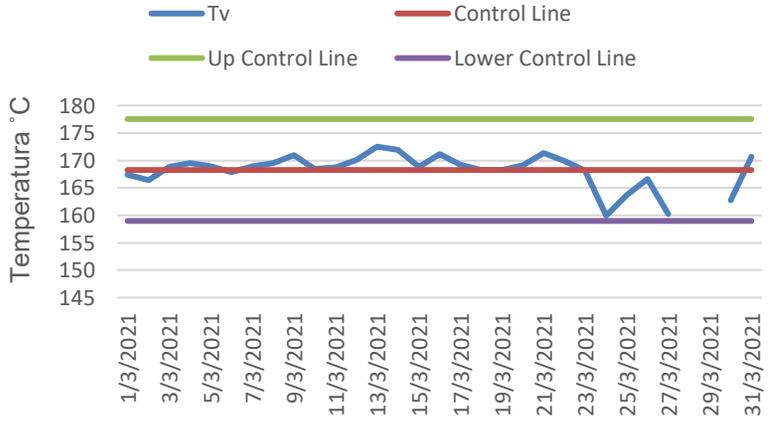
Tv enero 2021



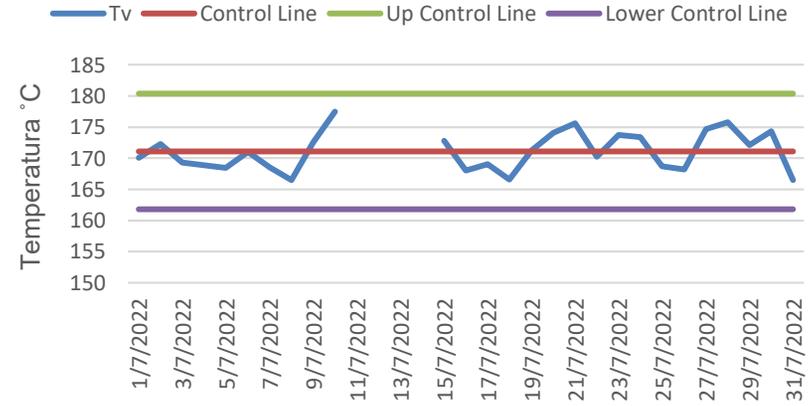
Tv febrero 2021



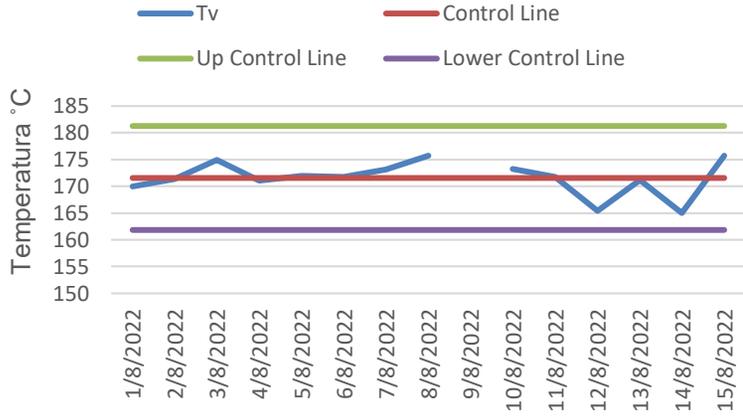
Tv marzo 2021



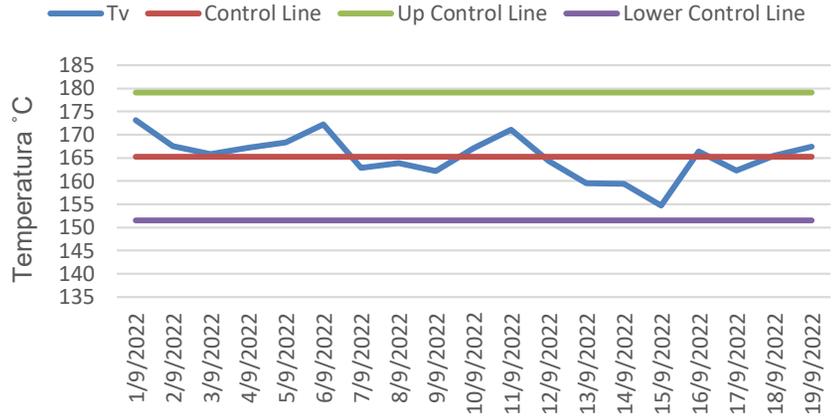
Tv julio 2022



