



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS
DE HIDALGO**

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

**OPTIMIZACIÓN DE SISTEMAS DE ENFRIAMIENTO CON
AGUA DE MAR Y AGUA DE MAR PROFUNDA**

TESIS PRESENTADA POR

ILSE MARÍA HERNÁNDEZ ROMERO

A LA FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA COMO REQUISITO
PARA OBTENER EL GRADO DE:

INGENIERO QUÍMICO

ASESOR

**DOCTOR EN CIENCIAS DE INGENIERÍA QUÍMICA
FABRICIO NÁPOLES RIVERA**

MORELIA, MICH. AGOSTO 2015





FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

PROGRAMA ACREDITADO

"2014, Año de Octavio Paz"

Número de oficio.41/2014/2015

Asunto: Aprobación de Tema de Tesis y Asignación de Sinodales

**P.I.Q. ILSE MARÍA HERNÁNDEZ ROMERO
P R E S E N T E.**

En contestación a su atenta solicitud de fecha 8 de agosto 2014 me permito comunicarle a Usted, que se aprueba el Tema de Tesis propuesto para presentar Examen Recepcional en la Carrera de Ingeniero Químico.

El tema aprobado: "OPTIMIZACIÓN DE SISTEMAS DE ENFRIAMIENTO CON AGUA DE MAR Y AGUA DE MAR PROFUNDA" el cual se desarrollará bajo el siguiente orden:

- RESUMEN
- I.- INTRODUCCIÓN (JUSTIFICACIÓN, OBJETIVO (S) E HIPÓTESIS)
 - II.- GENERALIDADES O MARCO TEÓRICO
 - III.- DESARROLLO DEL TRABAJO (METODOLOGÍA)
 - IV.- ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS
 - V.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES
- REFERENCIAS.

Además deberá de ajustarse al artículo 39 y 41, y podrá contemplar los puntos necesarios del artículo 40 de la reglamentación interna de la Facultad de Ingeniería Química en su capítulo VI.

Para tales efectos fungirá como asesor de su Tesis el Dr., Fabricio Nápoles Rivera Profesor Investigador de la Facultad de Ingeniería Química. La mesa de jurado para revisión y realización de este trabajo estará integrada por:

DR. FABRICIO NÁPOLES RIVERA
M. EN I.P. MARÍN LÁZARO ARNULFO
DRA. VILICAÑA MÉNDEZ MARICELA
M.C. ACUÑA PARDO JOSÉ DOMINGO

PRESIDENTE	12002518
VOCAL	82014078
VOCAL	89001656
SUPLENTE	88001709

A T E N T A M E N T E
Morelia, Mich. A 6 de octubre de 2014.

DR. JAIME ESPINO VALENCIA
DIRECTOR
DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

ACREDITADA



FACULTAD DE INGENIERÍA
QUÍMICA

C.c.p. Archivo



FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

PROGRAMA ACREDITADO

"2015 Bicentenario Luctuoso de José María Morelos y Pavón. Siervo de la Nación"

No. Oficio 420/2014/2015.

LIC. ULISES GUTIÉRREZ VÁZQUEZ
JEFE DEL DEPARTAMENTO DE TITULACIÓN
DE LA UNIVERSIDAD MICHOACANA
P R E S E N T E.

Por medio del presente, me estoy permitiendo transcribir a esa Sección de Certificación a su digno cargo la comunicación enviada a esta Dirección por la mesa de jurado de examen Recepcional de esta fecha y que a la letra dice:

Atendiendo a las indicaciones se hizo la revisión de manuscrito de Tesis presentado por el pasante de Ingeniería Química: C. ILSE MARÍA HERNÁNDEZ ROMERO


Creemos que es de aceptarse dicho manuscrito con las modificaciones sugeridas verbalmente el interesado: ENTERADOS:

DR. FABRICIO NÁPOLES RIVERA
M. EN I.P. MARÍN LÁZARO ARNULFO
DRA. VILICAÑA MÉNDEZ MARICELA
M.C. ACUÑA PARDO JOSÉ DOMINGO

PRESIDENTE	12002518
VOCAL	82014078
VOCAL	89001656
SUPLENTE	88001709

Comunico a usted lo anterior para los fines legales a que haya lugar.

A T E N T A M E N T E
Morelia, Mich. A 8 de junio de 2015


M. EN C. LUIS NIETO LEMUS
DIRECTOR
DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA





FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

PROGRAMA ACREDITADO

"2015 Biotecnología (Lecturas de José María Morelos y Pavón, Corno de la Nación"

Morelia, Mich. A 08 de junio de 2015.

M. EN C. LUIS NIETO LEMUS
DIRECTOR DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
PRESENTE

Atendiendo a sus indicaciones se hizo la revisión de manuscrito de TESIS presentada por la P.J.Q. ILSE MARÍA HERNÁNDEZ ROMERO.

Creemos que es de aceptarse dicho manuscrito con las modificaciones sugeridas verbalmente al interesado.

DR. FABRICIO NÁPOLES RIVERA
PRESIDENTE

M. EN I.P. MARÍN LÁZARO ARNULFO
VOCAL

DRA. VILLICAÑA MÉNDEZ MARICELA
VOCAL



AGRADECIMIENTOS

Debo agradecer de manera especial y sincera al Dr. Fabricio Nápoles Rivera por aceptarme para realizar esta tesis bajo su dirección. Su disponibilidad, su apoyo y confianza en mi trabajo y su capacidad para guiarme ha sido un aporte invaluable, no solamente en el desarrollo de esta tesis, sino también en mi inicio en la rama de la investigación.

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y a la facultad de Ingeniería Química por su calidad y excelencia en sus programas para desarrollarme profesionalmente, a todos y cada uno de mis profesores que fueron partícipes en mi formación académica durante estos 5 años, a los cuales les debo los conocimientos adquiridos, las lecciones, y cada una de las experiencias.

A mis Sinodales: Dra. Maricela Villicaña Méndez y M.C Arnulfo Marín por sus comentarios acertados y fructíferos para complementar mi investigación.

A mis padres: Lázaro y Edith por su gran apoyo económico, emocional y moral durante todos mis años de estudio que ahora se resumen en este trabajo. Gracias por el afecto, por el apoyo incondicional y por el respaldo que me dan en cada decisión que tomo.

A mi tía Mary, a mi abuelita Hermina por su apoyo incondicional en cada una de las etapas de mi vida, por sus consejos y sus bendiciones.

A mis hermanas: Vera, Karina, Dahian y Paola por sus consejos motivacionales para concluir este proyecto, gracias por su apoyo en cada actividad que realizo y por motivarme a ser mejor cada día.

A mis Sobrinos: Gadi y Verita y a mi cuñado Eli; por ser ahora partícipes de cada proyecto de mi vida y su apoyo.

A mis amigas: Leydi, Yuli, More, Ivette e Ido, por ser parte de mi vida y de cada proyecto, por su apoyo incondicional. Por sus buenos consejos y por estar siempre presentes. “Porque mejor influencia en la carrera no pude haber tenido”.

Un agradecimiento especial a la Maestra Anabel Cruz Flores por haber sido un factor clave para mi buen desempeño académico durante la carrera, gracias maestra por sus conocimientos, por sus enseñanzas, por sus consejos y por la gran amistad que tenemos.

A la Q.F.B Alejandra Ceja Silva por su apoyo, por los consejos aportados para la realización de ese trabajo, por su tiempo, por su confianza y por sus palabras de aliento para ser mejor persona y r profesionalista.

Agradezco el apoyo otorgado por la Secretaria de Educación Pública a través del proyecto “Apoyo a la incorporación de nuevos PTC” UMSNH-PTC-357 en el rubro de Beca a Estudiante.

Ilse María Hernández Romero

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	IV
LISTA DE FIGURAS	VII
LISTA DE TABLAS	VIII
RESUMEN	IX
ABSTRACT	XI
1.-INTRODUCCIÓN	1
Integración térmica a través del tiempo	5
Ejemplo. Uso de agua de mar como medio de enfriamiento	6
2.-GENERALIDADES.....	7
3.-JUSTIFICACIÓN.	10
Hipótesis.....	12
Objetivo General.	12
Objetivos Particulares.	12
4.-METODOLOGÍA	13
1.- Generar una superestructura.	14
2.- Modelo Matemático.....	16
3.- Modelo del biosida y programación de mantenimiento.	17
5.-RESULTADOS.....	24
Caso de Estudio. Basado en un proceso industrial (planta de acrilonitrilo).	24
Clasificación Propuesta.....	29
Cálculo de los flujos de agua de mar en cada segmento del proceso	31
6.-ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	34
Caso A. Considerando la capacidad de producción de biosida en la planta para Intercambiadores de Calor de Mayor Capacidad.....	34

Caso A. Considerando la capacidad de producción de biosida en la planta para Intercambiadores de Calor de Menor Capacidad.....	40
Caso B. Considerando la compra total de biosida para Intercambiadores de Calor de Mayor y Menor Capacidad.	44
7.-ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	46
8.-CONCLUSIONES	49
PERSPECTIVAS.....	50
9.-NOMENCLATURA	51
10.-REFERENCIAS	54

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1.1 Diagrama de emisiones de GEI en México	2
Fig. 1.2 Consumo de combustibles fósiles para la producción de electricidad.	4
Fig. 1.3 Planta de energía y desalinizadora ubicada en Barka, Oman.	6
Fig. 4.1 Diagrama de flujo de metodología	13
Fig. 4.2 Superestructura	14
Fig. 5.1 Integración Térmica	25
Fig. 5.2 Sistema de enfriamiento para el caso de estudio (Intercambiadores de Calor de Mayor Capacidad)	30
Fig. 5.3 Sistema de enfriamiento para el caso de estudio (Intercambiadores de Calor de Menor Capacidad)	31
Fig. 6.1 Programación de dosificación de biosida por año	34
Fig. 6.2 Programación de dosificación de químicos al final de la tubería	35
Fig. 6.3 Transferencia de calor actual y requerido en cada Intercambiador de Calor	36
Fig. 6.4 Perfil de crecimiento de la biopelícula en cada intercambiador de calor	37
Fig. 6.5 Porcentaje en la reducción de transferencia de calor en cada intercambiador de calor.	38
Fig. 6.6 Concentración de biosida en el segmento de proceso i	39
Fig. 6.7 Programación de dosificación de biosida por año	40
Fig. 6.8 Programación de dosificación de químicos por año	41
Fig. 6.9 Transferencia de calor actual y requerido en cada intercambiador de calor.	41
Fig. 6.10 Perfil de crecimiento de la biopelícula en cada intercambiador de calor.	42
Fig. 6.11 Porcentaje en la reducción de transferencia de calor en cada intercambiador de calor.	43
Fig. 6.12 Concentración de biosida en el segmento del proceso i	43
Fig. 7.1 Análisis de Sensibilidad para Intercambiadores de Calor de Mayor Capacidad	47
Fig. 7.2 Análisis de sensibilidad para Intercambiadores de Calor de Menor Capacidad. ...	48

LISTA DE TABLAS

Tabla 5.1 Datos de las corrientes del proceso.....	24
Tabla 5.2 Integración térmica de corrientes calientes y frías	26
Tabla 5.3 Servicios de Enfriamiento requeridos.....	27
Tabla 5.4 Servicios de Calentamiento requeridos	27
Tabla 5.5 Comparación de Servicios de Enfriamiento y Calentamiento con y sin Integración térmica	28
Tabla 6.1 Muestra el día y el mes donde se llevaran a cabo los mantenimientos	36
Tabla 6.2 Costos de Operación para cada caso propuesto en Intercambiadores de Calor de Mayor Capacidad	44
Tabla 6.3 Costos de operación para cada caso propuesto en Intercambiadores de Calor de Menor Capacidad	45
Tabla 7.1 Costo total de operación respecto al número de mantenimientos al año	46
Tabla 7.2 Costo total de operación respecto al número de mantenimientos al año	48

RESUMEN

OPTIMIZACIÓN DE SISTEMAS DE ENFRIAMIENTO CON AGUA DE MAR Y AGUA DE MAR PROFUNDA

Por

P.I.Q Ilse María Hernández Romero

Junio 2015

Dirigida por: Dr. Fabricio Nápoles Rivera

El crecimiento exponencial de la población ha propiciado el aumento en los consumos de energéticos para satisfacer los también crecientes estándares de vida, por otro lado también ha generado un aumento en el consumo de agua con bajo contenido salino. Ambas situaciones se han convertido en problemas de sustentabilidad que tienen que ser abordados desde diferentes perspectivas con la finalidad de generar procesos sustentables que permitan el desarrollo de futuras generaciones. En este contexto la integración de procesos (térmica y másica) se ha afianzado como una de las estrategias más utilizadas en el medio industrial para reducir los consumos de combustibles fósiles (y por consiguiente de gases de efecto invernadero), así como para minimizar los consumos de corrientes frescas. Por lo tanto en este trabajo se propone una estrategia secuencial que considera la integración térmica de procesos y la sustitución de agua de baja salinidad por agua de mar y agua de mar profunda como medio de enfriamiento a temperaturas moderadamente bajas. Además se presenta un modelo matemático formal para la planeación de mantenimiento y dosificación de biosidas en plantas industriales con uso de agua de mar como medio de enfriamiento. Los resultados muestran las ventajas desde el punto de vista energético de realizar la integración térmica, con lo cual se reducen también las emisiones de gases de

efecto invernadero. Finalmente, se muestra también la factibilidad de utilizar agua de mar y agua de mar profunda como medio de enfriamiento, empleando esquemas óptimos de planeación para la operación de dichos sistemas. A pesar de que utilizar agua de alto contenido salino representa retos importantes en el aspecto operacional, dichos sistemas resultan atractivos en zonas con baja disponibilidad de agua para consumo humano.

Palabras Claves: ambiental, economía, disponibilidad, enfriamiento, optimización.

ABSTRACT

The exponential population growth has promoted the increase in the consumption of fossil fuels to satisfy the also increasing life standards; on the other hand it has also promoted the increase in the low salinity water consumption. Both situations have become in sustainability issues that have to be faced using different approaches in order to generate sustainable processes that allow the development of future generations. In this context, process integration (thermal and mass integration) have become one of the most used strategies to reduce fossil fuels consumption (thus the reduction of green house gas emissions) and also to reduce fresh water consumption. In this work a sequential approach is proposed, the proposed methodology considers the heat integration of the processes and the substitution of low salinity water with sea water and deep sea water. Results show the advantages of performing the heat integration, which help reduce the energy consumption and also the green house gas emissions. Finally, the feasibility of using sea water and deep seawater as cooling utility has been shown, and optimal planning schemes for the operation of such systems were proposed. Despite the fact that using water with high salinity content represents important challenges from the operational point of view, such systems result attractive in zones with low availability of water for human consumption.

1.-INTRODUCCIÓN

Al paso de los años, los patrones de consumo de energía han cambiado significativamente. Desde el principio de los tiempos y hasta finales de 1800 la madera fue utilizada como fuente primaria de energía. En el siglo 19 el carbón se convirtió en dominante, antes de ser superado por los productos derivados del petróleo a mediados del siglo pasado, una época en que el uso de gas natural también incremento rápidamente. Desde mediados del siglo 20, el uso de carbón aumentó nuevamente (sobre todo como fuente de energía primaria para la generación de energía eléctrica). Después de una pausa en la década de los setentas el uso del petróleo y el gas natural reanudó su crecimiento, y el patrón general de uso de la energía desde finales del siglo 20 se ha mantenido bastante estable.

En México los tres combustibles más utilizados son el petróleo, gas natural y carbón, que en conjunto proporcionan el 87% del total de energía primaria. Los recientes aumentos en la producción nacional de líquidos de petróleo y gas natural han llevado a cambios entre los usos de los combustibles fósiles (principalmente de carbón para la generación de energía a gas natural), pero el predominio de estas tres fuentes de energía es probable que continúe en el futuro.

