



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO



FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE REGENERACIÓN DEL ACEITE LUBRICANTE USADO

TESIS

**Que para obtener el grado de Licenciatura en
Ingeniería Química**

Presenta: Alejandro Barrera Gallegos

Asesor

Dr. José María Ponce Ortega

Morelia, Michoacán, Junio de 2016



AGRADECIMIENTOS



AGRADECIMIENTOS

A dios

Por permitirme vivir y compartir estos momentos que llamamos vida con mis seres queridos.

A mis padres Margarita Gallegos Coronel y Javier Barrera Durán por darme la vida, empeñarse día a día desde que nací para que yo sea un hombre de bien y brindarme ese apoyo y confianza incondicional que he necesitado siempre.

A mis hermanos Eduardo y Noé Barrera Gallegos, y a mi hermano postizo Raymundo Bernardo Romero Juárez por ser siempre mi ejemplo a seguir, mi apoyo, mis guías en el camino de la vida.

A mi novia Alexia, la mujer que comparte mis tristezas y alegrías, que ha iluminado mi vida con la llama de ese bello sentimiento llamado AMOR; quien con su comprensión e interés hacia mi persona me ha orientado y encaminado a la superación para la búsqueda de la felicidad mutua.

A mi asesor de tesis, Dr. José María Ponce Ortega por su paciencia y dedicación a este trabajo.

A mis amigos: J. Eduardo Ledesma Avilés por su humor y picardía que, incluso en los momentos más difíciles y tensos, tuvo para ver el lado bueno de las cosas; A Alejandro Ayala Cortés por apoyarme y saber qué decir de su gran breviario, además de mostrarme que nunca debemos rendirnos ni mucho menos sentirnos solos; A Eduardo Pérez Ayala por mostrarme que la disciplina, constancia e iniciativa son las principales armas para progresar y alcanzar lo que uno quiere en la vida; A Arturo Romo Ramos por mostrarme que el estrés y la preocupación nunca deben ser un común denominador si uno quiere ser feliz; A Paola Mora Briseño por demostrarme que no hay peor infamia que se pueda hacer uno mismo en la vida que dejarse caer. A Alejandra Silva Ponce de León, por ser mi ejemplo de voluntad y ganas de salir a delante; A Baltazar Castro Cedeño por aguantarme en casi todas clases de la carrera.



AGRADECIMIENTOS



Al Ing. Rodolfo Pacheco Escalera por brindarme la primera oportunidad de empleo, por confiar en mí, en mi inexperiencia y juventud para forjar día a día una mejor persona y desarrollarme como ingeniero.

A mis compañeros de trabajo, José Antonio Tovar Luquín, Alfredo Chávez Sánchez, Onésimo Augusto Pérez Martínez, Omar Gonzalo Color Vázquez, Génesis Ivette Hernández Romero, Gerardo Santander Vite, Adalberto Hernández Gallegos, Juancarlos Méndez Barriga, Eulises Saviñón Aguado y Celso Noel Bucio Hernández; por sus enseñanzas, retroalimentaciones y experiencias compartidas hacia mi persona.



ÍNDICE



ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS.....	iii
RESUMEN.....	vi
ABSTRACT	vii
RELACIÓN DE TABLAS	viii
RELACIÓN DE FIGURAS.....	ix
CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 GENERALIDADES	1
1.2 JUSTIFICACIÓN	3
1.3 OBJETIVO GENERAL	8
1.4 OBJETIVOS PARTICULARES	8
1.5 HIPÓTESIS.....	9
CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO	10
2.1 ANTECEDENTES.....	10
2.1.1 Aspecto Económico.....	10
2.1.2 Aspecto social	11
2.1.3 Aspecto ambiental.....	12
CAPITULO 3. METODOLOGÍA.....	14
3.1 PROPUESTA CON TRES ETAPAS.....	15
3.1.1 Calentadores	16
3.1.2 Decantadores.....	16
3.1.3 Columna de destilación atmosférica y a vacío.....	17
3.2 SIMULACIÓN CON TRES ETAPAS.....	17
3.3 Columnas de destilación.....	23
3.3.1 Columna atmosférica	23
3.3.2 Columna a Vacío	25
3.3.3 Bomba de recirculación	27
3.4 PROPUESTA CON DOS ETAPAS.....	28
3.4.1 Intercambiador de calor “HEATER1”	29
3.4.2 Intercambiador de calor “HEATER2”	30
4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	34



ÍNDICE



4.1 Análisis de sensibilidad para el intercambiador de calor “HEATER1” para la versión de tres etapas	34
4.2 Análisis de sensibilidad para el Intercambiador “HEATER2” para la versión de tres etapas.....	40
4.3 Análisis de sensibilidad para el intercambiador de calor “HEATER3” para la versión de tres etapas	44
4.4 Análisis de sensibilidad para el Intercambiador “HEATER1” para la versión de dos Etapas	49
4.5 Análisis de sensibilidad para el intercambiador de calor “HEATER2” para la versión de dos Etapas	52
4.6 Análisis de sensibilidad para la entrada de MEK en la alimentación fresca	57
4.7 Análisis de sensibilidad de las etapas de la columna atmosférica	61
4.8 Análisis de sensibilidad para las etapas de la columna de destilación a vacío	63
Capítulo 5. Análisis y discusión de resultados.....	64
6. Conclusiones	67
7. Bibliografía	68



Optimización del Proceso de Regeneración de Aceite Lubricante Usado

P.I.Q. Alejandro Barrera Gallegos

RESUMEN

En este trabajo de tesis se presenta un estudio de optimización para el proceso de regeneración de aceite lubricante usado en un enfoque de factibilidad técnica para su refinado. Cabe resaltar que el aceite lubricante usado es un recurso valioso y puede ser conservado con la mayoría de sus propiedades que al principio poseía, tales como viscosidad, color, punto de escurrimiento, entre otras.

Para esto, se propone un sistema de regeneración que conlleva etapas de decantación por extracción de un agente externo y un sistema de destilación multi-etapa, en el que se separa el solvente de la mezcla ya regenerada de aceite lubricante.