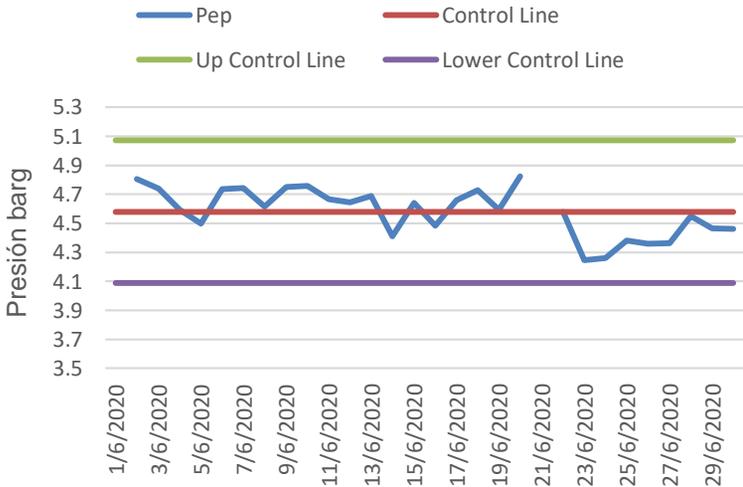
Tv agosto 2022



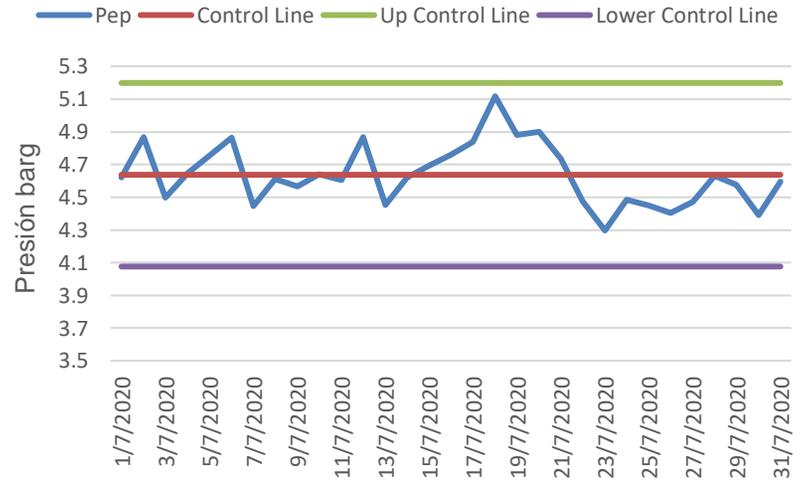
Tv septiembre 2022



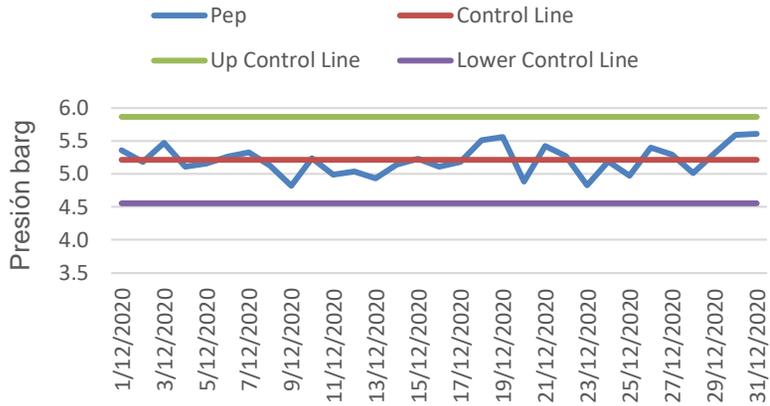
Pep junio 2020



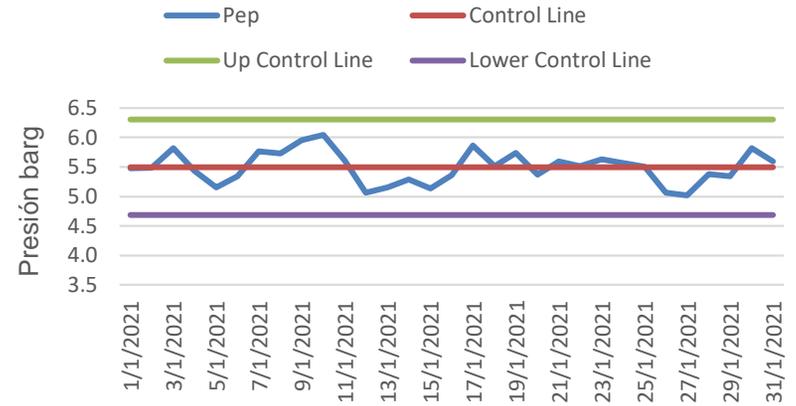
Pep julio 2020



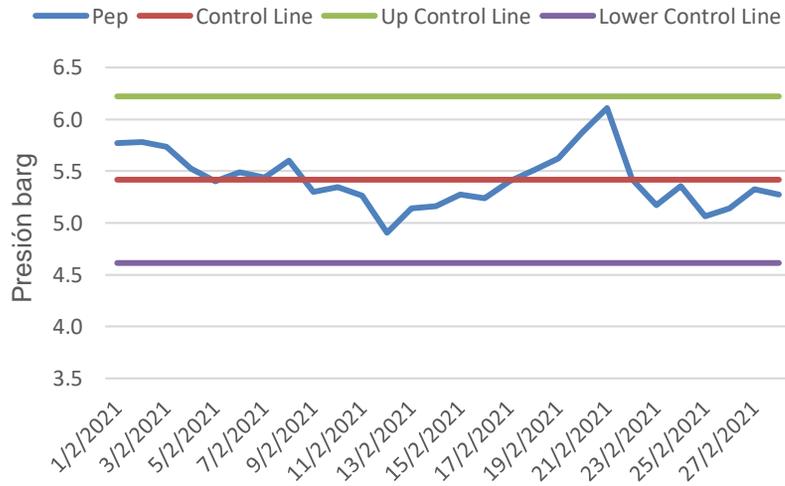