El uso creciente de combustibles fósiles, asociado al incremento en la población y al aumento en los estándares de vida en general, trae consigo la producción de emisiones de gases de efecto invernadero. En la categoría de producción de Energía se contemplan las emisiones que son resultado de la producción, transformación, manejo y consumo de productos energéticos. La categoría se subdivide en consumo de combustibles fósiles y en

emisiones fugitivas. En la subcategoría de Consumo de combustibles fósiles se estiman emisiones de CO₂, CH₄ y N₂O y otros gases denominados precursores de ozono que son: monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x), compuestos orgánicos volátiles diferentes de metano (COVDM) y bióxido de azufre (SO₂). Las emisiones de CO₂ y SO₂ dependen del contenido de carbono y azufre en el combustible. Los otros gases dependen de las condiciones de combustión y la tecnología. En la subcategoría de Emisiones fugitivas se estiman emisiones de CH₄ provenientes del minado y manejo del carbón, y por las actividades del petróleo y gas natural; para estas últimas también se estiman las emisiones de gases precursores de ozono. En 2006, las emisiones de GEI para esta categoría, expresadas en CO₂ equivalente, registraron un aumento de 38% con respecto al año base (1990), es decir pasaron de 311,195 Gg a 430,097 Gg, con una tasa media de crecimiento anual de 2.0%. La categoría de Energía prevalece como la principal fuente de emisiones de GEI, en donde el consumo de combustibles fósiles para la generación de energía y el transporte predomina como fuentes clave de emisión. La Fig. 1.1 muestra las emisiones de GEI por sector y uso en el país.

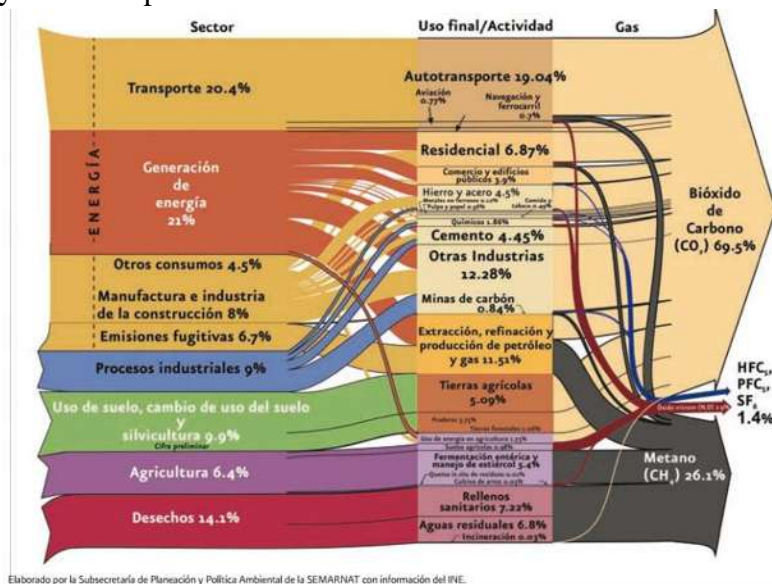


Fig. 1.1 Diagrama de emisiones de GEI en México

En este sentido la actividad de mayor impacto en el consumo de combustibles fósiles y por consecuencia de GEI es la generación de electricidad. La Fig. 1.2 muestra la información de consumo de combustibles utilizados en este rubro, donde se observa que en el año base (2004) se consumieron 15,248,020,355.00 litros de combustóleo, 373,483,447.55 litros de diésel, 11,504,635,056.00 kg de consumo de carbón y 8,520,937,025.59 m³ de gas natural para la generación de la energía empleada. Se puede apreciar que el uso del combustóleo que es un importante precursor de los gases de efecto invernadero comenzó a decrecer a partir del 2004.

En general se puede apreciar una variación significativa de los diversos combustibles hasta el 2013, esto se debe a muchos factores; uno de ellos es la población, a medida que ésta aumenta tiende a requerir más servicios energéticos lo que ocasiona al aumento de uso de combustibles necesarios para satisfacerlos, otra es la estabilidad económica del país, al sufrir inestabilidades en la moneda, inflaciones, etc. hace que los combustibles tiendan a variar en costo de adquisición, por lo que se opta por recurrir al combustible más barato para la generación de energía.

Otro aspecto que hay que considerar es el ambiental, ahora se está tratando de remplazar los combustibles fósiles por biocombustibles, ya que ahora no solo se busca generar energía sino que sea limpia.

En los últimos años se ha observado un avance importante en este tema, sin embargo los combustibles fósiles siguen predominando, por ende se pretende contribuir mediante el análisis e implementación de estrategias que permitan la disminución del consumo de combustibles fósiles y emisiones de GEI.

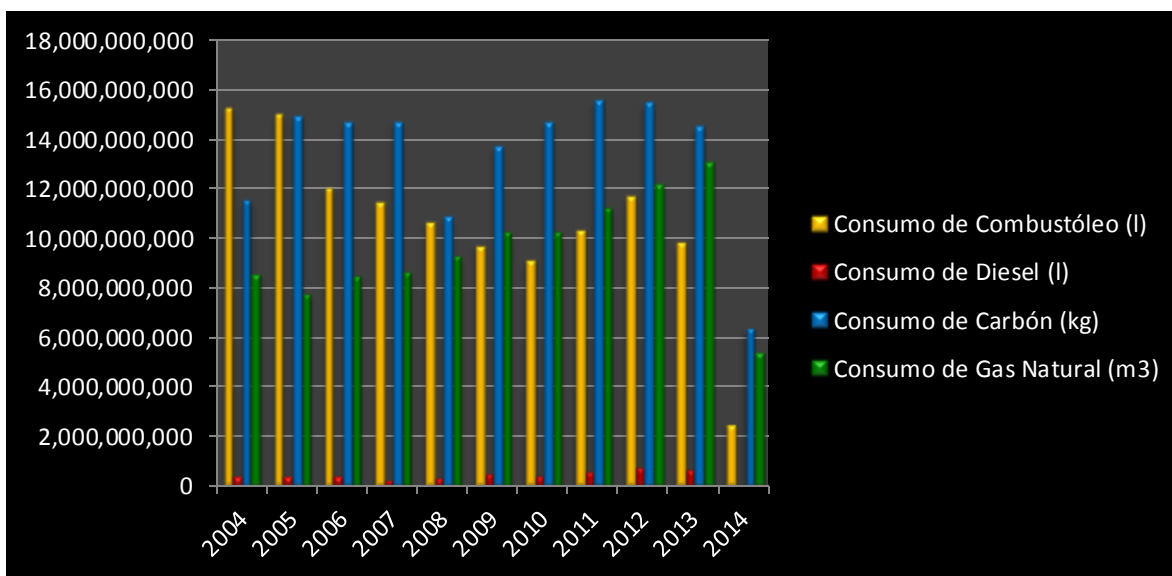


Fig. 1.2 Consumo de combustibles fósiles para la producción de electricidad.

Integración térmica a través del tiempo

Algunos tipos de problemas de integración térmica son relativamente fáciles de resolver, ya que sus características intrínsecas permiten el uso de técnicas deterministas capaces de encontrar su solución óptima. Sin embargo otros casos se requieren de otras técnicas para la solución, técnicas que con el paso del tiempo buscan la mejora y la solución óptima.

Los *métodos heurísticos* usados hace tiempo se basaban en la experiencia de las personas que tenía mayor interacción o conocimiento acerca de tal hecho o proceso, que mediante diferentes mecanismos buscan una solución "buena" aunque no necesariamente óptima en un tiempo razonable.

Con el paso del tiempo se buscaban mejorar las soluciones a los problemas; es decir, encontrar la red de integración térmica que satisficiera la mejor opción, dando entrada a los *métodos secuenciales*. Los cuales; como su nombre lo dice, la integración térmica se hacía por partes, repercutiendo la decisión tomada en la que sigue y así sucesivamente. Obteniendo una solución buena que da cabida a una red factible. Sin embargo cada decisión tomada no garantiza ser la óptima.

Enseguida surgen los *métodos simultáneos* los cuales posibilitan la integración térmica individual de cada factor que interviene en determinado proceso o caso a optimizar. Éste método es de los más completos y la ventaja sobre los demás es de que éste si obtiene la solución óptima ya que considera todos los aspectos individuales al mismo tiempo.

Ejemplo. Uso de agua de mar como medio de enfriamiento

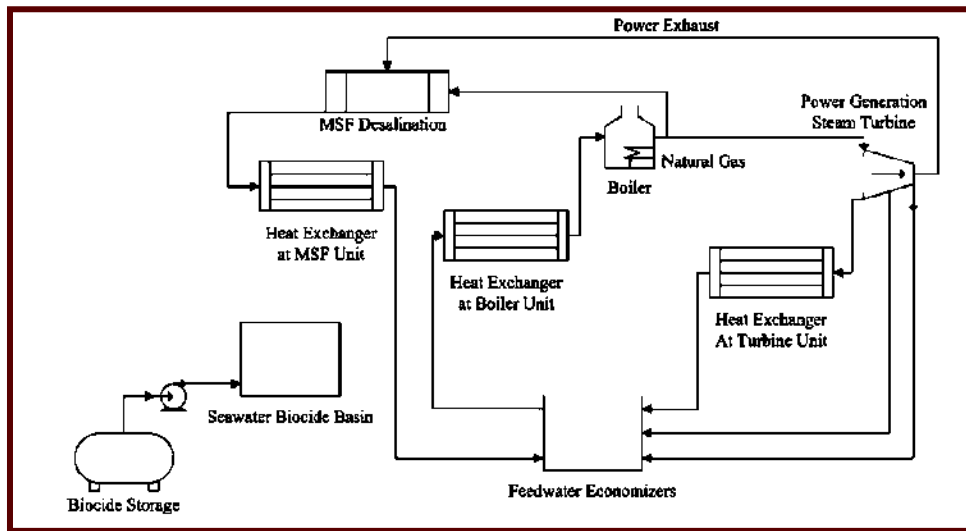


Fig. 1.3. Planta de energía y desalinizadora ubicada en Barka, Oman (Abdul- Wahab y Jupp , 2009).

El flash multietapa (MSF) y la planta de desalinización cuenta con tres unidades, los generadores de vapor (calentadores) tienen dos unidades, y la turbina de vapor sólo tiene una. Las capacidades de estas unidades (consumo de agua de mar y carga de calor que funciona a su máxima capacidad). Este proceso utiliza el agua de mar como sistema de enfriamiento, debido a sus cercanías y disponibilidad del mar.



2.-GENERALIDADES

El consumo de servicios de calentamiento y enfriamiento en las plantas industriales son uno de los mayores contribuyentes en los costos de operación de una planta. Una de las estrategias más utilizadas para abatir dichos requerimientos es la síntesis de redes de intercambio de calor (HEN's). Los principales procedimientos para el cálculo de HEN se pueden dividir en aproximaciones secuenciales y simultaneas. Entre las estrategias secuenciales más utilizadas se encuentra la tecnología de punto de pliegue (Linnhoff y Hindmarsh, 1983, Ahmad, 1990, Ahmad y col., 1990), mientras que las técnicas de programación matemática han sido utilizadas para la solución de enfoques simultáneos (Cerdea y col., 1983, Coldberg y Morari, 1990, Floudas y col., 1986, Yee y Grossmann, 1990). Los métodos basados en el punto de pliegue se han enfocado en la determinación de objetivos como lo son los requerimientos mínimos de servicios de enfriamiento y calentamiento, número mínimo de unidades de intercambiadores de calor y cálculo del área mínimos, sin embargo al resolver de manera secuencial dichas soluciones podrían no corresponder a la solución óptima para un problema determinado.

Por otro lado, las estrategias simultaneas no tienen esta limitación por lo que son preferibles para diseños más detallados. El trabajo de Yee y Grossmann, (1990) es una de las estrategias secuenciales más utilizadas ya que permite el diseño de HEN's con arreglos en paralelo, en serio o combinados de unidades de transferencia de calor. Varios autores han mejorado la formulación de Yee y Grossmann, para incluir aspectos como lo son considerar efectos de las caídas de presión Serna González y col., (2004) y Ponce Ortega y col., (2007). Considerar corrientes isotérmicas, (Ponce Ortega y col., 2008), reconfigurar las

redes existentes (Sorsak y Kravanja, 2004) etc. A pesar de que la integración térmica de corrientes permite reducir los consumos de servicios de calentamiento y enfriamiento, generalmente el contenido energético de las corrientes calientes y frías es diferente, además de que por restricciones termodinámicas no siempre es posible aprovechar todo el calor de las corrientes de proceso, por lo que generalmente sigue siendo necesario utilizar servicios externos de enfriamiento y calentamiento. El servicio de enfriamiento más utilizado es el agua de enfriamiento, sin embargo, con dicho servicio sólo es posible enfriar hasta la temperatura ambiente, mientras que el resto del calor debe ser retirado con refrigerantes. De aquí se desprenden dos problemas importantes, la disponibilidad de agua de baja salinidad en algunas regiones es muy baja, y por otro lado el uso de sistemas de refrigeración puede representar altos consumos energéticos por la operación de dichos sistemas. Varios autores han abordado el tema de uso de agua de mar como medio de enfriamiento en plantas industriales, por ejemplo Bin Mahfouz y col. (2011) presentaron un modelo matemático para la optimización de una planta de desalinización y potencia enfriada con agua de mar, con él que definen el calendario de dosificación de biosidas y mantenimiento mecánico en función de la dinámica de crecimiento de bioincrustaciones. Nápoles-Rivera y col. (2012) mejoraron el modelo presentado por Bin-Mahfouz y col, a través de programación disyuntiva lo que permitió eliminar términos no convexos en la formulación, además de dar flexibilidad a los programas de dosificación y mantenimiento. Posteriormente Nápoles-Rivera y col. (2013) incluyeron la integración energética en las plantas enfriadas con agua de mar considerando aspectos técnicos, económicos y ambientales. El desempeño económico del modelo se evalúa en función de los requerimientos de energía del proceso, el consumo de servicios (biosida y el químico de tratamiento). Para abordar los problemas

técnicos asociados con la formación de la biopelícula cuando el agua de mar se utiliza como fluido de enfriamiento, se consideró el espesor y la pérdida de la eficiencia térmica debido a la contaminación biológica. Y finalmente el aspecto ambiental fue abordado mediante la restricción en las descargas de agua residual al océano.

Si bien los trabajos antes mencionados abordan el uso de agua de mar como medio de enfriamiento, no resuelven el problema de la necesidad de refrigerantes. En este sentido se ha encontrado que el agua de mar profunda, puede ser extraída a temperaturas entre 4-5°C por lo que puede ser utilizada para refrigeración a temperaturas moderadas. Por lo tanto en este trabajo se propone la integración térmica de plantas industriales considerando tanto el agua de mar como el agua de mar profunda como medios de enfriamiento considerando aspectos relacionados con la operación y mantenimiento de dichas instalaciones.

3.-JUSTIFICACIÓN.

En la actualidad existe un problema energético y ambiental preocupante debido al incremento en el consumo de combustibles fósiles y las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) asociadas a ellos. Uno de los principales contribuyentes en este tema en el ramo industrial es la utilización de servicios externos de enfriamiento y calentamiento. Por una parte se tiene el enfriamiento a temperatura ambiente lo cual puede ser logrado con agua de enfriamiento, sin embargo, para lograr el enfriamiento a temperaturas inferiores es necesaria la implementación de sistemas de refrigeración, los cuales requieren de altos consumos de energía eléctrica. Por su parte los servicios de calentamiento también pueden ser abatidos mediante una integración apropiada del proceso y mediante la sustitución de combustibles por alternativas más amigables. Por lo tanto, es necesario desarrollar estrategias enfocadas a buscar soluciones óptimas respecto a este tema.