Para su recuperación se propone un sistema de extracción líquido-líquido con metil-etil cetona (MEK) como disolvente. La mezcla aceite-MEK pasa a través de varias etapas compuestas por un calentador y un decantador, en el cual se separan por insolubilidad y diferencia de densidades el solvente emulsionado que acompaña al aceite usado y los componentes asfálticos, procedentes de la degradación y oxidación de los aditivos presentes en la formulación de los aceites lubricantes. Después de esto, el aceite se pasa a un sistema de destilación compuesto por dos columnas; una columna de destilación atmosférica y otra a vacío, las cuales hacen la separación del solvente para su posterior recirculación y la extracción del aceite lubricante regenerado.

Los resultados de análisis de diversos casos de estudio muestran soluciones atractivas para el problema abordado.

Palabras Clave: Optimización, regeneración, aceites lubricantes usados.

Dirigido por: Dr. José María Ponce Ortega



ABSTRACT



Optimization of the regeneration process for the used lube oil.

Alejandro Barrera Gallegos

ABSTRACT

This work presents an optimization study for the regeneration process of the used lube oil through a technical feasibility point of view. It should be noted that the used lube oil is a rich resource that can conserve most of its original properties, such as viscosity, color, density, between others.

This way, in this work there is proposed a new regeneration system that accounts for the stages of decantation y extraction with an external agent and a system of multi-stage distillation to recover the used solvent.

For the solvent recovery, n this work there is proposed a system of liquid-liquid extraction using metil-etil ketene (MEK). Le mixture oil-MEK is passed through several stages composed of a heater and a decantation, where these components are separated by their difference in density. Then, the oil is passed through a system of two columns, where there is recuperated the solvent for its posterior recycling, and also here is obtained the regenerated oil.

The results for the analysis of several case studies show attractive solution for the addressed problem.

Supervised by: Dr. José María Ponce Ortega



RELACIÓN DE TABLAS



RELACIÓN DE TABLAS		Página
Tabla 1	Niveles de contaminantes permisibles en aceites lubricantes usados	4
Tabla 2	Diferencias del aceite usado como combustible y el combustible común	6
Tabla 3	Condiciones de operación en alimentación	31
Tabla 4	Condiciones de alimentación en Intercambiadores	31
Tabla 5	Condiciones de operación en intercambiadores para propuesta con 2 etapas	32
Tabla 6	Condiciones de operación para decantadores	32
Tabla 7	Condiciones de operación para columna de destilación atmosférica	32
Tabla 8	Condiciones de operación para columna de destilación a vacío	32
Tabla 9	Resultados Análisis de sensibilidad Componentes de corriente “LODO1” vs Temperatura	37
Tabla 10	Resultados de análisis de sensibilidad para Intercambiador “Heater2”	40
Tabla 11	Resultados del análisis de sensibilidad del intercambiador “Heater3”	44
Tabla 12	Resultados del análisis de sensibilidad para la versión de 2 etapas del intercambiador “Heater1”	49
Tabla 13	Resultados del análisis de sensibilidad para la propuesta con dos etapas del intercambiador “Heater2”	52
Tabla 14	Resultados de análisis de sensibilidad para la entrada de MEK en la alimentación fresca	57
Tabla 15	Resultados de análisis de sensibilidad del número de etapas de la columna atmosférica	62
Tabla 16	Análisis de sensibilidad del número de etapas de la columna de destilación a vacío	63
Tabla 17	Resultados de la simulación con 3 etapas	65
Tabla 18	Resultados de la simulación con 2 etapas	65



RELACIÓN DE FIGURAS



RELACIÓN DE FIGURAS

Figura 1. Propuesta con 3 etapas.....	15
Figura 2. Componentes.....	18
Figura 3. Propiedades.....	19
Figura 4. Alimentación de aceite lubricante usado.....	20
Figura 5. Alimentación de solvente.....	20
Figura 6. Intercambiador 1.....	21
Figura 7. Intercambiador 2.....	22
Figura 8. Intercambiador 3.....	22
Figura 9. Configuración columna atmosférica.....	23
Figura 10. Alimentación columna atmosférica.....	24
Figura 11. Presión columna atmosférica.....	24
Figura 12. Configuración de vacío.....	25
Figura 13. Alimentación columna a vacío.....	26
Figura 14. Presión de la columna de vacío.....	26
Figura 15. Especificaciones de Bomba.....	27
Figura 16. Propuesta con 2 etapas.....	28
Figura 17. Especificaciones Intercambiador 1.....	30
Figura 18. Configuración Intercambiador 2.....	30
Figura 19. Paso N°1.....	34
Figura 20. Paso N°2.....	35
Figura 21. Definición de objeto.....	35
Figura 22. Definición de variable dependiente.....	36
Figura 23. Tabla de variables.....	37
Figura 24. Aluminio vs Temperatura.....	38



RELACIÓN DE FIGURAS



Figura 25. Fierro Vs Temperatura.....	38
Figura 26. Calcio Vs Temperatura.....	41
Figura 27. Bario Vs Temperatura.....	41
Figura 28. Boro Vs Temperatura.....	42
Figura 29. Fierro Vs Temperatura.....	42
Figura 30. Níquel Vs Temperatura.....	43
Figura 31. Manganeseo Vs Temperatura.....	43
Figura 32. Calcio Vs Temperatura.....	45
Figura 33. Bario vs Temperatura.....	45
Figura 34. Boro vs Temperatura.....	46
Figura 35. Cobre vs Temperatura.....	46
Figura 36. Níquel Vs Temperatura.....	47
Figura 37. Manganeseo Vs Temperatura.....	47
Figura 38. Aluminio Vs Temperatura.....	50
Figura 39. Fierro Vs Temperatura.....	50
Figura 40. Calcio vs Temperatura.....	53
Figura 41. Bario Vs Temperatura.....	53
Figura 42. Boro vs Temperatura.....	54
Figura 43. Cobre vs Temperatura.....	54
Figura 44. Níquel Vs Temperatura.....	55
Figura 45. Manganeseo Vs Temperatura.....	55
Figura 46. Bario Vs MEK.....	58
Figura 47. Boro vs MEK.....	58
Figura 48. Calcio Vs MEK.....	59
Figura 49. Cobre Vs MEK.....	59
Figura 50. Fierro Vs MEK.....	60