Pep diciembre 2020



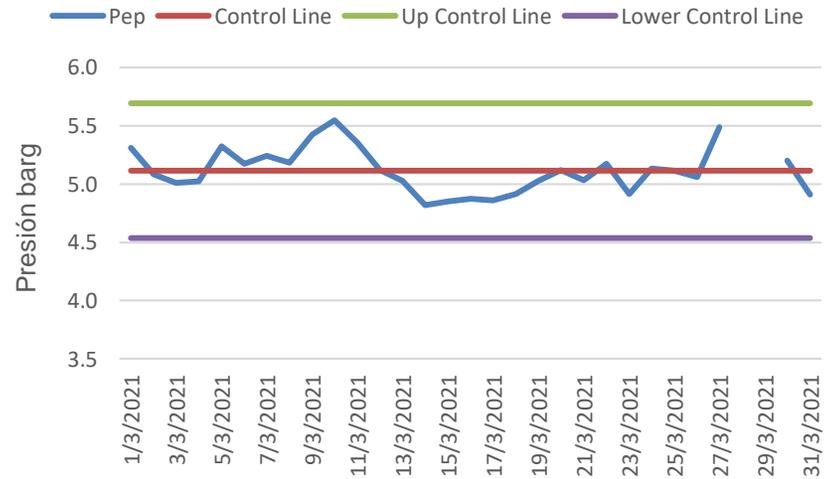
Pep enero 2021



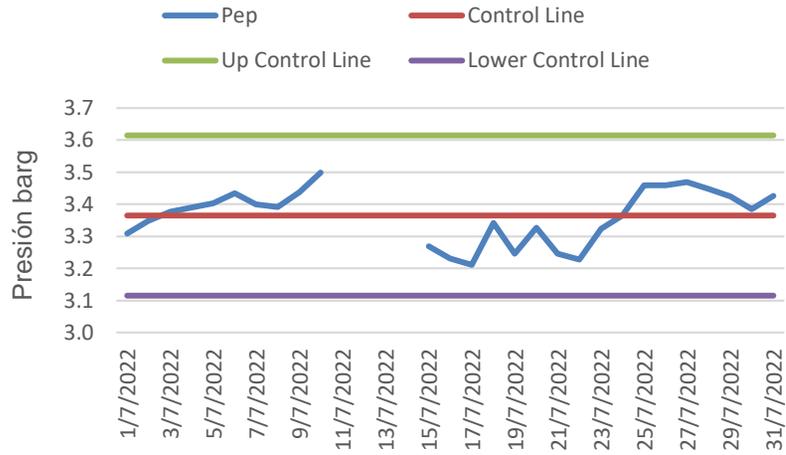
Pep febrero 2021



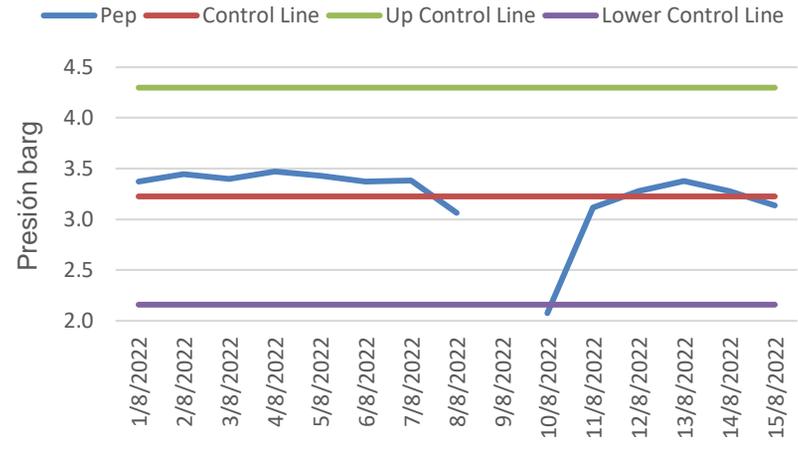
Pep marzo 2021



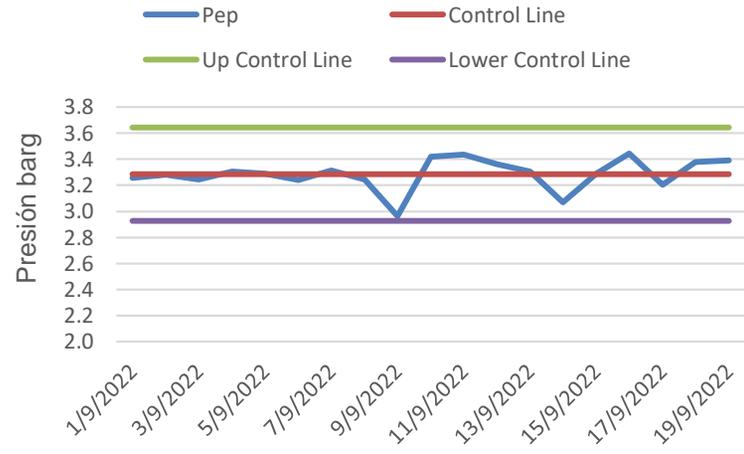