En este trabajo se propone realizar la integración energética de procesos incluyendo el uso de agua de mar superficial y agua de mar profunda como medio de enfriamiento para tener un uso productivo, así como un ahorro de energía considerable. De manera general se logrará un efecto positivo en la disminución de costos energéticos y por ende costos de operación. Sin embargo, una de las principales limitaciones de los procesos que utilizan agua de mar es la formación de bioincrustaciones, por lo que también es necesario implementar un modelo de programación matemática para la planificación óptima de dosificación de biosida y programación del mantenimiento mecánico; considerando la cinética de crecimiento de bioincrustaciones a lo largo de la red, su dependencia con la temperatura y su interacción con el espesor de biosida. El modelo también incluirá

restricciones ambientales para prevenir la descarga de corrientes al mar con cargas potencialmente peligrosas de las sustancias químicas.

De tal manera que se tendrán modelos de carácter general para la optimización de plantas industriales que tengan disponibilidad de agua de mar para ser utilizada como medio de enfriamiento.

Hipótesis.

Mediante la integración térmica de procesos industriales y la implementación de sistemas de enfriamiento y refrigeración basados en agua de mar y agua de mar profunda se logrará reducir el consumo de combustibles fósiles y de gases de efecto invernadero. Obteniendo así beneficios económicos y ambientales, lo cual permitirá la operación de procesos más sustentables.

Objetivo General.

- Integración térmica y planificación de operación de plantas industriales considerando sistemas de enfriamiento y refrigeración basados en agua de mar y agua de mar profunda

Objetivos Particulares.

- Desarrollar una superestructura representativa de los procesos a optimizar
- Diseño de un modelo matemático basado en la superestructura propuesta
- Solución de caso de estudio práctico.

4.-METODOLOGÍA

Etapa 1. Recopilación Datos

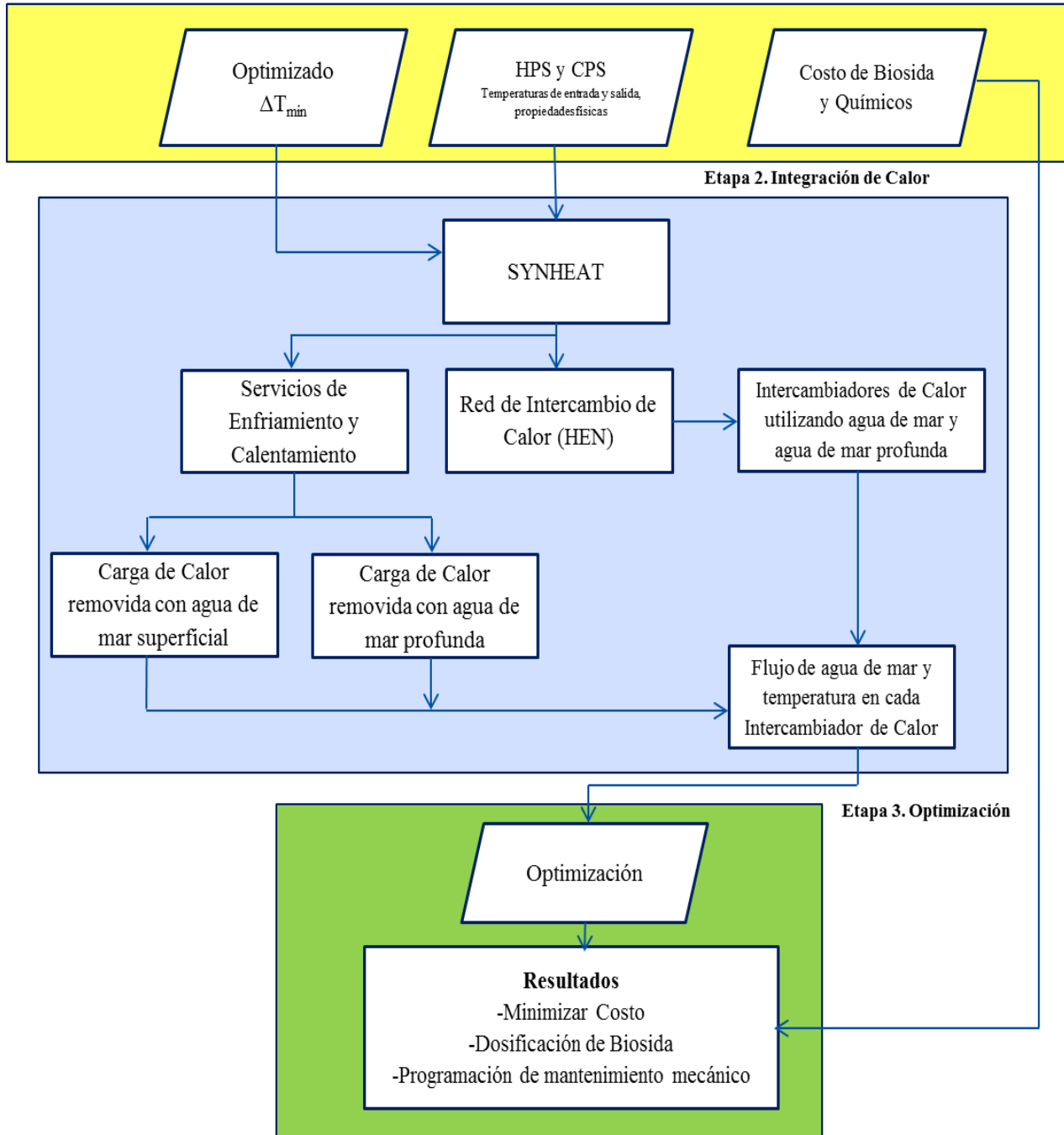


Fig.4.1 Diagrama de flujo de metodología

1.- Generar una superestructura.

Una superestructura es una representación gráfica de un sistema que representa todos los elementos de importancia en dicho sistema así como su interacción, La superestructura para el proceso propuesto se muestra en la Fig. 4.2.

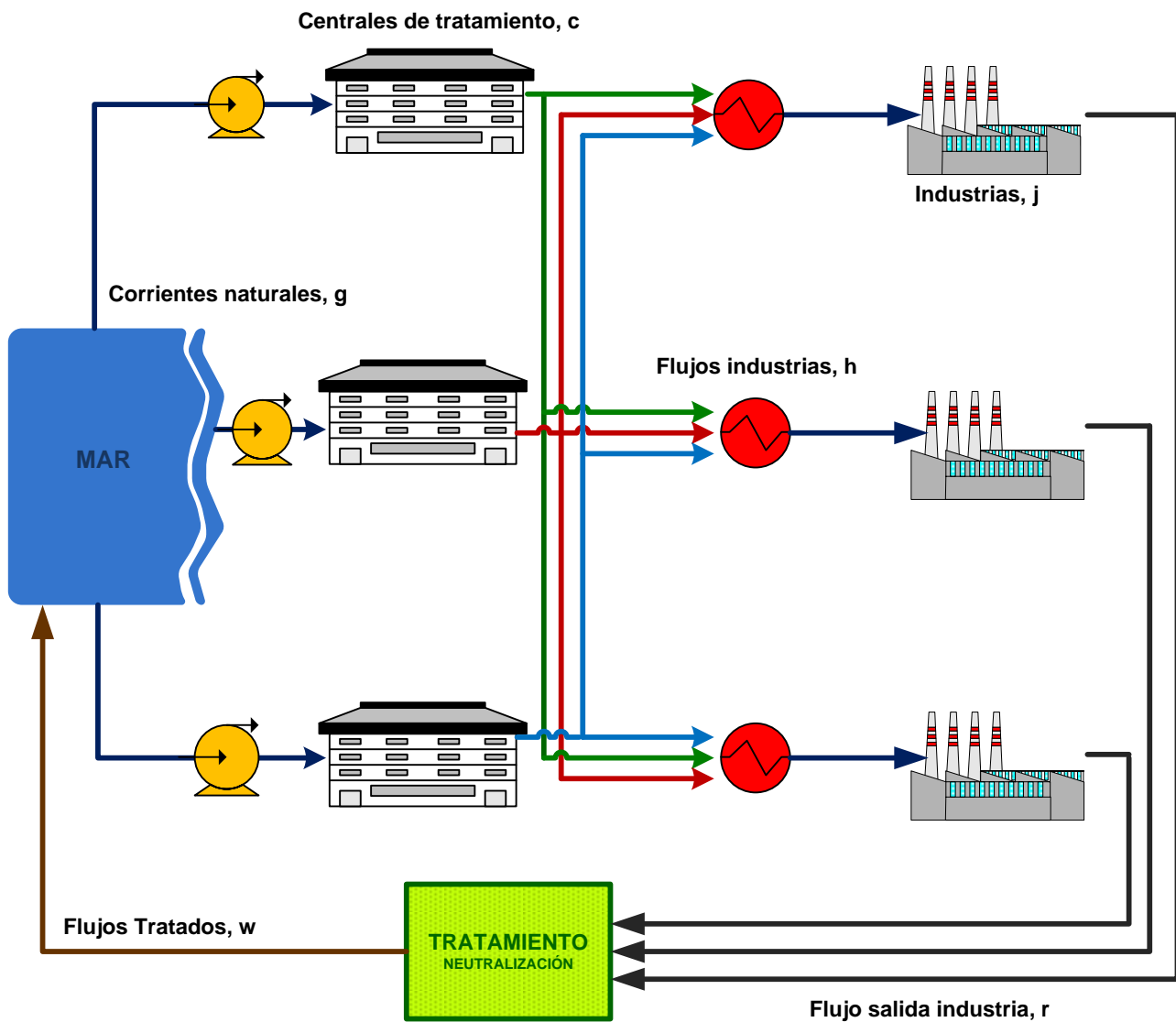


Fig. 4.2 Superestructura

Se tiene agua de mar como medio de enfriamiento, la cual puede ser agua superficial o agua de mar profunda. La diferencia principal entre una y otra radica en el nivel de temperatura con que se obtiene; mientras que el agua superficial puede alcanzar una temperatura mínima de 20°C y máxima de 30°C en regiones tropicales (Ayala y col, 1987), el agua de mar profunda puede alcanzar temperaturas de hasta 4°C (Cifuentes y col, 1986) [6]. Independientemente de la procedencia (superficial o profunda), el agua de mar debe ser tratada adicionando biosidas con la finalidad de disminuir el crecimiento de bioincrustaciones. Una vez que se agrega el biosida; el agua es distribuida a la zona industrial, el agua de mar pasa por los intercambiadores de calor donde retira el calor para lograr dicho enfriamiento. Para reducir el impacto medioambiental, el agua utilizada en el proceso debe ser tratada con un producto químico de neutralización antes de ser descargada al medio ambiente esto con la finalidad de que adquiera condiciones adecuadas sin que tenga repercusiones ecológicas, ni contaminación. Con la finalidad de determinar la cantidad de servicios de enfriamiento necesarios se realiza la integración térmica del proceso analizado, para tal efecto se utiliza el modelo de Yee y Grossmann, 1990.

Cabe señalar que la superestructura sólo es esquemática y representativa y no hace alusión a esa cantidad de industrias.

2.- Modelo Matemático

El problema abordado en este trabajo se puede describir de la siguiente manera.

- Un conjunto de corrientes de proceso caliente (HPS) con temperaturas de entrada conocidos, temperaturas objetivo y propiedades físicas.
- Un conjunto de corrientes de proceso en frío (CPS) con temperaturas de entrada conocidos, temperaturas objetivo y propiedades físicas.
- Se conocen servicios de enfriamiento y calentamiento utilizados.
- La diferencia de temperatura mínima para la transferencia de calor entre las corrientes del proceso.
- El biosida, ya sea producido o comprado fuera de sitio (el coste del biosida y de los requerimientos de energía para producirlo son conocidos).
- Producto químico de tratamiento capaz de neutralizar el biosida con un costo unitario fijo.

Uno de los principales problemas de este enfoque es la reducción de la transferencia de calor debido a la contaminación biológica en los intercambiadores de calor. El agente biosida junto con los mantenimientos regulares se utilizan comúnmente para controlar el crecimiento de la biopelícula.

El problema consiste en encontrar la programación óptima de mantenimientos mecánicos, que minimiza el costo anual total.

Balances de Masa en la superestructura

Balance en el área de Centrales de tratamiento

$$F_{M,t} = \sum_i g_{i,t}$$

Flujos de agua de mar destinados a las industrias.

$$g_{i,t} = \sum_j h_{i,j,t}$$

Flujos provenientes de industrias hacia la zona de tratamiento

$$\sum_j h_{i,j,t} = \sum_j r_{j,t}$$

Flujos tratados provenientes de industrias que se devuelven al mar.

$$\sum_j r_{j,t} = w_t$$

3.- Modelo del biosida y programación de mantenimiento.

Para establecer el modelo, se partirá de un balance de masa alrededor de la central de tratamiento; siendo directamente donde se inyectará el biosida al agua de mar. De dicho balance se obtiene la concentración en la central de tratamiento (C_t^c). Considerando que el flujo del agua de mar ($F_{c,t}$) es mucho mayor que el flujo de biosida (F_t^{bio}), además si analizamos la concentración de éste último en el agua de mar es insignificante, obtenemos la siguiente relación:

$$C_t^c = \frac{F_t^{bio} C^{alim}}{F_{c,t}}, \quad \forall t \in ND \quad (1)$$

Donde C^{alim} es la concentración de biosida. De acuerdo a nuestros escenarios se considera que el biosida se puede producir o comprar, por tanto el flujo del biosida utilizado es:

$$F_t^{bio} = F_t^{bio,comprado} + F_t^{bio,producido}, \quad \forall t \in ND \quad (2)$$

Para calcular la concentración residual de biosida en cada segmento del proceso en un determinado tiempo ($C_{i,j,t}$) se asume una cinética de primer orden. ([1], [2]). Por lo tanto la concentración residual para el componente (j) en el segmento del proceso (i) está en función de la concentración de dicho segmento (que es igual a la concentración residual del segmento anterior, ($C_{i-p,j,t}$), un decaimiento de la constante de velocidad ($k_{i,t}$) y el tiempo de residencia ($\tau_{i,t}$) en el segmento es:

$$C_{i,j,t} = C_{i-p,j,t} e^{-k_{i,t} \tau_{i,t}}, \quad \forall i \in NI, \forall j \in NC, \forall t \in ND \quad (3)$$

Aquí ($C_{i,j,t}$), y ($C_{i-p,j,t}$) son las concentraciones de biosida del componente clave j en los segmentos del proceso i e $i-p$ en un tiempo dado t , (mg / l), $\tau_{i,t}$ es el tiempo de residencia en el segmento de proceso i en el tiempo t (min), $k_{i,t}$ es la constante de decaimiento en el segmento de proceso i en un tiempo t (min^{-1}).

La constante de decaimiento es proporcional a la temperatura T ($^{\circ}C$) en el segmento de proceso i en el tiempo t ([2]):

$$k_{i,t} = 6.8 \times 10^{-4} \left(\frac{1}{\min^{\circ}\text{C}} \right) \cdot T_{i,t}, \quad \forall i \in NI, \forall t \in NT \quad (4)$$

Las temperaturas en la red se calculan con los balances de energía alrededor de cada segmento de proceso suponiendo que las propiedades del agua de mar (densidad y el Cp) son independientes de la temperatura en el rango de operación del proceso (es decir, 20-30 ° C para el agua de enfriamiento) ([3], [4]). Del balance de energía, se obtiene la siguiente relación:

$$T_{i,t} = \frac{Q_{i,t}}{F_{i,t} \rho^{am} Cp^{am}} + T_{i-p,t}, \quad \forall i \in NI, \forall t \in ND \quad (5)$$

Donde $F_{i,t}$ es el caudal total en el segmento del proceso i en un tiempo t (m³/hr), ρ^{am} es la densidad del agua de mar (kg/m³), y Cp^{am} es la capacidad calorífica del agua de mar (J/Kg ° C).