RELACIÓN DE FIGURAS



Figura 51. Níquel Vs MEK.....	60
Figura 52 Manganeso vs MEK.....	61
Figura 53. Flujo másico de MEK Vs N° de etapas de la columna atmosférica.....	62
Figura 54. Flujo másico de MEK Vs N° Etapas de la columna a vacío.....	63



CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 GENERALIDADES

En el proceso de refinación del petróleo crudo se obtienen, a diferentes temperaturas, compuestos como la Gasolina, Queroseno, aceites y residuos. Para la generación de aceites lubricantes se necesita un proceso de destilación fraccionada en donde se usa una columna de destilación, en el que el aceite que se obtenga será más o menos liviano de acuerdo con la temperatura que se alcance en el ésta misma. Posteriormente, el aceite, se somete a un tratamiento ácido para eliminar las impurezas, enseguida se filtra y se agrega cal para eliminar los restos de acidez. Finalmente, se agregan diversos compuestos, de acuerdo con las características que se desea dar al lubricante.

La industria de lubricantes constantemente mejora y cambia sus productos a medida que los requerimientos de las maquinarias nuevas cambian, y nuevos procesos químicos y de destilación son descubiertos. En contra parte, el aceite lubricante usado es un desecho que se genera con bastante frecuencia en establecimientos industriales, mineros y del sector transporte, entre otros. Una vez que este producto cumplió su vida útil, debe ser dispuesto de manera adecuada para no generar problemas al medio ambiente ni de salud a la población.

La definición de aceite lubricante usado es la siguiente: “Todos los aceites industriales con base mineral o sintética, que se hayan vuelto inadecuados para el uso que se les hubiere asignado inicialmente y, en particular, los aceites usados de los motores de combustión y de los sistemas de transmisión, así como los aceites minerales lubricantes, aceites para turbinas y sistemas hidráulicos”. Durante su vida útil, el aceite lubricante mantiene sus características fisicoquímicas casi sin alteraciones. A medida que se utiliza se va contaminando con compuestos provenientes de combustión, el desgaste, de corrosión y de los combustibles con que entra en contacto. Esto hace que pierda sus propiedades y deba ser reemplazado.



CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN



Según estadísticas, 336 millones de litros de aceite lubricante son vendidos y consumidos solo en México. De estos, el 50% quedan sin algún tipo de reciclaje que por su mal manejo es un potencial problema ambiental. El reuso más común de este residuo es como combustible. Además, de que hay una gran posibilidad de que este residuo sea derramado en el suelo.

Muchos métodos han sido desarrollados para la regeneración del aceite lubricante, por ejemplo, el método de lodos ácidos que hace uso de ácido sulfúrico como solvente. Éste método tiene la desventaja de causar mayor impacto al medio ambiente que el propio aceite lubricante. Otro proceso de regeneración es meramente físico que se lleva a cabo a relativa alta temperatura en series de evaporación y destilación. Normalmente muchas de las condiciones resultan en baja calidad de la base grasa así como alto requerimiento de alimentación para ser económicamente viable. En este contexto, en esta tesis el proceso de regeneración por extracción con un solvente representa una atractiva opción que combina ventajas y elimina las desventajas de los procesos antes mencionados. No es requerido un volumen grande para la extracción con un solvente mientras el lodo orgánico sea producido en vez del lodo ácido. Esto es maximizado con una alta calidad del producto base.



CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN



1.2 JUSTIFICACIÓN

Todos los aceites lubricantes usados necesitan una gestión, esto es, un conjunto de actividades encaminadas a dar a los aceites usados el destino final que garantice la protección de la salud humana, la conservación del medio ambiente y la preservación de los recursos naturales. Acciones como recolección, tratamiento, recuperación, regeneración, entre otras son necesarias para tal fin.

Hay muchas fuentes de aceite lubricante usado, las cuales podríamos clasificarlas de la siguiente manera:

- Aceite de motor que incluye típicamente aceites del cárter de los motores a gasolina y diesel de automóviles, camiones, barcos, aviones, locomotoras y maquinaria pesada.
- Líquido para la transmisión.
- Aceite de refrigeración.
- Aceite para compresores.
- Fluidos y aceites de la industrias metalúrgica.
- Líquidos hidráulicos industriales.
- Aceite de aislamiento eléctrico.
- Aceites de procesos industriales.

También debemos entender lo que NO es un aceite lubricante usado, aquí varios ejemplos:

- El aceite de desecho resultante de los depósitos en el fondo de los tanques de almacenamiento de combustible virgen, de la limpieza de derrames de combustible virgen y otros desechos de aceite que no hayan sido utilizados.
- Algunos productos como anticongelante y queroseno.
- Aceite vegetal y animal, aun cuando se usen como lubricantes.



CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN



- Destilados del petróleo usados como disolventes.

Los lineamientos más seguidos para catalogar un aceite lubricante usado de uno que no lo es, están dados por la agencia de protección ambiental (EPA, por siglas en inglés). Estos nos dan los parámetros de los contaminantes más significativos que por estudios puede contener un aceite lubricante usado, los cuales son mostrados en la **Tabla 1**.

Los aceites usados, tanto de procedencia industrial como los empleados en automoción, están considerados en la “Ley General para la prevención y gestión integral de los residuos” como un residuo especial, tóxico y peligroso, dado su contenido en metales pesados, y su capacidad de contaminación de las aguas. Por esto, la normativa ambiental exige el adecuado manejo de los mismos.

Tabla 1: Niveles de contaminantes permisibles en aceites lubricantes usados

Sustancia	Concentración máxima permisible (ppm)
Bifenilos policlorados (PCB's)	50
Halógenos orgánicos totales	1000
Arsénico	5
Cadmio	2
Cromo	10
Plomo	100
Azufre	1.7% en peso.