Pep julio 2022



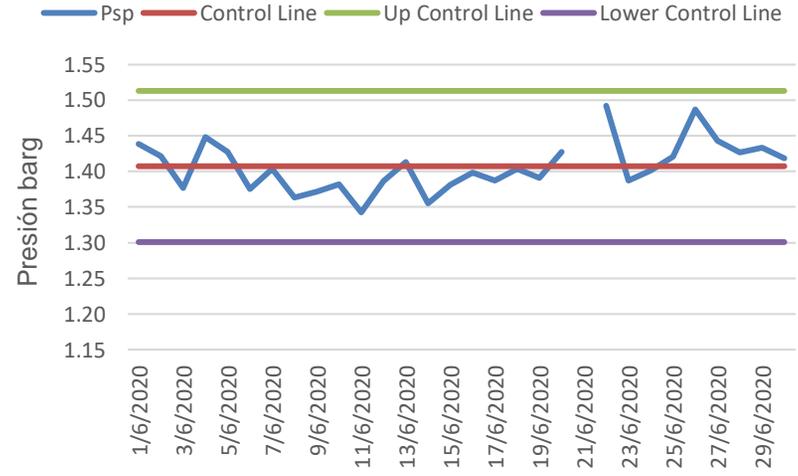
Pep agosto 2022



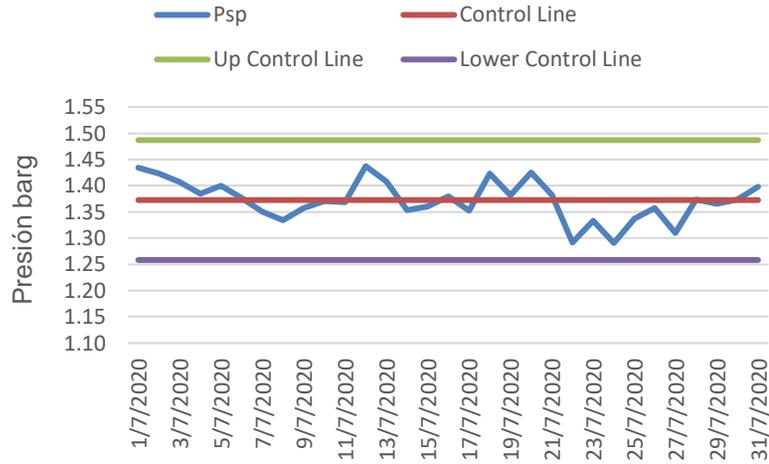
Pep septiembre 2022



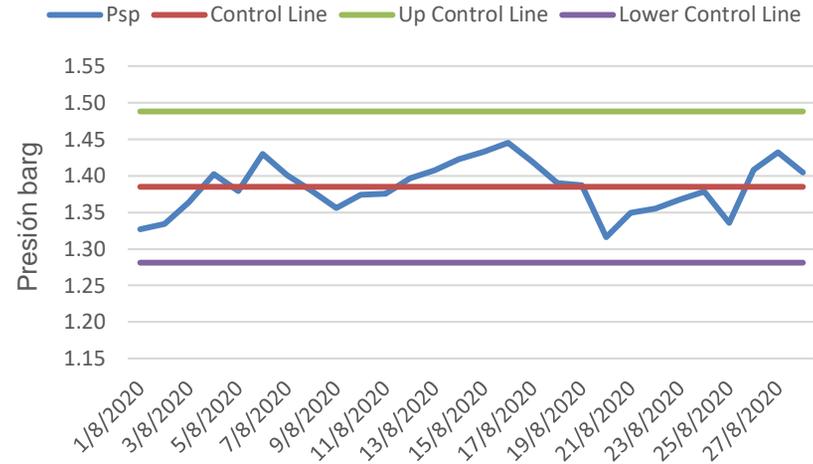
Psp junio 2020



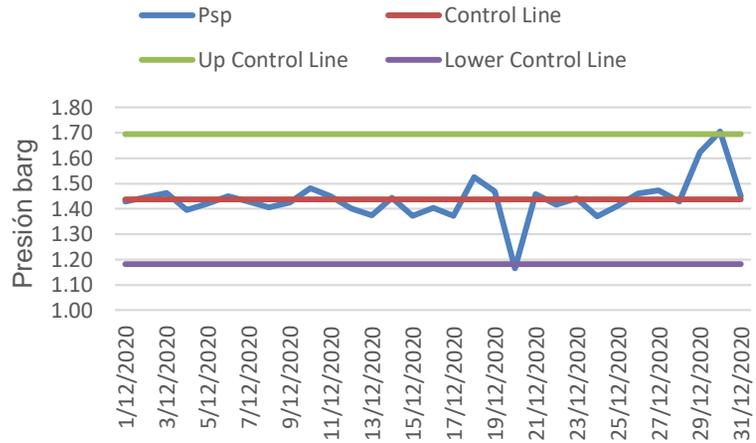