En la central de tratamiento de neutralización, una sustancia química se utiliza para neutralizar el biosida; en este segmento del proceso, la concentración residual se calcula:

$$C_{i,j,t} = \frac{C_{i-p,j,t} F_{i-p,t} - C_t^{Quim} F_t^{Quim} + \psi_t C_t^{Quim}}{F_{i,t}} e^{-k_{i,t} \tau_{i,t}}, \quad \forall i = FT, \forall j \in NC, \forall t \in ND \quad (6)$$

Aquí C_t^{Quim} es la concentración de la sustancia química que utilizamos para la neutralización, F_t^{Quim} es su flujo; ψ_t es el exceso de químico usado. Se considera que el flujo total del químico usado no contribuye de manera significativa al flujo total en el segmento del proceso t. La regulación ambiental impone límites para los niveles de biosida y tratamiento con químicos que pueden ser descargados al medio ambiente.

El efecto de la formación de la biopelícula en el proceso puede ser visto como una reducción en el calor real transferido en los intercambiadores de calor. La relación entre el porcentaje de reducción de la transferencia de calor $\%HTR_{i,t}$ y el espesor de la bio película $d_{i,t}$ (μm) en el segmento i en un tiempo t está dada por:

$$\%HTR_{i,t} = 0.2153 \cdot d_{i,t}, \quad \forall i \in NIC, \forall t \in ND \quad (7)$$

El calor real transferido en el segmento de proceso i en el tiempo t , $Q_{i,t}$ (W) se calcula como una función del calor requerido $Q_{i,t}^{Req}$ (W) en el segmento de proceso i en el tiempo t y el porcentaje de reducción de la transferencia de calor:

$$Q_{i,t} = Q_{i,t}^{Req} \left(1 - \frac{\%HTR_{i,t}}{100} \right), \quad \forall i \in NIC, \forall t \in ND \quad (8)$$

El efecto neto sobre el crecimiento de la biopelícula se describe como:

$$d_{i,t} = d^\infty \frac{[1 - e^{-\beta_{i,t} \sigma_{i,t}}]}{e^{-\gamma_{i,t} \omega}}, \quad \forall i \in NIC, \forall t \in ND \quad (9)$$

donde d^∞ es el máximo espesor (μm) permitido de la biopelícula:

$$d^\infty = 250 \mu m \quad (10)$$

La constante de velocidad de crecimiento de la biopelícula $\beta_{i,t}$ para el segmento de proceso i en el intervalo de tiempo t (min^{-1}) viene dada por:

$$\beta_{i,t} = 2.909 \times 10^{-7} \left(\frac{1}{\text{min } ^\circ\text{C}} \right) T_{i,t}, \quad \forall i \in NIC, \forall t \in ND \quad (11)$$

La velocidad de destrucción de la biopelícula para el segmento de proceso i en un intervalo de tiempo t es una función lineal de la concentración del componente clave (CC) j en el intervalo de tiempo $t - 1$ (min^{-1}):

$$\gamma_{i,t} = 2.829 \times 10^{-4} \left(\frac{1}{\min(\text{mg} / \text{L})} \right) C_{j,i,t-1}, \quad \forall j = \text{CC}, \forall i \in \text{NIC}, \forall t \in \text{ND} \quad (12)$$

Aunque $\sigma_{i,t}$ no tiene una interpretación física exacta, puede ser visto como un intervalo de tiempo acumulado, como es una función del espesor de la biopelícula y de la constante de velocidad de crecimiento de la biopelícula, puede ser representado con la siguiente disyunción:

$$\left[\sigma_{i,t+1} = \omega, \forall i \in \text{NIC} \right] \vee \left[\sigma_{i,t+1} = \omega + \left(\frac{-1}{\beta_{i,t}} \right) \ln \left(1 - \frac{d_{i,t}}{d^\infty} \right), \forall i \in \text{NIC} \right], \quad \forall t \in \text{ND}$$

Donde ω es la longitud de un único intervalo de tiempo (min). Si la variable booleana Y_t es verdad, entonces el mantenimiento será programada para el período t y el tiempo acumulado será igual a un único intervalo de tiempo (un día). Por otro lado, si la variable booleana es falsa, entonces ningún mantenimiento será programado y el tiempo acumulado variará en función del espesor de la biopelícula y la tasa de crecimiento de la biopelícula.

La disyunción es reformulada con la técnica de Big -M [5] para producir:

$$\sigma_{i,t+1} - \omega \leq M^U (1 - y_t), \quad \forall i \in \text{NIC}, \forall t \in \text{NT} \quad (13)$$

$$\sigma_{i,t+1} - \omega \geq -M^U (1 - y_t), \quad \forall i \in NIC, \forall t \in NT \quad (14)$$

$$(\sigma_{i,t+1} - \omega) \beta_{i,t} + \ln \left(1 - \frac{d_{i,t}}{d^\infty} \right) \leq M^U (y_t), \quad \forall i \in NIC, \forall t \in NT \quad (15)$$

$$(\sigma_{i,t+1} - \omega) \beta_{i,t} + \ln \left(1 - \frac{d_{i,t}}{d^\infty} \right) \geq -M^U (y_t), \quad \forall i \in NIC, \forall t \in NT \quad (16)$$

Estas ecuaciones seleccionan el día del año en que se programará el mantenimiento. Para dar flexibilidad en la programación de la operación de la planta, se considera que el espesor de la biopelícula máximo permitido puede variar dependiendo de si el mantenimiento se realiza durante un mes en particular o no, de acuerdo a la siguiente disyuntiva:

$$\left[\begin{array}{c} Y_M \\ d_{i,M} \leq 70 \mu m, \forall i \in NIC \\ d_{i,M-1} \leq 60 \mu m, \forall i \in NIC \end{array} \right] \vee \left[\begin{array}{c} Y'_M \\ d_{i,M} \leq 50 \mu m, \forall i \in NIC \end{array} \right], \quad \forall M \in NM$$

Por lo tanto, el espesor de la biopelícula máximo permitido es de 50 μ m si no hay mantenimiento programado en dos meses consecutivos, pero si el mantenimiento se programa durante el mes M, el espesor máximo es de 70 μ m para ese mes y 60 μ m para el mes anterior (es decir, el mes M- 1). La disyunción se reformula de nuevo utilizando la técnica de Big- M de la siguiente manera:

$$d_{i,M} - 70 \leq M^U (1 - y_M), \quad \forall i \in NIC, \forall M \in NM \quad (17)$$

$$d_{i,M-1} - 60 \leq M^U (1 - y_M), \quad \forall i \in NIC, \forall M \in NM \quad (18)$$

$$d_{i,M} - 50 \leq M^U (1 - y'_M), \quad \forall i \in NIC, \forall M \in NM \quad (19)$$

En este conjunto de ecuaciones y_M es una variable binaria que será igual a uno si el mantenimiento se programa en el mes M , mientras que y'_M es igual a uno si no el mantenimiento está previsto en dos meses consecutivos, M y $M + 1$. La relación entre y'_M , y_M y y_{M+1} se puede expresar de la siguiente manera:

$$y'_M = 1 - y_M - y_{M+1}, \quad \forall M \in NM \quad (20)$$

Sustituyendo en la ecuación (21) se obtiene la siguiente relación:

$$d_{i,M} - 50 \leq M^U (y_M + y_{M+1}), \quad \forall i \in NIC, \forall M \in NM \quad (21)$$

El número máximo de tratamientos que se pueden realizar en un mes se limita a uno

$$y_M \leq 1, \quad \forall M \in NM \quad (22)$$

El número máximo de tratamientos durante un año se limita para n con la siguiente restricción:

$$\sum_M y_M \leq n \quad (23)$$

La relación entre las variables binarias y_t y y_M está dada por:

$$\sum_{t \in M} y_t = y_M, \quad \forall M \in NM \quad (24)$$

Nótese que t es el intervalo de tiempo en días, mientras que M es el intervalo de tiempo en meses.

El modelo propuesto fue codificado en la plataforma de optimización GAMS como un problema de programación mixto entera no lineal (MINLP) el cual fue resuelto con SBB (Spatial Branch and Bound).

5.-RESULTADOS

Caso de Estudio. Basado en un proceso industrial (planta de acrilonitrilo).

Tabla 5.1 Datos de las corrientes del proceso

Corrientes	T _{ent} (°C)	T _{sal} (°C)	FCp (kW/°C)
HPS ₁	21.11	15	115.1
HPS ₂	15	4.44	111.06
HPS ₃	470	287.78	188.46
HPS ₄	287.78	260	126.61
HPS ₅	65.56	51.67	1,160.56
HPS ₆	51.67	37.78	238.44
HPS ₇	48.89	37.78	13.19
HPS ₈	32.22	21.11	633.03
HPS ₉	76.67	65.56	31.65
HPS ₁₀	143.33	132.22	1,503.45
HPS ₁₁	136.67	48.89	120.2
HPS ₁₂	43.33	21.11	112.1
CU	15	30	
CPS ₁	37.78	55.56	39.56
CPS ₂	37.78	55.56	65.94
CPS ₃	87.78	287.78	80.59
CPS ₄	22.22	26.67	263.76
CPS ₅	21.11	26.67	263.76
CPS ₆	21.11	26.67	211.01
CPS ₇	87.78	104.44	1,213.31
CPS ₈	136.67	146.11	930.93
HU	350	280	
AMS	20	30	
AMP	4	15	

Una vez planteado el problema, se empleó el modelo **SYNHEATH** para resolver la integración térmica de las corrientes del proceso, obteniendo una configuración que representa una red óptima de ahorro energético, considerando el empleo óptimo de calor de

las corrientes; además se obtiene la cantidad de intercambiadores de calor para satisfacer las demandas de la red. La red obtenida (Fig. 5.1) muestra las corrientes frías y calientes del proceso con sus respectivas temperaturas de entrada y salida, así como la cantidad de intercambiadores de calor necesarios para satisfacer la integración térmica de las corrientes

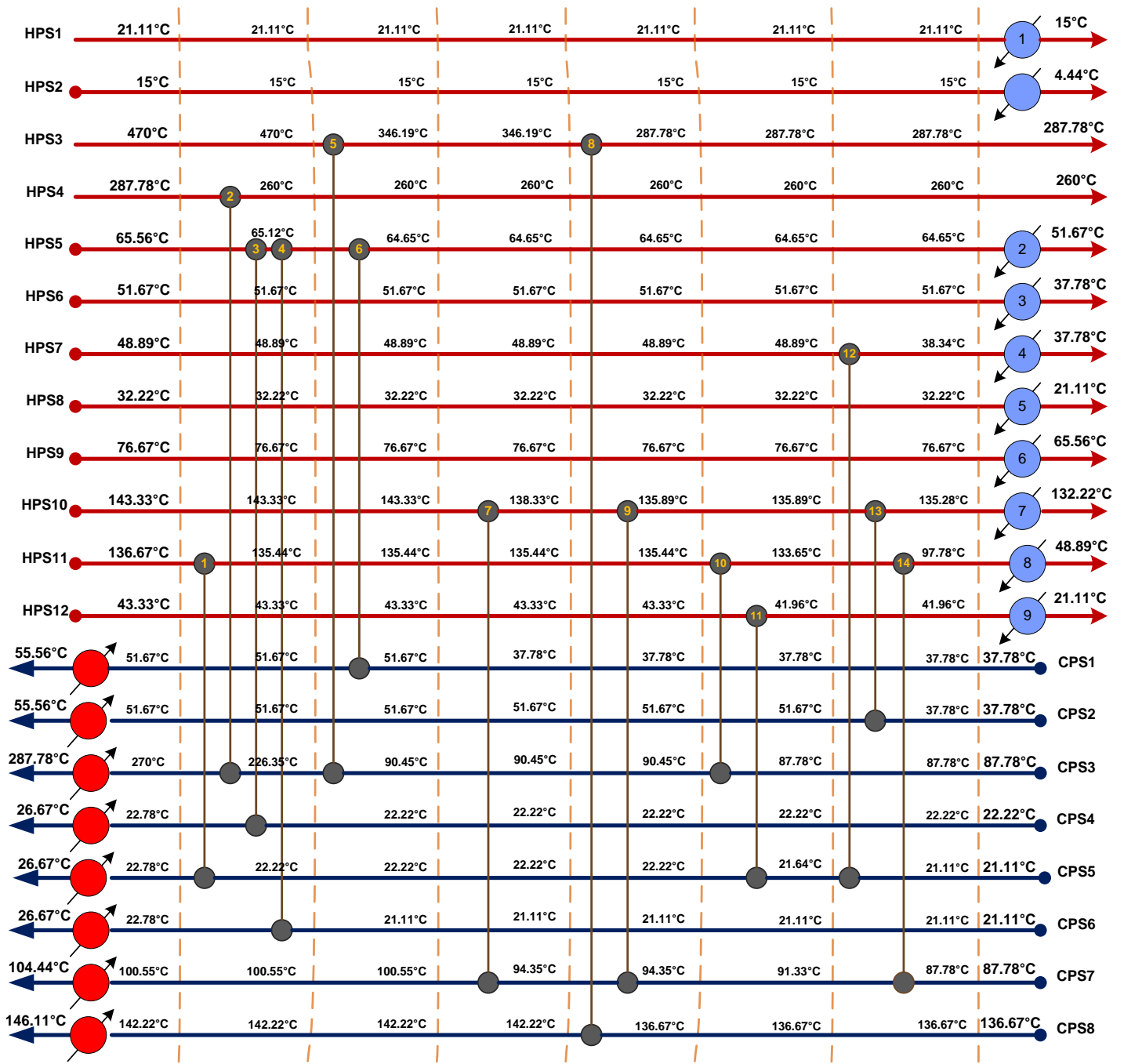


Fig. 5.1 Integración Térmica

como se muestra en la Tabla 5.2. También se muestra la cantidad de servicios de enfriamiento y calentamiento necesarios, para abatir las demandas energéticas del proceso (Tablas 5.3 y 5.4). Como se mencionó anteriormente, de la configuración se obtiene el número de intercambiadores de calor utilizando agua de mar como fluido de enfriamiento y con sus respectivas cargas de calor, con lo cual los flujos de agua de mar se pueden determinar (se debe mencionar que con el fin de generar la planificación óptima de la dosificación de biosida y la programación del mantenimiento, no se requiere el diseño detallado del intercambiador de calor, sólo se necesitan datos sobre temperaturas, caudales de agua de mar y la concentración de biosida).

Tabla 5.2 Integración térmica de corrientes calientes y frías

Intercambiador	Corriente Caliente	Corriente Fría	Q (kW)
1	HPS11	CPS5	147.706
2	HPS4	CPS3	3517.226
3	HPS5	CPS4	147.706
4	HPS5	CPS6	352.387
5	HPS3	CPS3	10952.52
6	HPS5	CPS1	549.488
7	HPS10	CPS7	7517.25
8	HPS3	CPS8	5166.662
9	HPS10	CPS7	3665.211
10	HPS11	CPS3	215.364
11	HPS12	CPS5	152.619
12	HPS7	CPS5	139.155
13	HPS10	CPS2	915.907
14	HPS11	CPS7	4311.508

Tabla 5.3 Servicios de Enfriamiento requeridos

Servicios de Enfriamiento en:	Q (kW)
H1	703.261
H2	15070.598
H3	3311.93
H4	7.386
H5	7032.963
H6	351.634
H7	4604.962
H8	5876.578
H9	2337.24

Tabla 5.4 Servicios de Calentamiento requeridos

Servicios de Calentamiento en:	Q (kW)
C1	152.88
C2	256.51
C3	1432.89
C4	1026.02
C5	1026.02
C6	820.83
C7	4719.776
C8	3621.31

Una vez obtenida la red térmicamente integrada, lo cual significa un ahorro considerable en costos de servicios de enfriamiento y calentamiento (Tabla 5.5), se busca una programación óptima para el mantenimiento de la red para lo cual se propone clasificar los intercambiadores de Mayor y Menor capacidad, esto en función de las cargas térmicas referente a los servicios de enfriamiento de la Tabla 5.3.