La regeneración de los aceites usados se considera la opción ambientalmente preferible de reutilización de los aceites frente a otras alternativas como la combustión. Sin embargo, ésta última es la opción mayoritariamente seguida en los últimos años en los países en los que no está legislado este tipo de manejo de residuos.

En este tenor, hay varios criterios que se toman en cuenta para la regeneración de aceites lubricantes usados, varios de los cuales son:



CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN



- Contenido en PCB (**Bifenilos policlorados**): mayor 50ppm. A esta concentración se recomienda la regeneración.
- Cuando no resulte viable la regeneración en cuestión económica lo ideal es destinarlos a la recuperación energética. Previa eliminación de metales pesados y otras sustancias con el fin de evitar generar emisiones peligrosas con los gases de la combustión y explosiones por los hidrocarburos ligeros remanentes en el aceite.

Las tres tipos de alternativas más comunes para la gestión de aceites usados son las siguientes:

- Los procesos de regeneración, que mediante distintos tratamientos, permiten la recuperación de las bases lubricantes presentes en el aceite original, de manera que resulten aptas para su utilización.
- Los procedimientos de reutilización como combustible. Esto es posible combinándolos con otros residuos dando uso en motores diesel, principalmente de generación eléctrica.
- El uso energético como combustible industrial ya sea por combustión directa o con pre tratamiento del aceite.

El uso energético de los aceites lubricantes usados tiene sus pros y sus contras. Uno de los mayores usos que se le da es que se convierta en *combustible alternativo*. Allí el aceite se quema en instalaciones de alta potencia térmica, alta temperatura y alto consumo de combustible, por consiguiente con alta producción de gases de combustión. Para evitar esto se requieren de tratamiento previo y controles analíticos que permiten desclasificarlos como residuos tóxicos y peligrosos. Las ventajas que puede tener el uso como combustible alternativo son:

- Por su menor contenido en Carbono, Azufre y sedimentos, los aceites usados tratados generan menor contaminación atmosférica que los combustibles sólidos.



CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN



- Tienen mayor rendimiento calórico que otros combustibles industriales convencionales.

Las desventajas más comunes que puede tener en el uso como combustible alternativo son:

- Contaminantes que se generan en la combustión (SO_x, CO_x, NO_x, hidrocarburos aromáticos, metales).
- Formación de cancerígenos como Benzopireno y Benzoantraceno.
- Formación de Bifenilos policlorados (PCB).
- Si la combustión es entre 300 y 600°C, la formación de Dioxinas y Furanos.
- Metales pesados.

Otro tipo de uso del aceite lubricante usado, aunque es en el mismo rubro pero no de la misma manera, es como *combustible homologado*. Esto se hace en instalaciones de menor potencia térmica en motores de combustión interna y calderas para producción de energías eléctricas. Aquí se requieren de tratamientos físicos-químicos más complejos y seguros para asegurar que la calidad del combustible no sea un impedimento para el buen funcionamiento de los sistemas de generación de potencia.

Algunas diferencias del aceite lubricante usado como combustible y el combustible se muestran en la **Tabla 2**:

Tabla 2: Diferencias del aceite usado como combustible y el combustible común

Componente	Aceite usado	Combustible
% Carbono	<80	>80
% Hidrógeno	>14 – 14	10 – 12
% Azufre	<1	1 - 2.5
PCI (Kcal/Kg)	>10	>10
PCS (Kcal/Kg)	11	10

Donde:

PCI : poder calorífico inferior

PCS: poder calorífico superior



CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN



Cada una de las alternativas generales de gestión, presenta múltiples alternativas técnicas para llevar a cabo las operaciones de regeneración. Por lo general, no hay imposiciones legales que determinen la aplicación de una u otra alternativa a un residuo determinado, aunque sí una recomendación normativa sobre el orden de prioridades entre ellas.

Actualmente, el tratamiento de los aceites lubricantes usados es precario en México, según estadísticas ya comentadas. Para esto, este trabajo de tesis da una visión de la importancia a la regeneración de los aceites lubricantes, además de que se tienen los tres aspectos principales para poder proponer un proyecto, es decir, tiene un carácter social, económico y ambiental perfectamente viable para su puesta en marcha. Prueba de esto, algunas de las empresas que se dedican a la regeneración de aceites lubricantes son:

- Lubricantes Jaguer S.A. de C.V.
- Recycle-oil.S.A. de C.V.

Esto sólo por decir algunas, ya que según datos del *INEGI en el 2001*, hay 127 empresas que participan en la regeneración del aceite lubricante usado y otras más que no sólo hacen eso si no que lo reformulan para la generación de combustible alterno, reciclaje de solventes, líquido fijador gastado, material textil, metales, reciclaje energético, tambores, grasa vegetal, líquido para frenos y pinturas.

Sin embargo, la capacidad de regeneración que tienen estas empresas no es ni el 50% de los 366 millones de litros de lo que produce en el país anualmente (según estimaciones hechas con datos del *INEGI* en 2012 que considera una flota de 33,292,930 autos con un consumo promedio de 11 litros por año por auto). Además de que no siempre los costos que manejan estas empresas, son viables para quienes desean mandar a regenerar estos aceites. Por ello, un enfoque adicional a los ya mencionados sería el legislar más allá de la clasificación y el manejo, como se menciona en la norma oficial mexicana NOM-052 SEMARNAT 2005 y en la “ley general para la prevención y gestión integral de los residuos”, con esto, poder plantear estrategias para la recolección, regeneración y comercialización de productos derivados de este tipo de residuos.



CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN



1.3 OBJETIVO GENERAL

El objetivo general de este proyecto de tesis, es proponer un esquema de regeneración de aceite lubricante a través de simulación y optimización de procesos considerando su viabilidad técnica.

1.4 OBJETIVOS PARTICULARES

- ⊕ Desarrollar una superestructura para el diseño de sistemas de regeneración de aceite lubricante usado.
- ⊕ Encontrar el número óptimo de etapas de extracción sólido-líquido que nos permitirá saber cómo estructurar nuestro sistema.
- ⊕ Determinar la mejor configuración para la regeneración de aceite usado.
- ⊕ Determinar las condiciones óptimas de operación en la regeneración de aceite lubricante usado.



CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN



1.5 HIPÓTESIS

Con el desarrollo de dos modelos generales para el diseño óptimo de un proceso de regeneración de aceite lubricante usado en México que considere el aspecto económico, aspecto social, aspecto ambiental y el ahorro en el uso de MEK fresco por medio de sistemas de decantación, se pretende contribuir a la aplicación de sistemas de regeneración eficiente de aceite lubricante usado generado en cualquier área de nuestro país.



CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO

CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES

Con base en la problemática planteada, muchos autores han sugerido alternativas de solución. Por ejemplo, Kheireddine et al. (2004) proponen un modelo matemático donde encuentra un solvente idóneo que por medio de una serie de sistemas de decantación, extracción sólido-líquido y destilación logra extraer los metales y recuperar el solvente utilizado presente en la corriente de aceite lubricante usado.

Según estudios realizados por Everest (2005), debido a la estabilidad de la estructura de los hidrocarburos que componen la base de los aceites, está misma queda intacta después del uso, sin embargo, los aditivos que nos dan muchas características de los aceites lubricantes no corren con la misma suerte puesto que son consumidos. Para esto, después de la regeneración se deben agregar ciertos aditivos que nos den esas características lo cual no se adjuntarán en este trabajo de tesis.

Estos trabajos integran características ingenieriles que muestran una solución que se puede comprobar factible, dependiendo principalmente de tres aspectos: aspecto económico, aspecto social y el aspecto ambiental.

2.1.1 Aspecto Económico

En este sentido se pueden dar demasiados tabúes, sin embargo, es bastante realista pensar que la gran mayoría de los proyectos de inversión y decisiones, que se deben tomar para llevar a operación una planta de cualquier tipo se basa en el aspecto económico. Por eso, este proyecto no es la excepción, puesto que para los inversionistas la pregunta obligada es: ¿quién me garantizaría que este proyecto sea rentable? Para esto, un estudio económico revelaría si es no factible poner en marcha un proyecto así.

Uno de los antecedentes de este tipo de aspectos es un estudio realizado por la dirección de economía del Instituto Nacional de Ecología, que se desarrolló en 1996. En este estudio, se propone un sistema de depósito reembolso en residuos clasificados de manejo especial. Uno de estos residuos son los aceites



CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO



lubricantes usados. Este estudio propone la creación de un fideicomiso, donde también están involucrados las empresas de recolección, generadores (talleres de servicio, gasolineras, agencias, refaccionarias, etc.), los distribuidores de aceite lubricante nuevo, formuladores de aceite y el consumidor (COLIN, 1996).

En otro sentido, y hablando en números, los precios publicados por empresas dedicadas a hacer aceites lubricantes arrojan que un litro de aceite lubricante virgen, dependiendo su grado, ronda entre \$40 y \$150 pesos. Dicho esto, ¿por qué no pensar en la comercialización de aceite regenerado con características similares a las del aceite virgen a un precio competitivo? Entonces, la idea es saber cómo optimizar el proceso para que el objetivo de comercializar un aceite lubricante regenerado a un precio competitivo se vea hecho realidad.

2.1.2 Aspecto social

Bajo este tenor, ¿En qué nos afecta la generación de aceite lubricante? ¿A dónde va a parar todo este aceite? ¿En realidad se hace algo con él? Estas y algunas otras preguntas son las que nos planteamos como sociedad en este y otros tantos rubros más, sin embargo, ¿Cuántas de ellas contestamos? De estos aspectos se basan muchos trabajos sobre regeneración de aceites lubricantes usados. En México es precaria esta actividad y también proyectos que se planean. La participación de los diversos sectores involucrados en el manejo adecuado de aceites usados se ha concretado en diferentes programas implementados en diferentes lugares del país. A la fecha, y por investigaciones hechas en este trabajo, se han identificado 12 programas que se han implementado en los Estados de Tamaulipas, Yucatán, Estado de México, Colima, Chihuahua, Hidalgo, San Luis Potosí y Guanajuato, así mismo en el Distrito Federal, la Delegación Azcapotzalco, la Delegación Iztapalapa y la Delegación Gustavo A. Madero.

Los programas, aunque en esencia son similares, tienen características diferentes. Cabe resaltar que la participación de las diferentes redes que conforman a la REMEXMAR (Red no gubernamental que forma parte de la Red Panamericana de Manejo Ambiental de Residuos (Repamar), de la cual son miembros los siguientes países: Argentina, Brasil, Colombia, Costa Rica, Ecuador, México, Panamá y Perú) ha sido muy importante en la implementación de estos



CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO



programas, puesto que en la mayoría de los casos la iniciativa para arrancar este tipo de programas o incluso la coordinación de los mismos, corren a cargo de las redes locales.

Uno de los ejemplos de estos programas implementados, es el que se lleva a cabo en la Zona Metropolitana del Valle de México. Este programa de manejo integral de aceites lubricantes automotores usados surgió en 1999, cuando la Comisión Ambiental Metropolitana retoma los avances sobre este residuo, de tal forma que se crea la Comisión de aceites lubricantes usados para concretar los avances existentes y definir las condiciones necesarias para instrumentar un Proyecto Piloto para el Manejo Integral de Aceites Lubricantes Usados.

Durante los últimos años, en México se han realizado campañas en donde se ha convocado a la ciudadanía para el acopio y reciclaje de diversos residuos. Durante la campaña “La Ciudad de México Recicla” llevada a cabo en la Ciudad de México en el año del 2000, se presentó el Programa para el manejo integral de aceites lubricantes automotores usados de la Zona Metropolitana del Valle de México de la Comisión Ambiental Metropolitana. En esta campaña se involucraron diversas organizaciones, tales como el Instituto Nacional de Recicladores, La Secretaría del Medio Ambiente, la Junior League de la Ciudad de México I.A.P, la Dirección General de Servicios Urbanos de la Secretaría de Obras y Servicios Públicos del Gobierno del Distrito Federal y la participación de una empresa de bebidas como patrocinador. Junto con esta campaña, se elaboró un directorio de centros de acopio y empresas recicladoras, que tiene el mismo nombre de la campaña.