Psp julio 2020



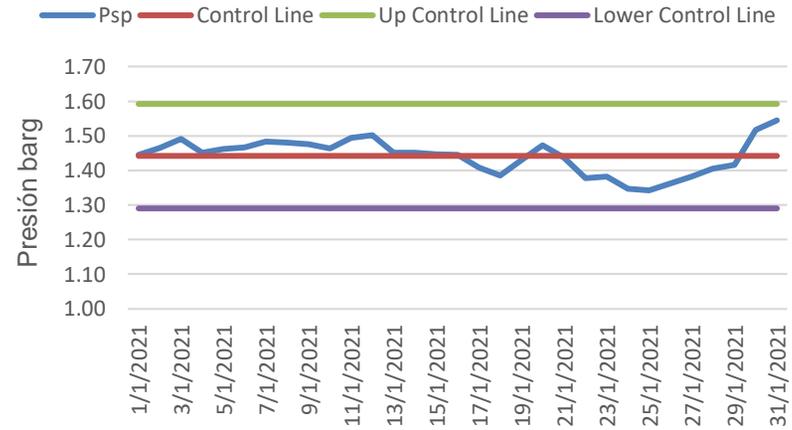
Psp agosto 2020



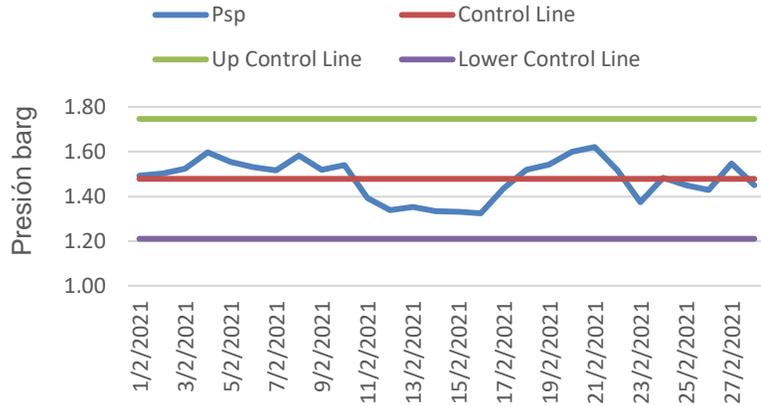
Psp diciembre 2020



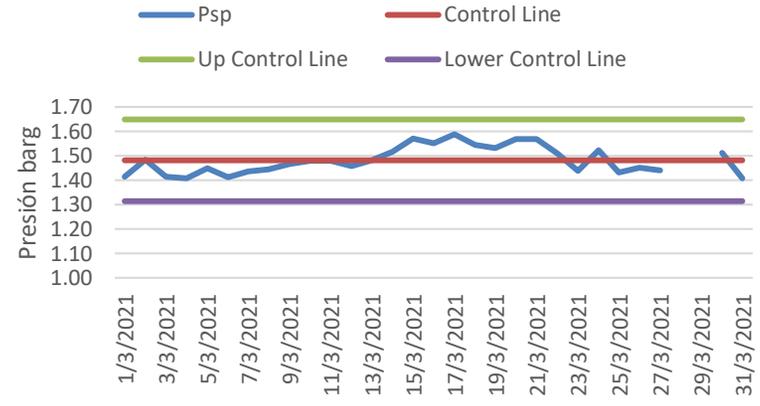
Psp enero 2021



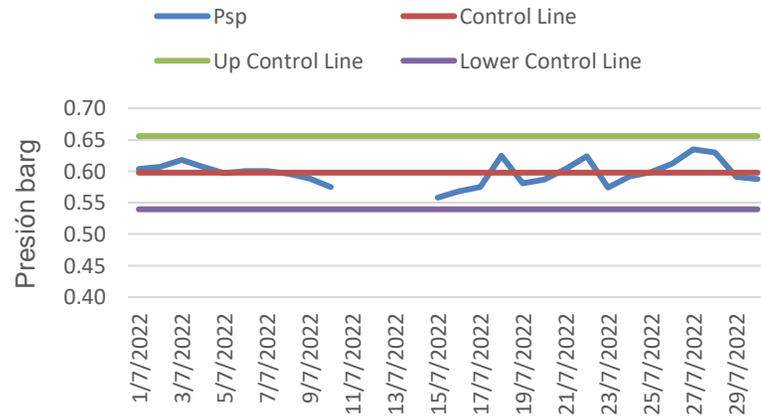