Tabla 5.5 Comparación de Servicios de Enfriamiento y Calentamiento con y sin Integración térmica

Q(kW) Sin Integración Térmica	Q (kW) Con Integración Térmica	%Ahorro
147252	52353	64

El factor limitante para tal decisión, fueron las cargas térmicas dando que corresponden a intercambiadores de mayor capacidad y otros de menor, por lo que los intercambiadores de menor capacidad nos darían la pauta a la hora de establecer el programa de mantenimiento, ya que por el área requerirían a muy pronta fecha un mantenimiento, no siendo viable para el caso de los intercambiadores de mayor capacidad, ya que se requerirían más mantenimientos al año.

Clasificación Propuesta

Se propone clasificar los Intercambiadores de Calor de Mayor y Menor capacidad en función de las cargas térmicas (Nápoles 2012). Sería posible armar la red conjuntamente, sin embargo no sería factible hablando de paro de la planta por mantenimientos y costos totales anuales de operación.

Además en este trabajo, para el problema planteado se consideran dos casos de estudio:

CASO A. Considerando la capacidad de producción de biosida en la planta

CASO B. Considerando la compra total del biosida

Se proponen ambos escenarios para visualizar la variación de los costos anuales totales de operación (mantenimiento, biosida y químicos), además analizar cómo influye en la programación de los mantenimientos estos casos. ¿Qué es más factible hablando en cuestión de costos? ¿Cuál escenario nos da la programación de mantenimientos óptima?

Las Figs. 5.2 y 5.3 muestran las representaciones del sistema de enfriamiento para cada clasificación de acuerdo a lo propuesto:

Intercambiadores de Calor de Mayor Capacidad

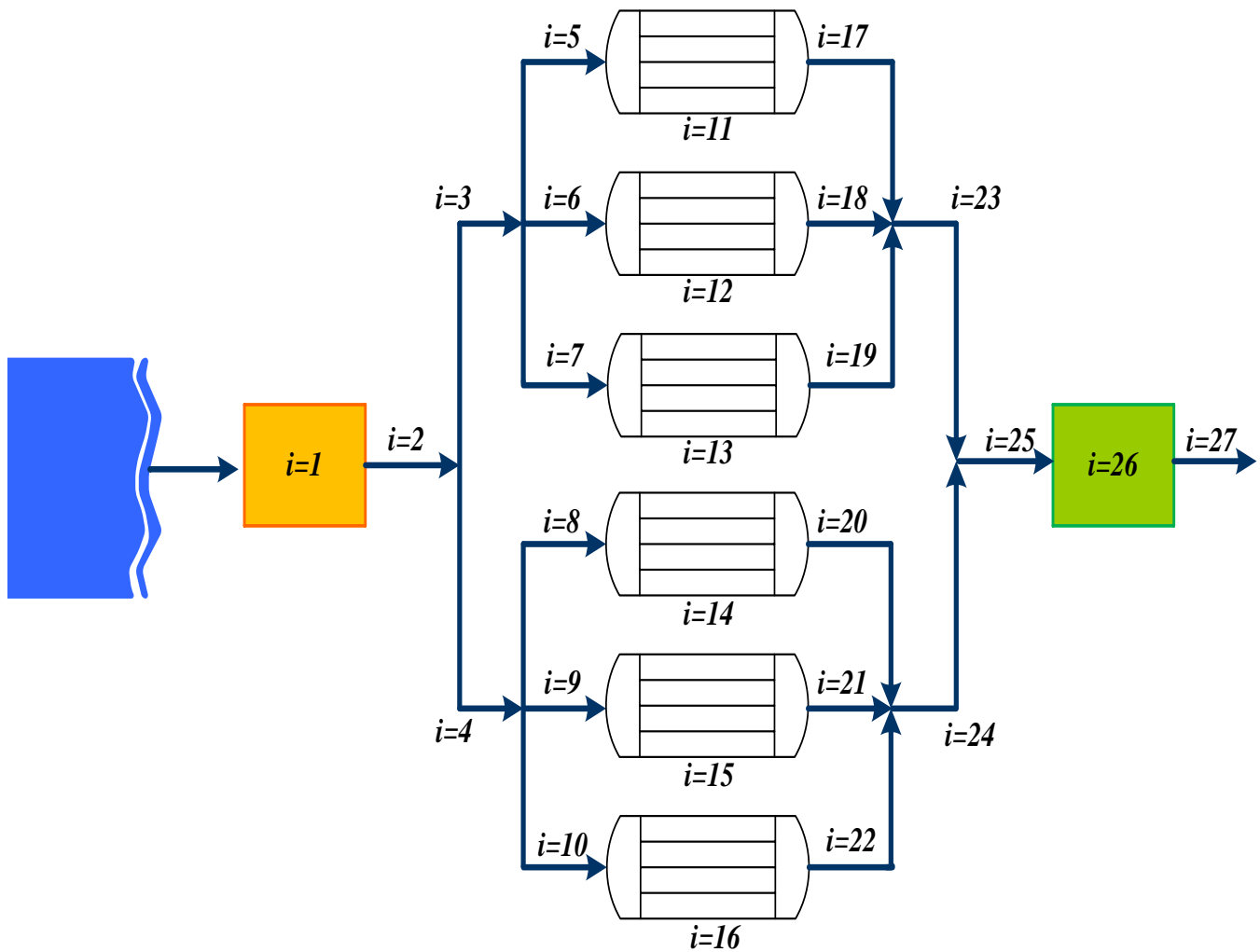


Fig. 3.2 Sistema de enfriamiento para el caso de estudio (Intercambiadores de Calor de Mayor Capacidad)

Intercambiadores de Calor de Menor Capacidad

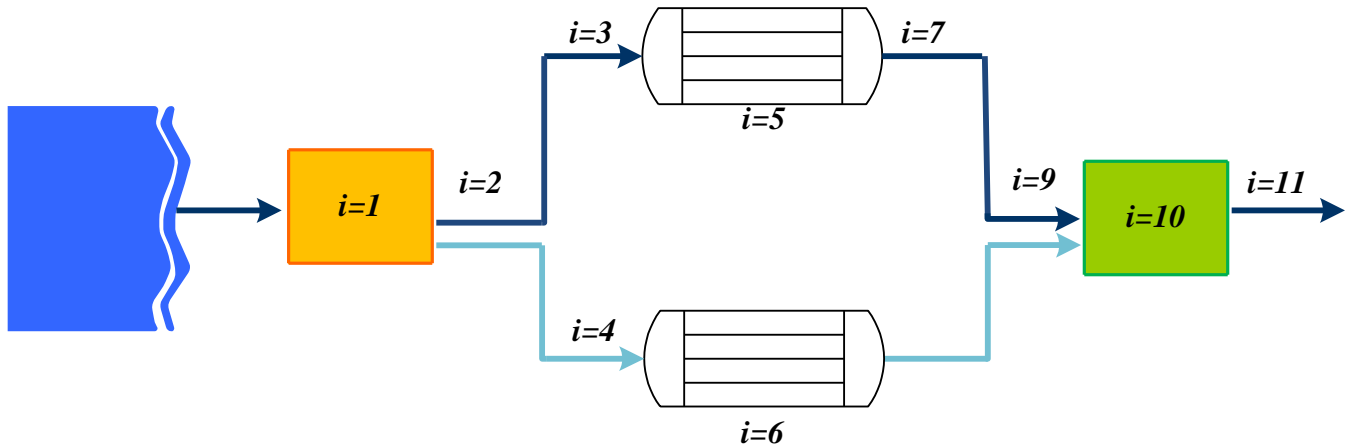


Fig. 5.3 Sistema de enfriamiento para el caso de estudio (Intercambiadores de Calor de Menor Capacidad).

Cálculo de los flujos de agua de mar en cada segmento del proceso

Para el planteamiento del problema requerimos saber el flujo de agua de mar, para lo cual necesitamos datos de C_p y ρ del agua de mar (datos bibliográficos), la diferencia mínima de temperatura y el calor transferido Q de cada enfriador, presentado en la tabla 5.3.

Los flujos de agua de mar conocidos para cada intercambiador son fundamentales para poder establecer los mantenimientos durante el año, ya que los flujos están asociados al crecimiento de la biopelícula.

Se parte de la siguiente ecuación $Q=m\rho C_p\Delta T$ y realizando un despeje de la cantidad de

masa obtenemos: $m = \frac{Q}{\rho C_p \Delta T}$

Dónde: $m = \text{Flujo másico del I.C} \left(\frac{m^3}{h} \right)$

$$Q = \text{Calor correspondiente a los servicios de enfriamiento} \left(\frac{KJ}{s} \right)$$

$$C_p = \text{Capacidad Calorífica del agua de mar en} \left(\frac{KJ}{Kg^\circ C} \right)$$

$$\rho = \text{densidad de agua de mar en} \left(\frac{Kg}{m^3} \right)$$

$$\Delta T = \text{Diferencia de temperatura en } (^\circ C)$$

Intercambiadores de Calor de Mayor Capacidad

$$m_{11} = \frac{\left(15070.598 \frac{KJ}{s} \right) \left(\frac{3600s}{h} \right)}{\left(1026.562 \frac{Kg}{m^3} \right) \left(3.9937 \frac{KJ}{Kg^\circ C} \right) (10^\circ C)} = 1323.34 \frac{m^3}{h}$$

$$m_{12} = \frac{\left(3311.93 \frac{KJ}{s} \right) \left(\frac{3600s}{h} \right)}{\left(1026.562 \frac{Kg}{m^3} \right) \left(3.9937 \frac{KJ}{Kg^\circ C} \right) (10^\circ C)} = 290.82 \frac{m^3}{h}$$

$$m_{13} = \frac{\left(7032.96 \frac{KJ}{s}\right) \left(\frac{3600s}{h}\right)}{\left(1026.562 \frac{Kg}{m^3}\right) \left(3.9937 \frac{KJ}{Kg^{\circ}C}\right) (10^{\circ}C)} = 617.56 \frac{m^3}{h}$$

$$m_{14} = \frac{\left(4604.96 \frac{KJ}{s}\right) \left(\frac{3600s}{h}\right)}{\left(1026.562 \frac{Kg}{m^3}\right) \left(3.9937 \frac{KJ}{Kg^{\circ}C}\right) (10^{\circ}C)} = 404.35 \frac{m^3}{h}$$

$$m_{15} = \frac{\left(5876.578 \frac{KJ}{s}\right) \left(\frac{3600s}{h}\right)}{\left(1026.562 \frac{Kg}{m^3}\right) \left(3.9937 \frac{KJ}{Kg^{\circ}C}\right) (10^{\circ}C)} = 516.02 \frac{m^3}{h}$$

$$m_{16} = \frac{\left(2337.243 \frac{KJ}{s}\right) \left(\frac{3600s}{h}\right)}{\left(1026.562 \frac{Kg}{m^3}\right) \left(3.9937 \frac{KJ}{Kg^{\circ}C}\right) (10^{\circ}C)} = 205.23 \frac{m^3}{h}$$

Intercambiadores de Calor de Menor Capacidad

$$m_5 = \frac{\left(703.26 \frac{KJ}{s}\right) \left(\frac{3600s}{h}\right)}{\left(1026.562 \frac{Kg}{m^3}\right) \left(3.9937 \frac{KJ}{Kg^{\circ}C}\right) (10^{\circ}C)} = 61.75 \frac{m^3}{h}$$

$$m_6 = \frac{\left(351.634 \frac{KJ}{s}\right) \left(\frac{3600s}{h}\right)}{\left(1026.562 \frac{Kg}{m^3}\right) \left(3.9937 \frac{KJ}{Kg^{\circ}C}\right) (10^{\circ}C)} = 30.88 \frac{m^3}{h}$$

6.-ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Caso A. Considerando la capacidad de producción de biosida en la planta para Intercambiadores de Calor de Mayor Capacidad.

A continuación se muestran los niveles óptimos de dosificación de biosida y químicos en base mensual. Durante el año se programaron un total de 6 mantenimientos no siendo en meses consecutivos; se aprecia que en el mes de enero la concentración se mantiene constante y enseguida va en ascenso (Tabla 6.1). Debido a que el flujo del agua de mar entra en acción y por tanto conforme aumentan los días incrementan las bio incrustaciones en los intercambiadores de calor. También se observa que en los meses abril, junio, agosto y diciembre hay bajas en la dosificación del flujo de biosida y químicos debido a que se realizó mantenimientos en esos meses por lo tanto puede decirse que los intercambiadores están libres de incrustaciones y por ello tienden a bajar estos flujos. [Figs. 6.1 y 6.2.](#)

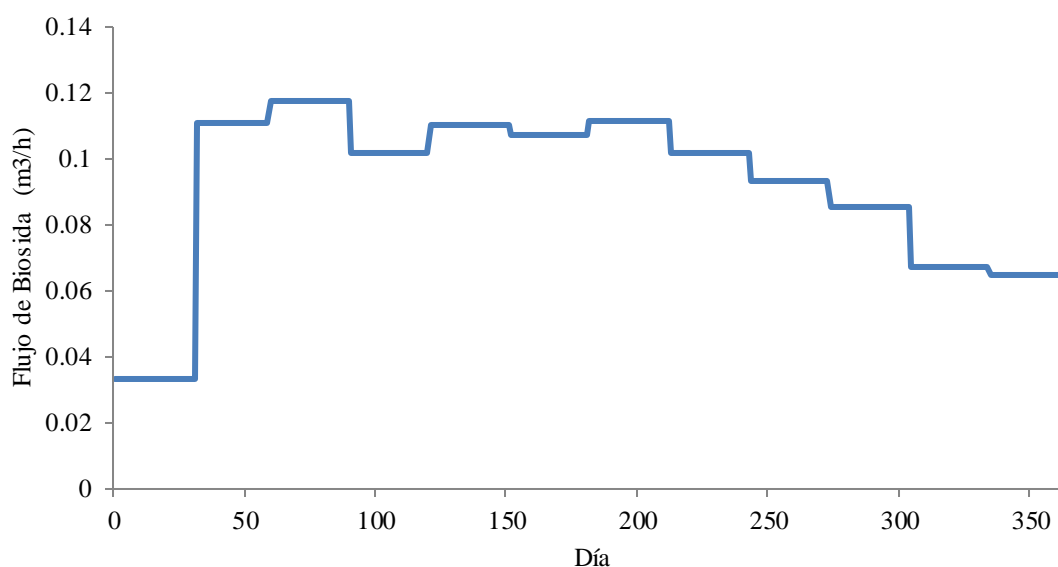


Fig. 6.1 Programación de dosificación de biosida por año

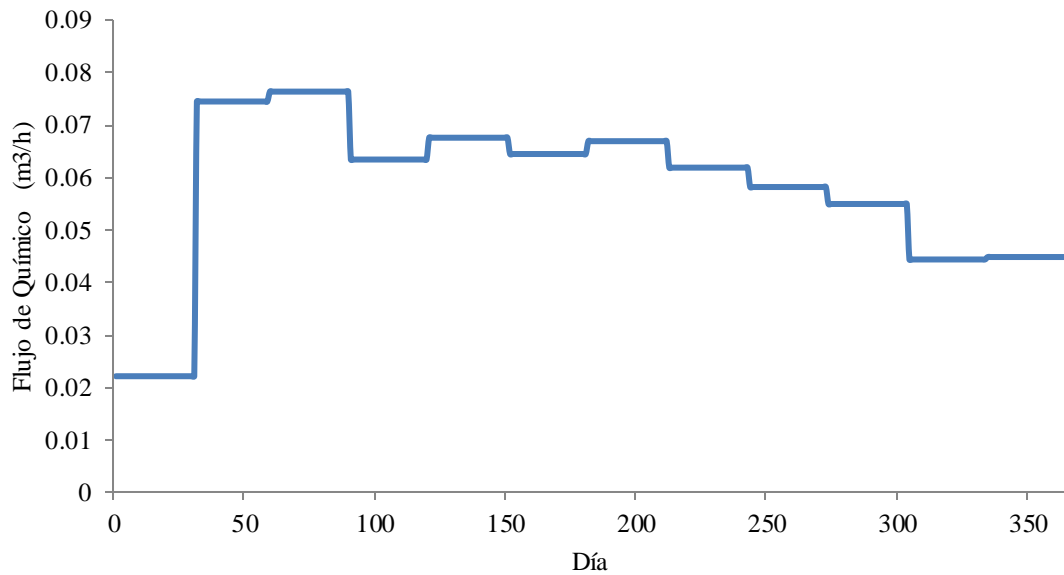


Fig.6.2 Programación de dosificación de químicos al final de la tubería

Enseguida se muestra el calor real transferido y el calor requerido en cada intercambiador de calor durante cada día de año. Se observa que la transferencia de calor real y óptimo solamente se logra cuando hay mantenimientos (debido a que con dicho mantenimiento se detiene y elimina la biopelícula), por lo tanto los intercambiadores de calor están libres totalmente de bio incrustaciones y por lo tanto la transferencia de calor es en su totalidad

Fig. 6.3.