2.1.3 Aspecto ambiental

Por sus características fisicoquímicas, los aceites lubricantes usados que son mal manejados afectan el medio ambiente en diversas formas y en consecuencia llegan a dañar nuestra salud; por ejemplo, un litro de aceite usado puede contaminar un millón de litros de agua, dañando así al ser humano, además, otros datos relevantes acerca de la contaminación con aceites lubricantes usados son:



CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO



- 5 litros de aceite usado quemado sin control, contaminan el aire que un ser humano puede respirar en tres años;
- 1 litro de aceite de motor puede llegar a formar una mancha de 4,000 m² sobre el agua.

Sabiendo esto, un proyecto como el que se maneja, enfocado en un sentido ambiental es la pauta para que un grano de arena sea puesto en la restructuración de la visión ambiental sobre el uso y deshecho de estos residuos.



CAPITULO 3. METODOLOGÍA



CAPITULO 3. METODOLOGÍA

Como primer paso para el desarrollo de este trabajo y con base en las investigaciones hechas para conceptualizar el problema planteado, se utilizó la súper estructura propuesta en el artículo Kheireddine et al (2004), la cual consta de una serie de etapas de extracción sólido líquido, una columna a vacío y otra atmosférica. Aunque en este artículo menciona la utilización de tres etapas de extracción, este trabajo analizará esta propuesta hecha por estos investigadores y propone la utilización de sólo dos etapas de extracción, con base en un análisis de sensibilidad. Por lo cual, este apartado se dividirá en dos partes: Propuesta con tres etapas y la propuesta con dos etapas, con el fin de encontrar el diseño óptimo que nos pudiera dar un equilibrio entre uso de equipos y volumen de producción.

En la justificación de este trabajo se mencionaron varios tipos de impurezas presentes en los aceites lubricantes, muy a parte de todas las impurezas y para efectos de simulación, consideraremos que éste se compone por dos sustancias principales: Octacosano ($C_{28}H_{58}$) y de triacotano ($C_{30}H_{60}$), los cuales fueron caracterizados por estudios reportados por Paz-Méndez en el IPN (2004), en donde se hizo la comparación entre un espectro de un aceite virgen y un aceite usado, dando como resultado que la presencia de estas dos sustancias era constante y mayoritariamente significativa.

Otra de las consideraciones hechas para el presente trabajo, es que la alimentación de aceite lubricante usado está libre de agua y de hidrocarburos ligeros. Esto se hizo con el fin de hacer un poco más simple la simulación



3.1 PROPUESTA CON TRES ETAPAS.

Para la simulación se propuso la súper estructura mostrada en la Figura 1.

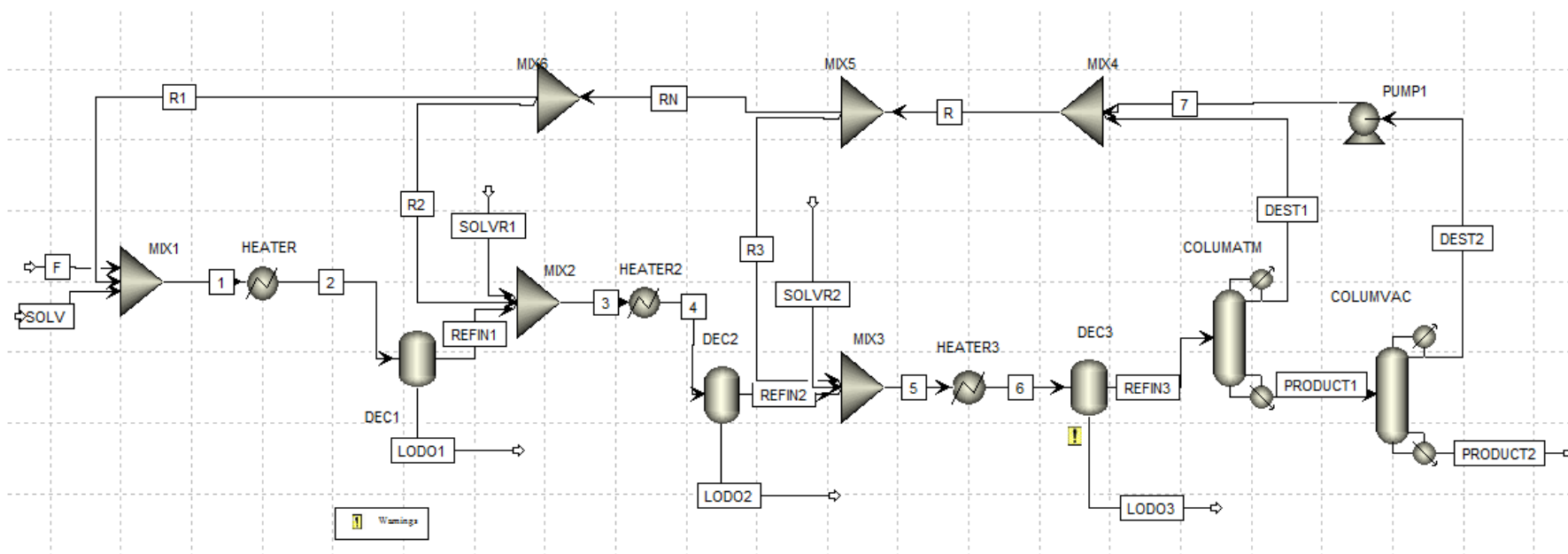


Figura 1: Propuesta con tres etapas



Las partes de las que se compone este sistema de extracción se describirán a continuación:

3.1.1 Calentadores

Antes del inicio de cada etapa de extracción hay un calentador en los cuales se tuvo que seleccionar la temperatura ideal en la que debería funcionar. Esta temperatura debe de estar entre la temperatura de fusión de los componentes principales y la temperatura en la que el aceite lubricante empieza a adquirir propiedades de adición de impurezas, y estas no se pueden separar ya de la mezcla que compone el aceite lubricante. Más adelante, mencionaremos cómo se hizo la selección de las temperaturas para cada uno de los calentadores con base en a los criterios ya mencionados y a los análisis de sensibilidad pertinentes.