Psp febrero 2021



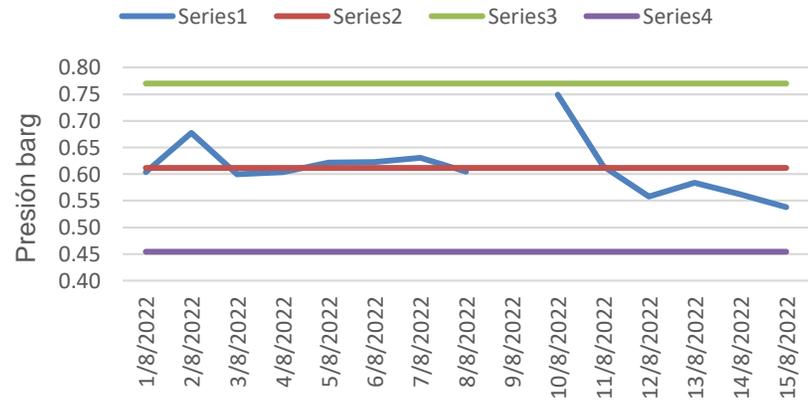
Psp marzo 2021



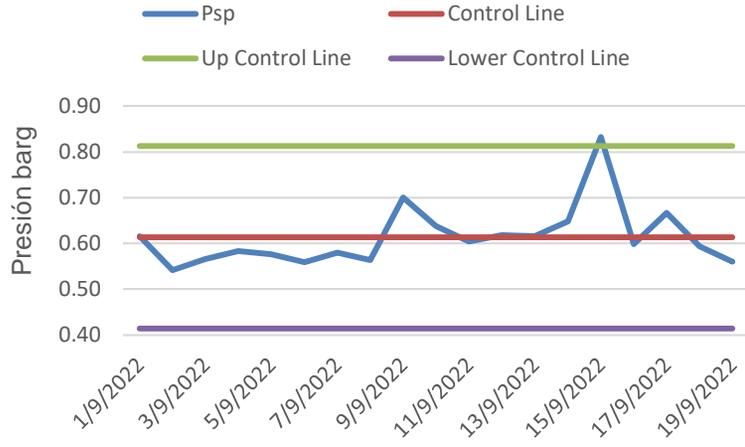
Psp julio 2022



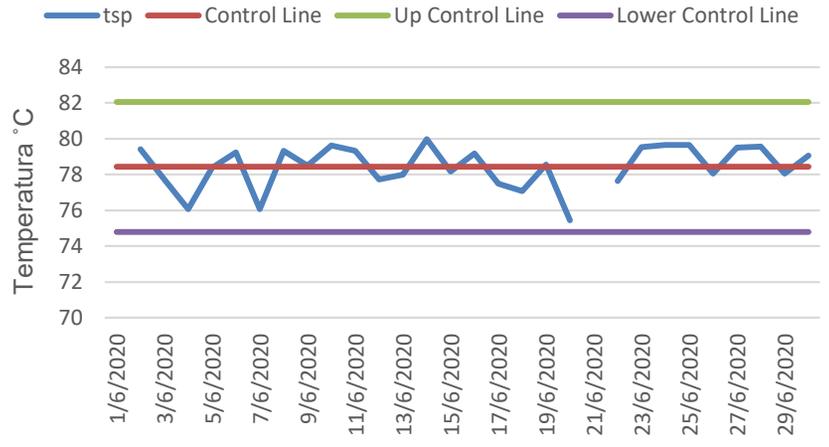
Psp agosto 2022



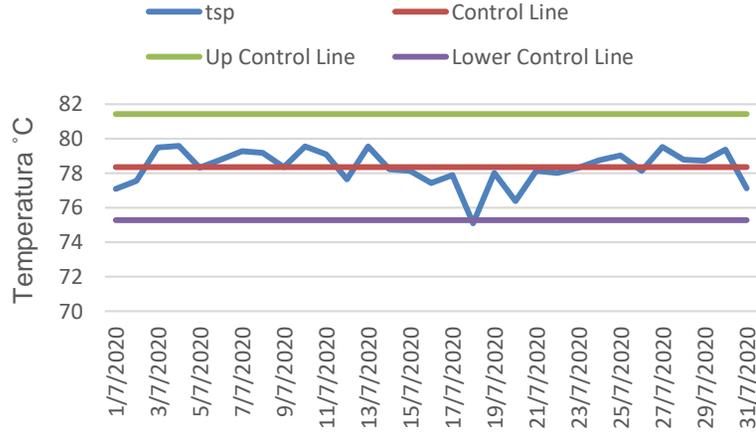