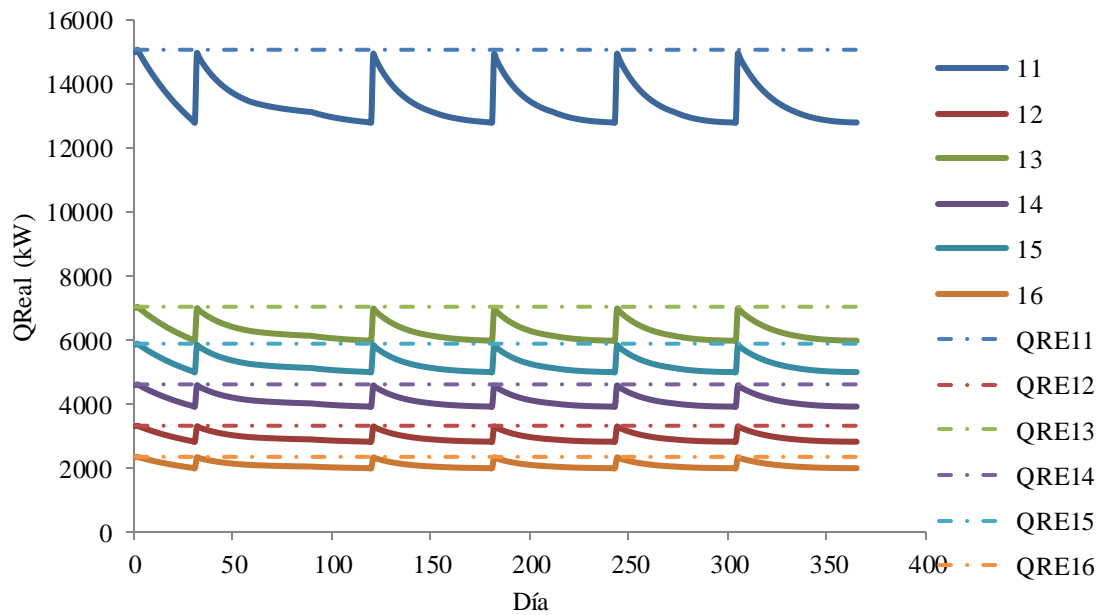


Fig. 6.3 Transferencia de calor actual y requerido en cada Intercambiador de Calor

Tabla 6.1 Muestra el día y el mes donde se llevaran a cabo los mantenimientos

31	120	181	243	304	365
1	1	1	1	1	1
ENE	ABR	JUN	AG	OCT	DIC

Las [figs. 6.4 y 6.5](#) están relacionadas una con la otra, la primera nos muestra el crecimiento de la biopelícula en cada intercambiador de calor por cada día durante todo el año mientras que en la segunda grafica se observa el porcentaje de reducción de transferencia de calor en cada intercambiador, se observa que la reducción de calor va aumentando conforme a crecimiento de la biopelícula debido a que ésta evita la trasferencia de calor hasta un 15% de la cantidad total, caso contrario los días en que se programaron los mantenimientos se

observa que es donde bajan los picos de la gráfica disminuyen los valores de reducción de porcentaje (gracias a que el mantenimiento destruye la biopelícula).

El traslape de las líneas correspondientes a cada intercambiador se debe a que el espesor de la biopelícula en todos los intercambiadores es similar. Debido a que estos intercambiadores tienen características similares (tiempo de residencia, el flujo de agua de mar y carga de calor). Para tener una programación de mantenimiento óptima, ya que todos los intercambiadores requerirán al mismo tiempo el mantenimiento, haciendo un paro de la planta una vez para limpiar todos los mantenimientos evitando así paro tras paro, que sería infectable operacional y económicamente.

Se observa que la biopelícula llega a su valor máximo de espesor permitido ($70\mu\text{m}$) durante los meses que se planea el mantenimiento, el permitir el crecimiento de la biopelícula disminuye el calor transferido, pero también reduce el costo de operación debido a que disminuye la cantidad de químicos de tratamiento. También se observa nuestra restricción que para el mes anterior al mantenimiento el máximo permitido es de $60\mu\text{m}$.

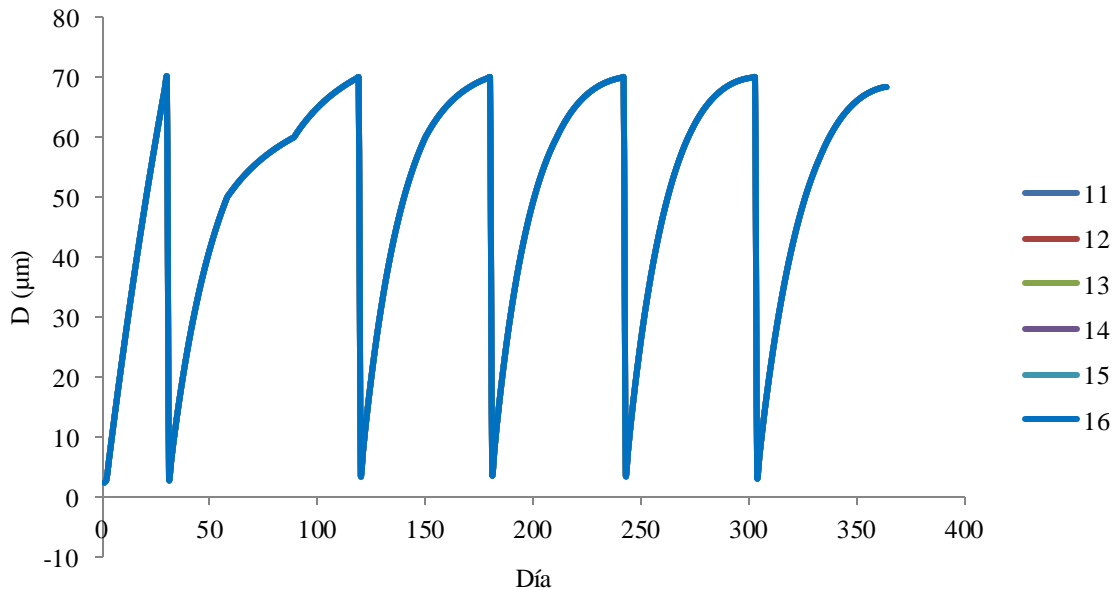


Fig. 4 Perfil de crecimiento de la biopelícula en cada intercambiador de calor

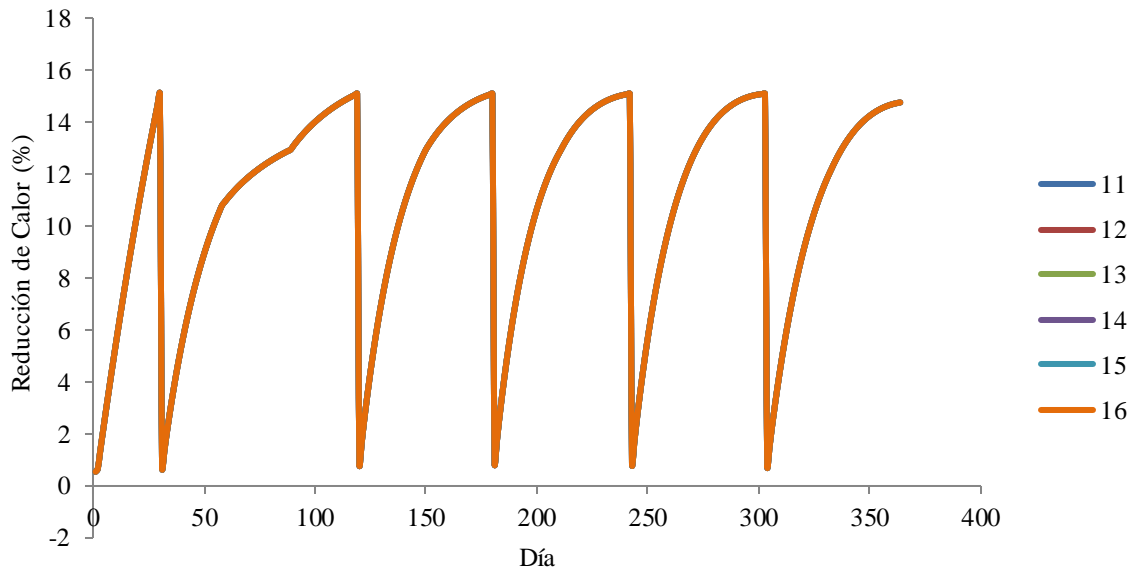


Fig. 6.5 Porcentaje en la reducción de transferencia de calor en cada intercambiador de calor.

La [fig. 6.6](#) Muestra el perfil de concentración de biosida en cada segmento del proceso y en los intercambiadores de calor, se observa como un mes anterior al mantenimiento la concentración de biosida disminuye puesto que no tiene caso seguir suministrando para el control de las bio incrustaciones. Seguido de mantenimiento nuevamente se dosifica en menores cantidades el biosida y ascendentemente hasta que cumplan con lo establecido del espesor de la biopelícula. La restricción del medio ambiente para el máximo de concentración siempre está satisfecho, con valores medios en la descarga (segmento proceso 27) de 0,0012 mg/l.

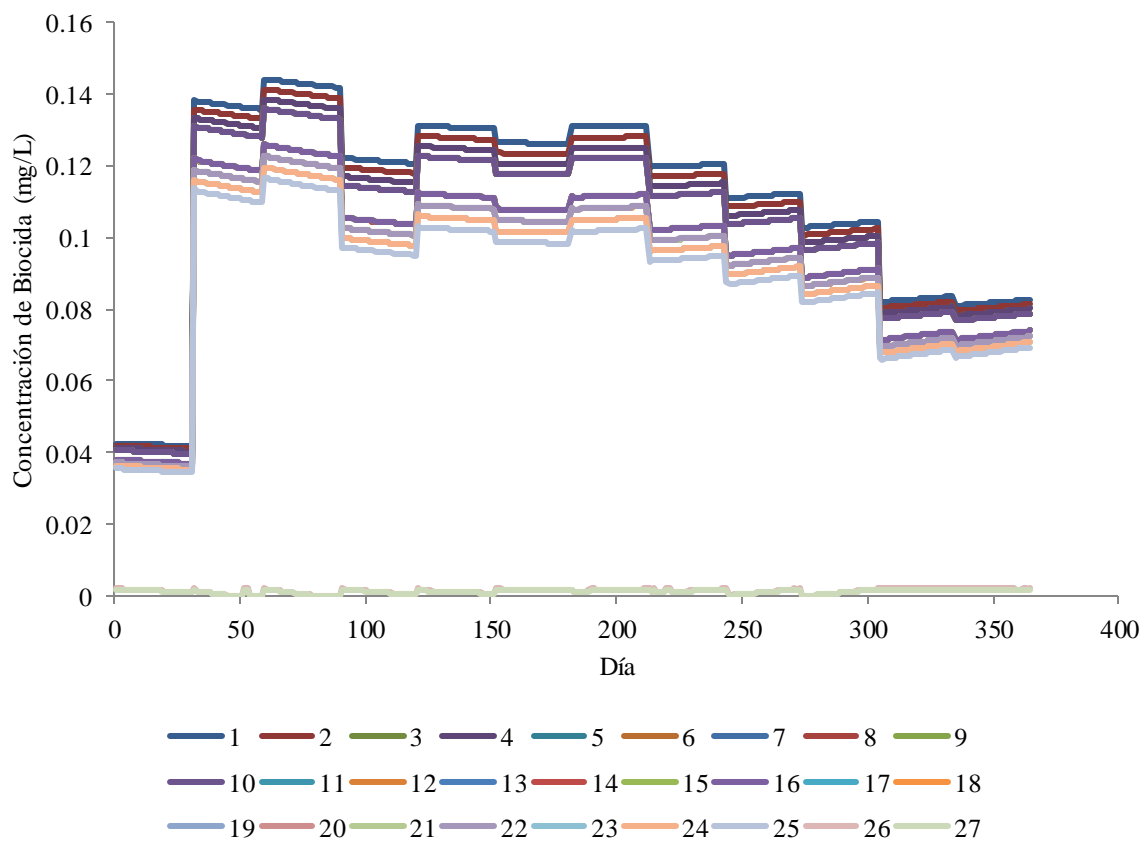


Fig. 6.6 Concentración de biosida en el segmento de proceso i

Caso A. Considerando la capacidad de producción de biosida en la planta para Intercambiadores de Calor de Menor Capacidad.

Se muestran enseguida los niveles óptimos de dosificación de biosida y químicos en base mensual. Durante el año se programó 1 sólo mantenimiento; ya que por el tamaño de los intercambiadores de calor y por el flujo de agua de mar que es muy pequeño no se requiere de más mantenimientos a al año.

Se aprecia que la concentración es constante y va en ascenso hasta el mes de mayo donde gradualmente comienza a disminuir (el biosida y los químicos) debido a que en el mes de julio esa programado el mantenimiento, para ello no se requiere seguir suministrando si se llevara a cabo una limpieza, aquí se aprecia que nuevamente la concentración es baja y posteriormente va dosificándose de acuerdo al programa de dosificación de biosida y químicos .Figs. 6.7 y 6.8.