En el proceso de la selección de las temperaturas también hay un factor muy importante que es el solvente de extracción, metil etil cetona (MEK) y su parte de importancia en la selección de las temperaturas a las cuales se elevará el aceite recuperado. Al ser un solvente medianamente polar, se tendrán pérdidas del mismo al subir la temperatura cercana a la de su ebullición, por lo tanto tendrá que considerar este punto para hacer la simulación más apegada a la realidad.

3.1.2 Decantadores

Los decantadores son equipos que ayudan con la separación de la mezcla aceite-MEK. Por este hecho, son los equipos más importantes en este proceso ya que aunado a la temperatura con la que se reciba en cada etapa procedente del calentador, será una separación eficiente.

En la simulación, este decantador no se considera el tipo que es, es decir, no hacer referencia a si es un simple tanque decantador o decantador centrífugo. En la práctica, este decantador es por investigaciones hechas en modelos ya establecidos, un decantador centrifugo, es decir, es un equipo que por medio de centrifugación separa la mezcla Aceite-MEK. Para esta simulación se utilizaron tres decantadores.



3.1.3 Columna de destilación atmosférica y a vacío

Estas columnas de destilación son utilizadas como un método de recuperación primario para el solvente utilizado (Metil-etil cetona); el cual, según los resultados que se analizarán más adelante, se obtiene prácticamente puro para su posterior reutilización.

3.2 SIMULACIÓN CON TRES ETAPAS.

Este modelo se simuló con una entrada de materia prima, es decir, el aceite lubricante usado, una entrada de solvente virgen y una entrada de solvente en recirculación que viene producto de los sistemas de destilación. Después, pasa a un precalentamiento, en el cual se eleva a una temperatura para posteriormente ir a una etapa de decantación donde se separan las impurezas del refinado. El refinado pasa a una segunda etapa de decantación, en donde se le agrega una cantidad mínima de solvente adicional, la cual recupera pérdidas que pudiera tener en la primera etapa de decantación. Consecuentemente, pasa a un segundo y a un tercer intercambiador de calor, donde se eleva su temperatura para ir a un segundo y tercer sistema de decantación respectivamente donde se separan las impurezas del refinado. Teniendo el tercer refinado, se procede a una etapa de separación de solvente en la que intervienen dos columnas de destilación, una atmosférica y una a vacío, las cuales bajo distintas condiciones, separan el solvente del aceite lubricante usado.

Todo esto se desarrolló y se simuló en ASPEN Plus con el fin de encontrar el número óptimo de etapas para este proceso con las condiciones propuestas. Para simular, se siguieron los pasos básicos que vienen descritos en el manual de usuarios. Lo primero que se hizo fue elegir los componentes que estarán presentes en las corrientes. Estos componentes se eligieron con base en un estudio ya mencionado, en el que se caracterizó el aceite lubricante virgen y se comparó los componentes de la misma caracterización de los aceites lubricantes usados, dando como resultado lo que se plasma en el apartado “Components” ilustrado en la Figura 2 de nuestro proyecto en ASPEN.



CAPITULO 3. METODOLOGÍA

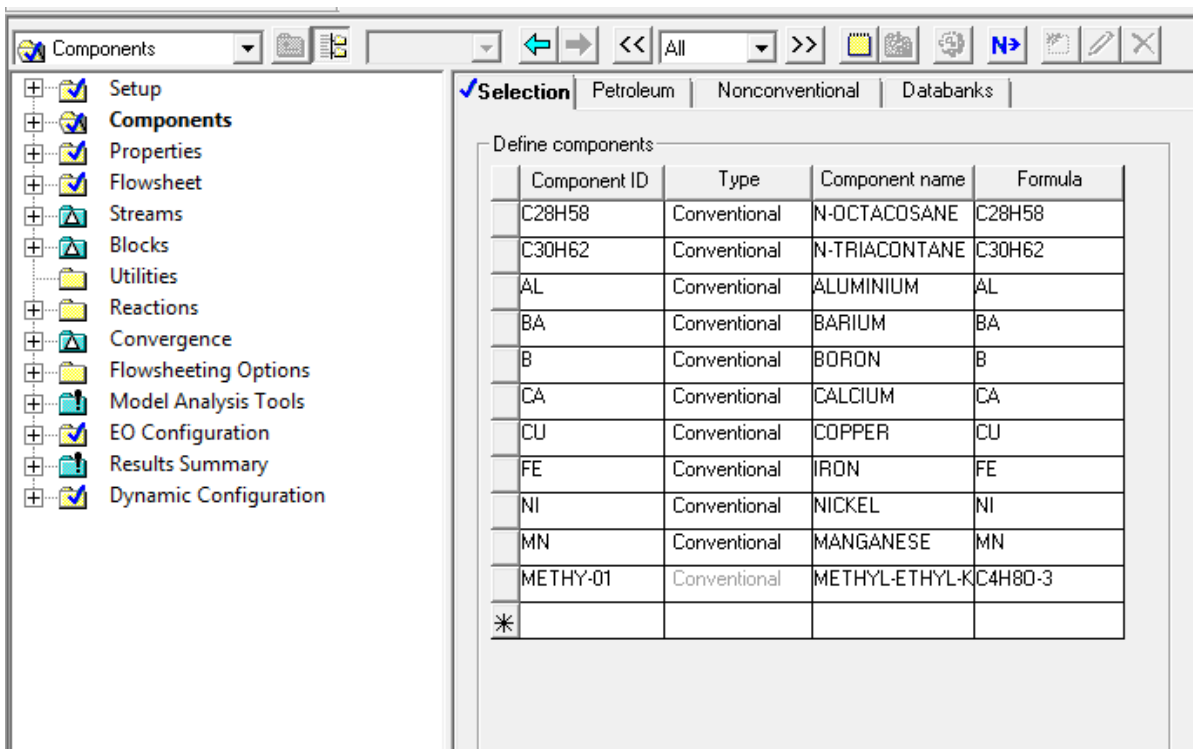


Figura 2: Componentes

Una vez elegidos los componentes se elige el apartado “Properties” y se selecciona un método termodinámico conveniente para llevar a cabo la simulación, como se ilustra en la **Figura 3**. La elección en este caso fue el método SRK (Soave-Redlich-Whong) que según las ayudas que tiene ASPEN PLUS para elección de método termodinámico, describe muy bien las características de la mezcla aceite lubricante usado (no polar) con solvente, Metil etil cetona (medianamente polar).