Psp septiembre 2022



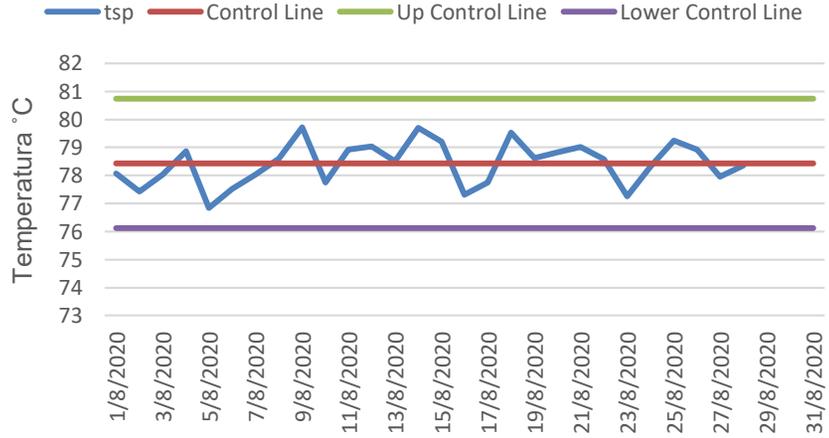
tsp junio 2020



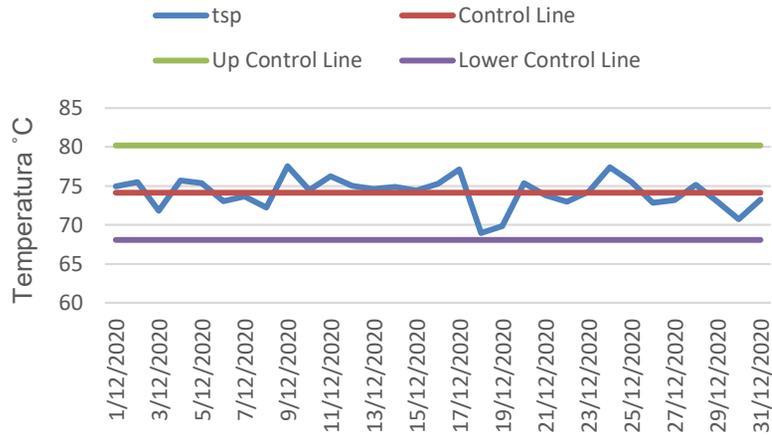
tsp julio 2020



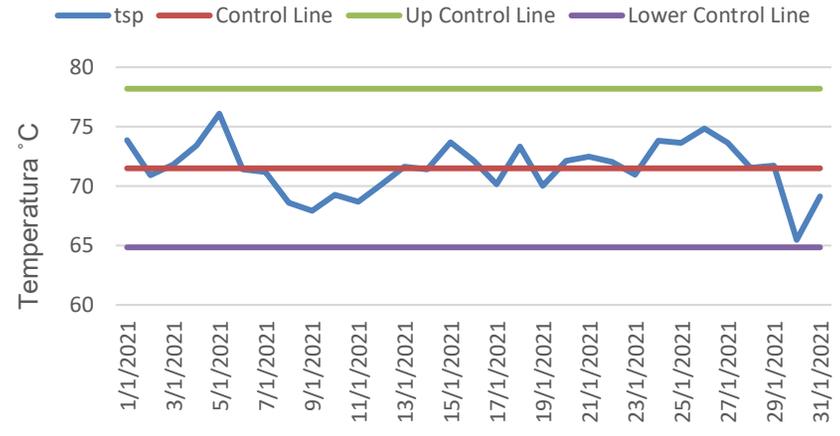
tsp agosto 2020



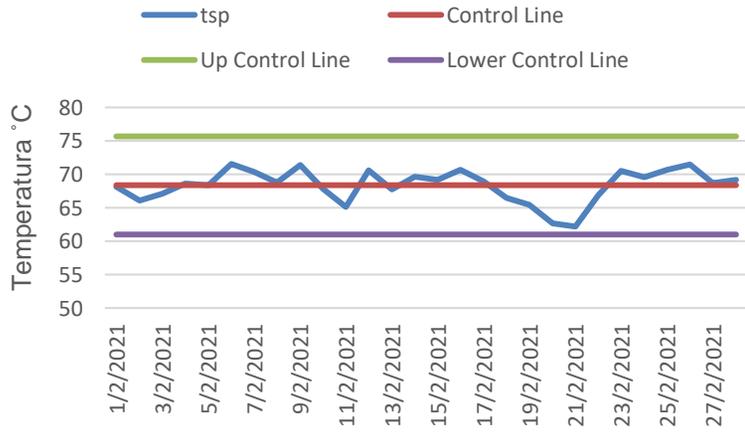
tsp diciembre 2020