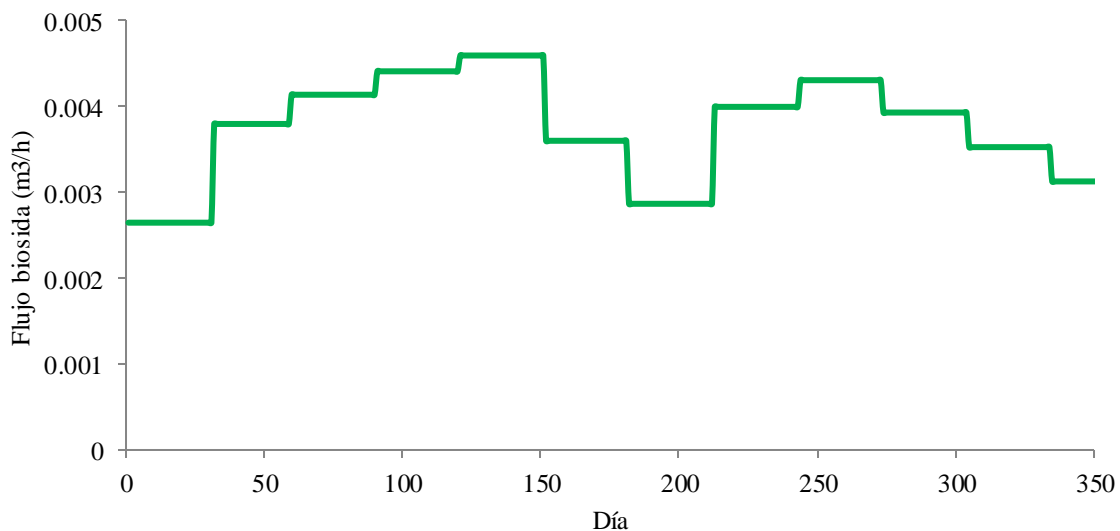


Fig. 5.7 Programación de dosificación de biosida por año

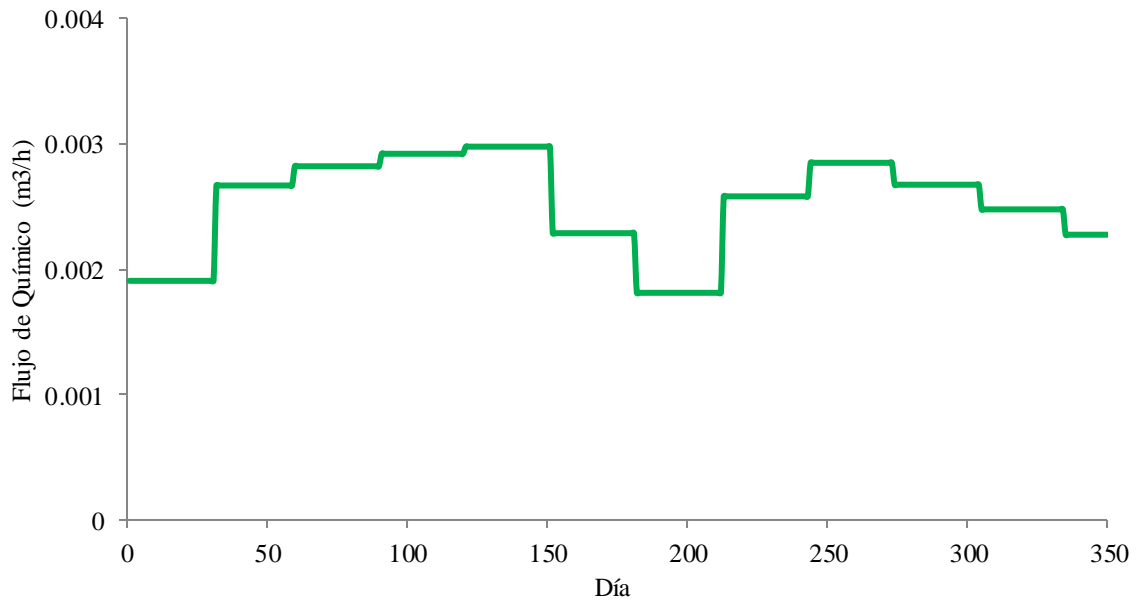


Fig. 6.8 Programación de dosificación de químicos por año

La [fig.6.9](#) Muestra la transferencia eficaz y necesaria en cada intercambiador de calor y en cada segmento del proceso durante cada día de año. Se observa que la transferencia de calor real y óptimo solamente se logra cuando hay mantenimiento (día 212) debido a que con dicho mantenimiento se detiene y elimina la biopelícula).

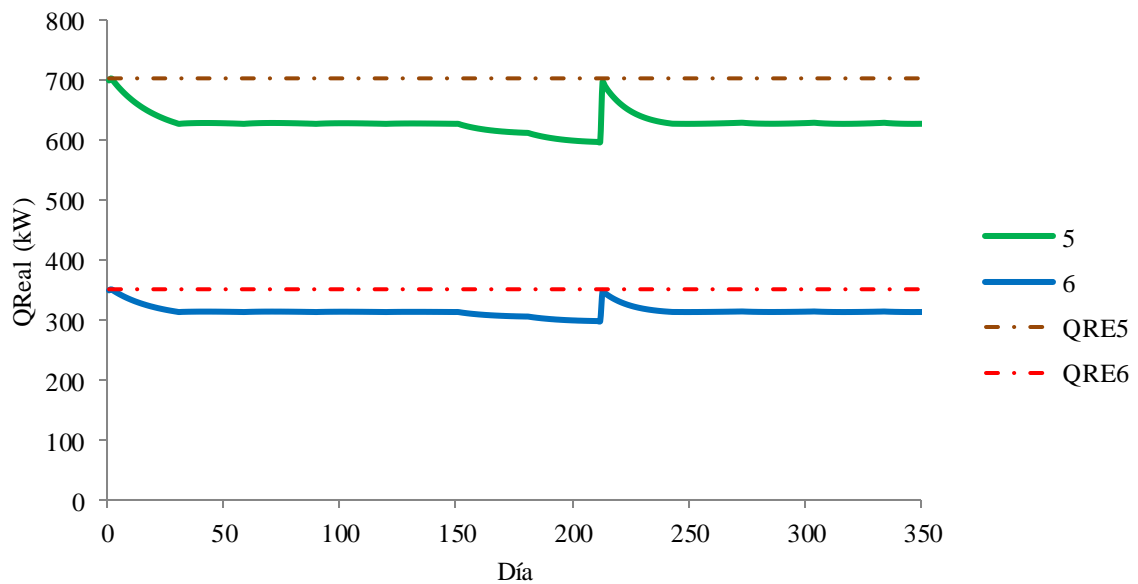


Fig. 6.9 Transferencia de calor actual y requerido en cada intercambiador de calor.

Las [figs. 6.10 y 6.11](#) muestran el crecimiento de la biopelícula en cada intercambiador de calor por cada día durante todo el año mientras y el porcentaje de reducción de transferencia de calor en cada intercambiador. Se observa que la biopelícula al llegar a su valor máximo espesor permitido se programa un mantenimiento para evitar más acumulación de incrustaciones. También se observa nuestra restricción que para el mes anterior al mantenimiento el máximo permitido es de 60 μm .y de 50 μm si no hay mantenimiento programado en dos meses consecutivos.

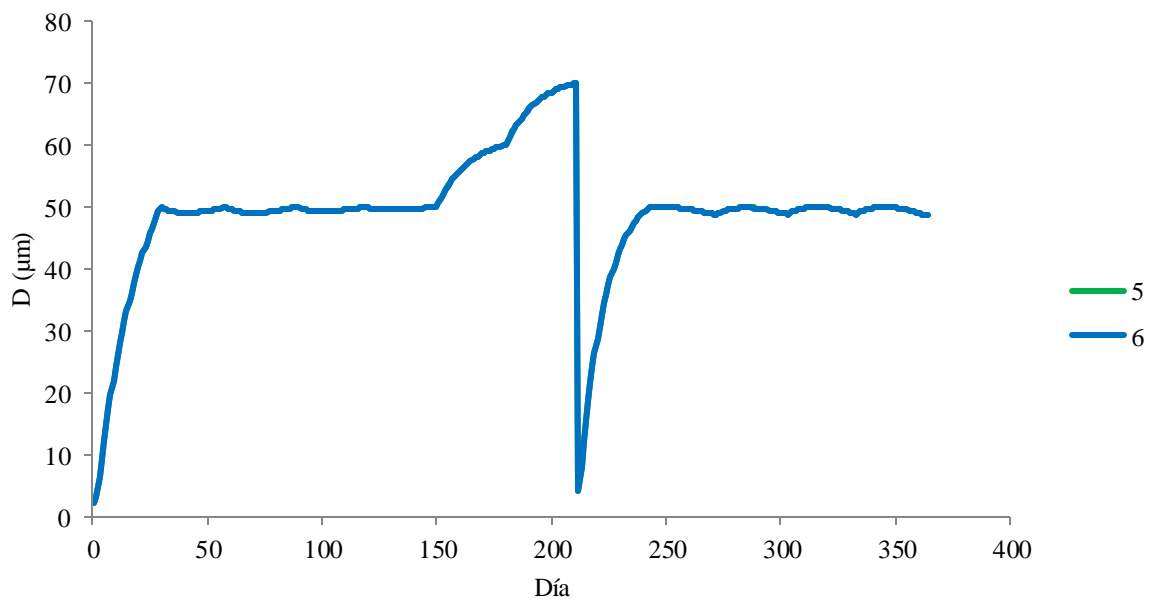


Fig. 6.10 Perfil de crecimiento de la biopelícula en cada intercambiador de calor.

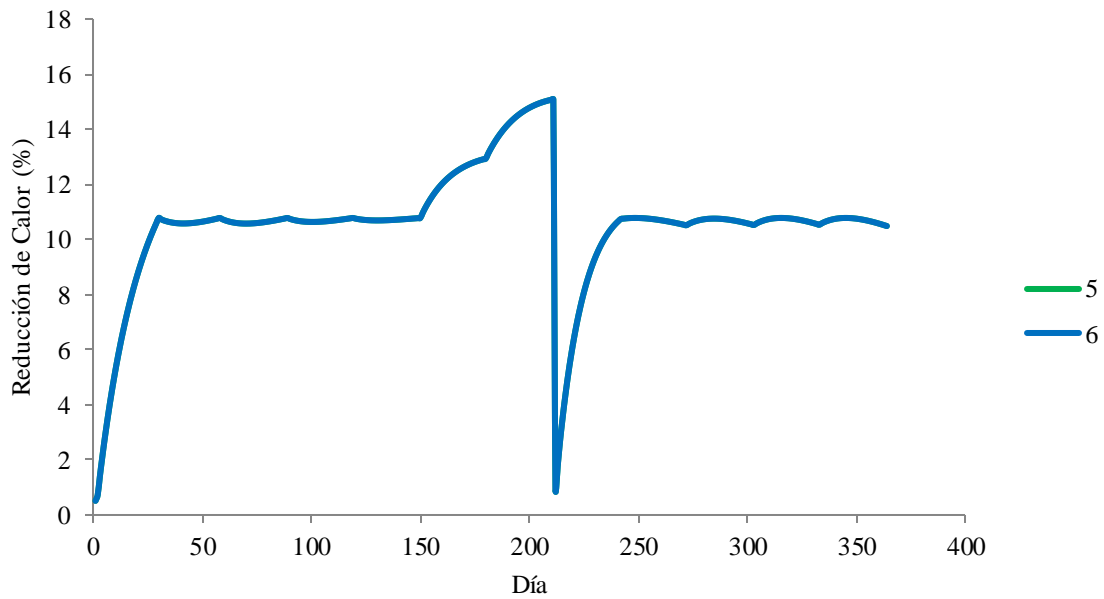


Fig. 6.11 Porcentaje en la reducción de transferencia de calor en cada intercambiador de calor.

La [fig. 6.12](#) Muestra el perfil de concentración de biosida en cada segmento del proceso y en los intercambiadores de calor, se observa como varia la concentración a través del tiempo, así como la disminución del biosida cuando hay vísperas de un mantenimiento.

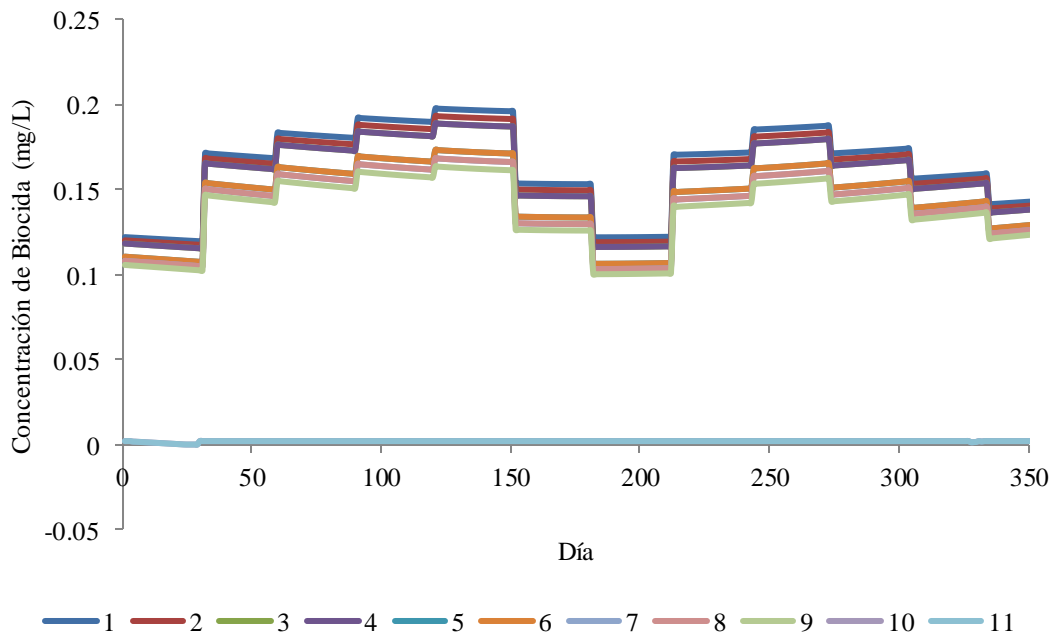


Fig. 6.12 Concentración de biosida en el segmento del proceso i

Caso B. Considerando la compra total de biosida para Intercambiadores de Calor de Mayor y Menor Capacidad.

Los siguientes dos casos se trataran de manera general. El comportamiento de los flujos de biosida y químico de tratamiento es similar al caso en el que se produce el biosida en planta, tendiendo a bajar cuando se programa un mantenimiento. Se observó que la cantidad de mantenimientos es la misma pero se programan en diferente día para ambos casos (intercambiadores de mayor y menor capacidad) con respecto al caso en el que se produce el biosida. La transferencia de calor está relacionada directamente con el espesor de la biopelícula, transfiere más calor al dar mantenimiento, mientras que conforme aumenta la biopelícula éste disminuye. La diferencia más relevante en este caso radica en costo total anual de operación, el cual aumenta en un 45 %. Como se muestra en las Tablas 6.2 y 6.3.

Tabla 6.2 Costos de Operación para cada caso propuesto en Intercambiadores de Calor de Mayor Capacidad

	PRODUCIDO	COMPRADO
Costo Total	\$ 1,817,000.00	\$ 3,159,000.00
Costo de Biosida	\$ 182,000.00	\$ 1,563,000.00
Costo Químicos	\$ 1,275,000.00	\$ 1,236,000.00
Costo Mantenimiento	\$ 360,000.00	\$ 360,000.00

Tabla 6.3 Costos de operación para cada caso propuesto en Intercambiadores de Calor de Menor Capacidad

	PRODUCIDO	COMPRADO
Costo Total	\$ 74,349.00	\$ 135,300.00
Costo de Biosida	\$ 425.00	\$ 65,500.00
Costo Químicos	\$ 55,167.00	\$ 54,800.00
Costo Mantenimiento	\$ 15,000.00	\$ 15,000.00

7.-ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Intercambiadores de Calor de Mayor Capacidad

Se llevó a cabo un análisis de sensibilidad respecto al número propuesto de mantenimientos al año, los números de mantenimientos fijados al año fueron 1, 2, 3, 4, 5 y 6. La Fig. 7.1. Muestra el comportamiento del proceso; se puede apreciar que el costo total anual mínimo para una dosis mensual se encuentra fijando 6 mantenimientos por año (Tabla 7.1).

El comportamiento se observa lineal respecto a costos de operación, en ese caso conviene implementar 6 tratamientos al año ya que sería más factible en cuestiones de costo, por el contrario dar mantenimiento solo una vez puede resultar más atractivo en el sentido de planeación ya que requiere menos paros programados, la decisión de cuantos mantenimientos dar es un compromiso entre el costo y la operación del proceso.