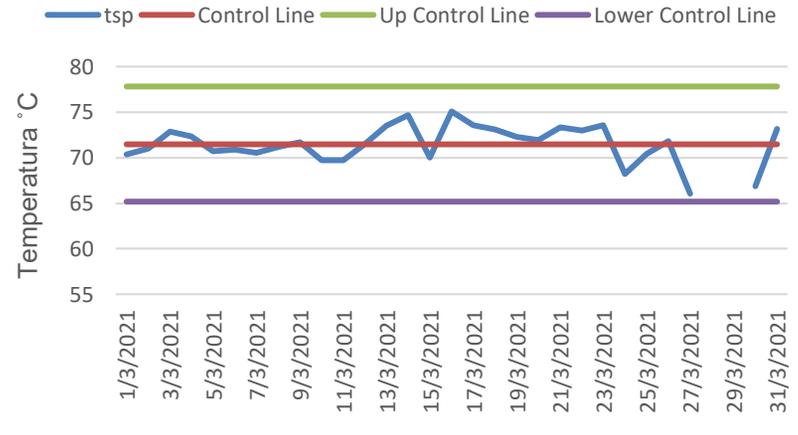
tsp enero 2021



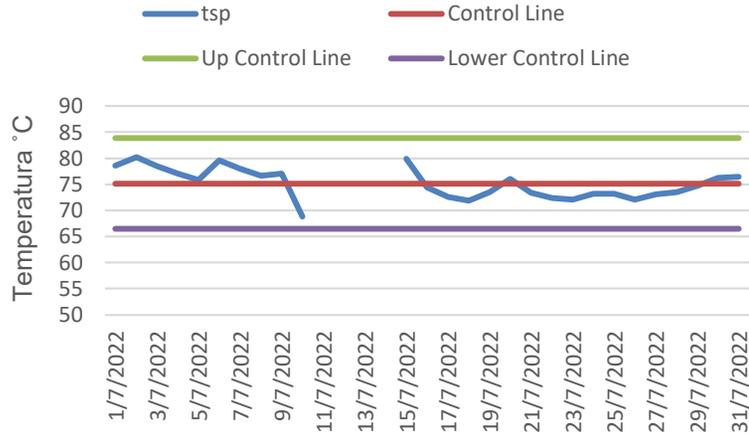
tsp febrero 2021



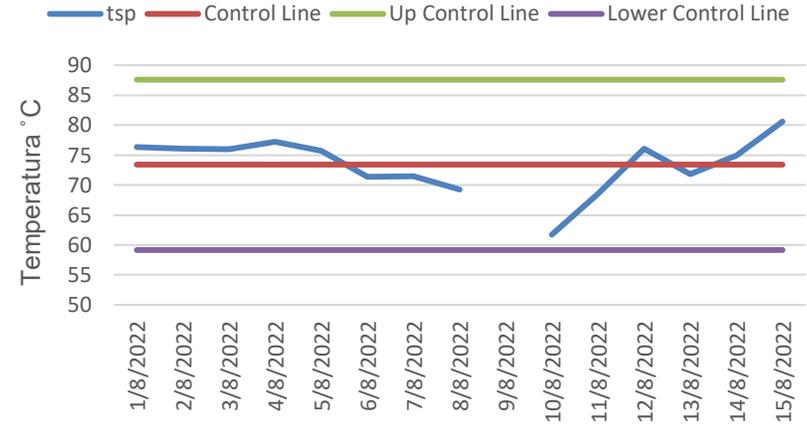
tsp marzo 2021



tsp julio 2022



tsp agosto 2022



tsp septiembre 2022