Tabla 7.1 Costo total de operación respecto al número de mantenimientos al año

# Tratamientos	Costo \$MM/Año
1	\$ 2,285,000.00
2	\$ 2,166,000.00
3	\$ 2,082,000.00
4	\$ 1,963,000.00
5	\$ 1,888,000.00
6	\$ 1,817,000.00

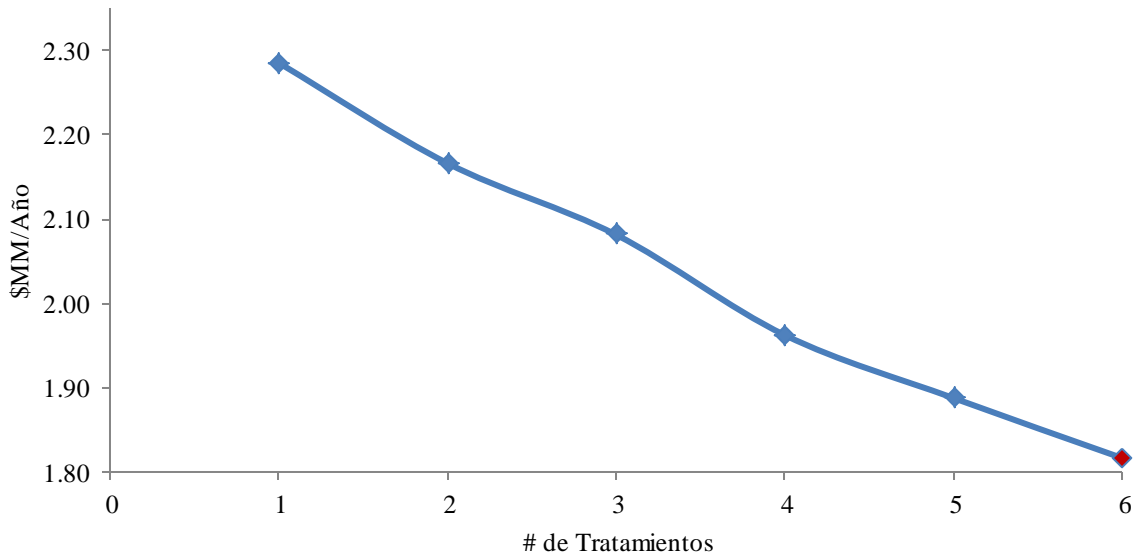


Fig. 7.1 Análisis de Sensibilidad para Intercambiadores de Calor de Mayor Capacidad

Intercambiadores de Calor de Menor Capacidad

Se llevó a cabo un análisis de sensibilidad respecto al número propuesto de mantenimientos al año, los números de mantenimientos fijados al año fueron 1, 2, 3, 4, 5 y 6. La fig.7.2 Muestra el comportamiento del proceso; se puede apreciar que el costo total anual mínimo para una dosis mensual se encuentra fijando 1 mantenimiento por año.

El comportamiento se observa lineal respecto a costos de operación, en ese caso conviene implementar 1 tratamientos al año (334) ya que sería más factible en cuestiones de costo y operatividad, por el contrario dar más mantenimientos al año no resulta factible económicamente ni mucho menos operacionalmente (ya que se tratan de intercambiadores de calor de menor capacidad por lo que un mantenimiento al año es más que suficiente para controlar el crecimiento de bioincrustaciones en los intercambiadores (Tabla 7.2).

Tabla 7.2 Costo total de operación respecto al número de mantenimientos al año

# Tratamientos	Costo \$\$/Año
1	\$ 74,349.00
2	\$ 84,474.00
3	\$ 94,886.00
4	\$ 104,957.00
5	\$ 116,548.00
6	\$ 126,696.00

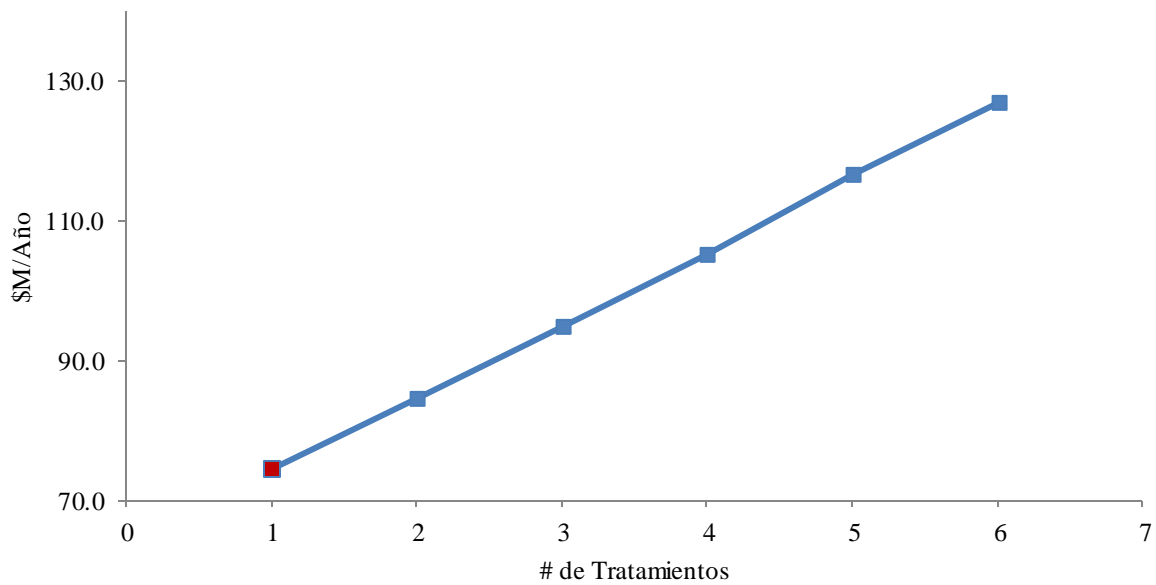


Fig. 7.2 Análisis de sensibilidad para Intercambiadores de Calor de Menor Capacidad.

8.-CONCLUSIONES

La integración energética de procesos, permite la disminución de consumo de energías fósiles al promover el máximo aprovechamiento de la energía del proceso, de tal manera que es posible reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Por otro lado el uso de agua de mar y agua de mar profunda como medio de enfriamiento es una alternativa viable en especial en zonas cercanas al mar con limitaciones geográficas como pueden ser zonas desérticas e islas. Ya que permiten reducir el consumo de agua fresca. La conjunción de ambas estrategias permite el diseño de procesos sustentables desde el punto de vista económico y ambiental. Sin embargo, el uso de agua de mar representa retos asociados a la operación de equipos expuestos a bioincrustaciones, por lo que es de vital importancia considerar dicho aspecto en los programas de planeación de mantenimiento de instalaciones. La estrategia presentada en este trabajo, considera la integración de todos los aspectos antes mencionados para lo cual se planteó un modelo de optimización para la programación de mantenimientos en procesos industriales que utilizan agua de mar como medio de enfriamiento. El modelo considera restricciones técnicas y ambientales y minimiza el costo anual total de la red. La descripción detallada de cada caso nos da un panorama de las opciones para la operación del proceso y la relación entre aspectos económicos, técnicos y de operación, así como la dinámica del espesor de la biopelícula, la concentración de biosida y el calor transferido en cada segmento del proceso. El desarrollo de modelos matemáticos con la finalidad de optimizar procesos suele ser muy atractiva ya que nos permite visualizar la relación entre variables de procesos que nos permiten minimizar costos de operación mientras se asegura la factibilidad técnica del proceso.

PERSPECTIVAS

El modelo propuesto es de carácter general y puede considerar cualquier número de industrias simultáneamente, e incluso incorporar usuarios no industriales como lo pueden ser complejos turísticos con necesidades de refrigeración, dichos esquemas se estudiarán en trabajos futuros en los que además se puede considerar la estacionalidad de las demandas de energía y la variación en la temperatura ambiente.

9.-NOMENCLATURA

C^{quim}	La concentración de producto químico de tratamiento
C^{alim}	Concentración de biosida
Cp^{am}	Capacidad calorífica del agua de mar
d_i^∞	Máximo espesor posible de la biopelícula.
M^U	Límite superior para las relajaciones de Big M
n	Número máximo de tratamientos permitidos en un año
$Q_{i,t}^{Req}$	Calor necesario en el segmento de proceso i en el momento t
T_{en}	Temperatura de entrada
T_{sal}	Temperatura de salida
ΔT^{\min}	Diferencia de Temperatura mínima
ρ^{am}	Densidad del agua de mar
ω	Único intervalo de tiempo (un día) en minutos
CPS	Corrientes frías del proceso (cold process streams)
HPS	Corrientes calientes del proceso (hot process streams)
NT	Número total de días del año
ND	Número de días en un año
NI	Número de segmentos del proceso
NC	Número de componentes
NIC	Segmentos del proceso que son intercambiadores de calor
NM	Número de meses.

Variables

$\%HTR_{i,t}$	Porcentaje de reducción de la transferencia de calor en el segmento del proceso i en tiempo t
$C_{i,j,t}$	Concentración residual de biosida en el segmento de proceso i en el tiempo t
C_t^c	Concentración en la central en un tiempo t
$d_{i,t}$	Espesor de la biopelícula en el segmento del proceso i en un tiempo t
$F_{i,t}$	Caudal total en el segmento de proceso i en un tiempo t .
$F_{c,t}$	Flujo de agua de mar en un tiempo t
F_t^{bio}	Flujo de biosida en un tiempo t
$F_t^{bio,comprado}$	Caudal de biosida comprado en un tiempo t .
$F_t^{bio,producido}$	Caudal de biosida producido en un tiempo t .
$k_{i,t}$	Constante de desintegración en el segmento del proceso i en un tiempo t .
$Q_{i,t}$	Calor real transferido en el segmento de proceso i en el tiempo t ,
$T_{i,t}$	Temperatura en el segmento del proceso i en un tiempo t .
Y_t	Variable booleana para seleccionar si el mantenimiento está dado en días t
Y_M	Variable booleana para seleccionar si el mantenimiento está dado en Meses M

$\beta_{i,t}$	Constante de velocidad de crecimiento de la biopelícula en el segmento i en un tiempo t .
$\gamma_{i,t}$	Constante de velocidad de destrucción de la biopelícula en el segmento i en un tiempo t .
$\sigma_{i,t}$	Intervalo de tiempo acumulado en el segmento de proceso i en el tiempo t .
ψ_t	Flujo de producto químico alimentado en exceso en el tiempo t .

10.-REFERENCIAS

- [1] A. Bin-Mahfouz, S. Atilhan, B. Batchelor, P. Linke, A. Abdel-Wahab, M. El-Halwagi. Optimal scheduling of biocide dosing for seawater-cooled power and desalination plants. *Clean Technologies and Environmental Policy*. 13 (2011).
- [2] J.T. Wang, M.-H. Chen, H.-J. Lee, W.-B. Chang, C.-C. Chen, S.-C. Pai. A model to predict total chlorine residue in the cooling seawater of a power plant using iodine colorimetric method. *International Journal of Molecular Sciences*. 9 (2008) 542-553.
- [3] F.J. Millero, F. Huang. The density of seawater as a function of salinity (5 to 70 g kg⁻¹). *Ocean Science Discuss*. 6 (2009) 153-169.
- [4] F.J. Millero, G. Perron, J.E. Desnoyers. Heat capacity of seawater solutions from 5° to 35°C and 0.5 to 22‰ Chlorinity. *Journal of Geophysical Research* 78 (1973) 4499-4507.
- [5] A. Vecchietti, S. Lee, I.E. Grossmann. Modeling of discrete/continuous optimization problems: characterization and formulation of disjunctions and their relaxations. *Computers and Chemical Engineering*. 27 (2003) 433-448.
- [6] El Océano y sus recursos III. Las ciencias del mar: Oceanografía, física, matemáticas e ingeniería. Juan Luis Cifuentes, Pilar Torres, Marcela Frías. Fondo De Cultura Económica, 1986.

-
- Ahmad S. Cost optimum heat exchanger networks minimum energy and capital using simple models for capital costs. *Comput Chem Eng*1990;14(7):729–50.
 - Ahmad S, Linnhoff B, Smith R. Cost optimum heat exchanger networks-2.Targets and design for detailed capital cost models. *Comput Chem Eng*1990;14(7):751–67.
 - American Chemical Society
 - Bin-Mahfouz, A., Atilhan, S., Batchelor, B., Linke, P., Abdel-Wahab, A., El-Halwagi, M. Optimal scheduling of biocide dosing for seawater-cooled power and desalination plants. (2011)
 - Cerda JA, Westerberg W, Mason D, Linnhoff B. Minimum utility usage in heat exchanger network synthesis a transportation problem. *Chem Eng Sci* 1983;38(3):373–87
 - Colberg RD, Morari M. Area and capital cost targets for heat exchanger network synthesis with constrained matches and unequal heat transfer coefficients. *Comput Chem Eng* 1990;14(1):1–22.
 - Fabricio Nápoles-Rivera, Abdullah Bin-Mahfouz, Arturo Jiménez-Gutiérrez, Mahmoud M. El-Halwagi, José María Ponce-Ortega. An MINLP model for biofouling control in seawater-cooled facilities (2012) 37 163– 171.
 - Fabricio Nápoles-Rivera, Abdullah Bin-Mahfouz, Arturo Jiménez-Gutiérrez, Mahmoud M. El-Halwagi, José María Ponce-Ortega. MINLP model for optimal biocide dosing and maintenance scheduling of seawater cooled plants. 2012, 30 Pages 872–876.
 - Fabricio Nápoles-Rivera, Medardo Serna-González, Abdullah Bin-Mahfouz, Arturo Jiménez-Gutiérrez, Mahmoud M. El-Halwagi, José María Ponce-Ortega.

Simultaneous optimization of energy management, biocide dosing and maintenance scheduling of thermally integrated facilities. 73 (2013) 285–302.

- Fuentes: elaboración propia zafranet.com con datos de SIE-SENER.
- Fuente: Sistema de Información Energética con información de CFE.
- Fuente: Sistema de Información Energética con información de SENER.
- Linnhoff B, Hindmarsh E. The pinch design method for heat exchanger networks. Chem Eng Sci 1983;38(5):745–63.
- PEMEX. 2002. *Anuario estadístico 2001*. PEMEX, México. Disponible en: http://www.pemex.com/files/content/Anuario_Estadistico2001.pdf.
- Ponce-Ortega JM, Jiménez-Gutiérrez A, Grossmann IE. Optimal synthesis of heat exchanger networks involving isothermal process streams. Comput Chem Eng 2008; 32(8):1918–42.
- Ponce-Ortega JM, Serna-González M, Jiménez-Gutiérrez A. Heat exchanger networks synthesis including detailed heat exchanger design using genetic algorithms. Ind Eng Chem Res 2007; 46(25):8767–80.
- SEMARNAT. 2009 Comunicación con Unidad de Protección de la Capa de Ozono (UPO SEMARNAT). México.
- SENER. 2009. *Balance Nacional de Energía 2008*. SENER, México. Disponible en: <http://www.sener.gob.mx/web-Sener/portal/index.jsp?id=48>.
- Serna-González M, Ponce-Ortega JM, Jiménez-Gutiérrez A. Two-level optimization algorithm for heat exchanger networks including pressure drop considerations. Ind Eng Chem Res 2004;43(21):6766–73.

-
- Sorsak A, Kravanja Z. MINLP retrofit of heat exchanger networks comprising different exchanger types. *Comput Chem Eng* 2004;28(1–2):235–51.
 - Yee TF, Grossmann IE. Simultaneous optimization models for heat integration-II. Heat exchanger network synthesis. *Comput Chem Eng* 1990;14(10):1165–84.