CAPITULO 3. METODOLOGÍA

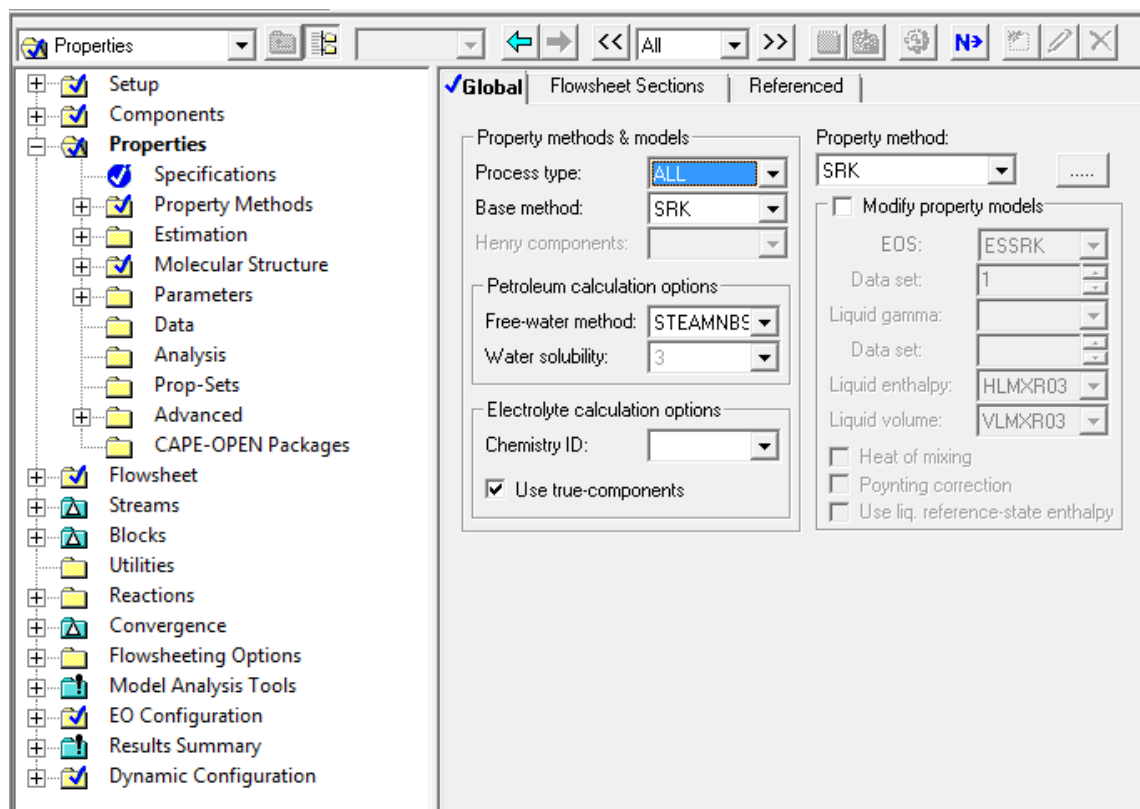


Figura 3: Propiedades

Después de esto, se caracterizaron las corrientes de entrada tomando como base 1,000 kg/h de aceite lubricante usado a temperatura y presión ambiente. Con base en el mismo estudio que caracterizó a los componentes, se determinaron las proporciones de los mismos en fracciones masa quedando de la manera que se ilustra en la **Figura 4**.



CAPITULO 3. METODOLOGÍA



Substream name: **MIXED** Ref Temperature

State variables

Temperature: 25 C

Pressure: 1 atm

Total flow: Mass 1000 kg/hr

Solvent:

Composition

Mass-Frac

Component	Value
C28H58	0.425
C30H62	0.425
AL	0.01875
BA	0.01875
B	0.01875
CA	0.01875
CU	0.01875
FE	0.01875
NI	0.01875
MN	0.01875
METHY-01	0

Total: 1

Figura 4: Alimentación de aceite lubricante usado

Añadido a esto, en la **Figura 5** se ilustra cómo se caracterizó la corriente del solvente, es decir, la de metil-etil-cetona (MEK) en la que se determinó una base de 10 kg/h de entrada, es decir, una relación 1 a 100 con respecto a la administración de aceite.

Substream name: **MIXED** Ref Temperature

State variables

Temperature: 25 C

Pressure: 1 atm

Total flow: Mass 10 kg/hr

Solvent:

Composition

Mole-Frac

Component	Value
C28H58	0
C30H62	0
AL	0
BA	0
B	0
CA	0
CU	0
FE	0
NI	0
MN	0
METHY-01	1

Total: 1

Lets you select the substream name.

Figura 5: Alimentación de solvente



CAPITULO 3. METODOLOGÍA



Además de caracterizar las corrientes de entrada, se deben especificar las temperaturas de cada uno de los intercambiadores de calor. Esto se hizo con base en un análisis de sensibilidad en donde se analizó la salida de varios componentes claves en la mezcla de aceite lubricante usado a tratar con respecto a la temperatura que se utiliza en cada intercambiador. Posteriormente, se explicará más a detalle cómo se hizo tal análisis.

En las **Figuras 6 y 7**, se ilustra cada uno de los intercambiadores con sus configuraciones y sus respectivas temperaturas.

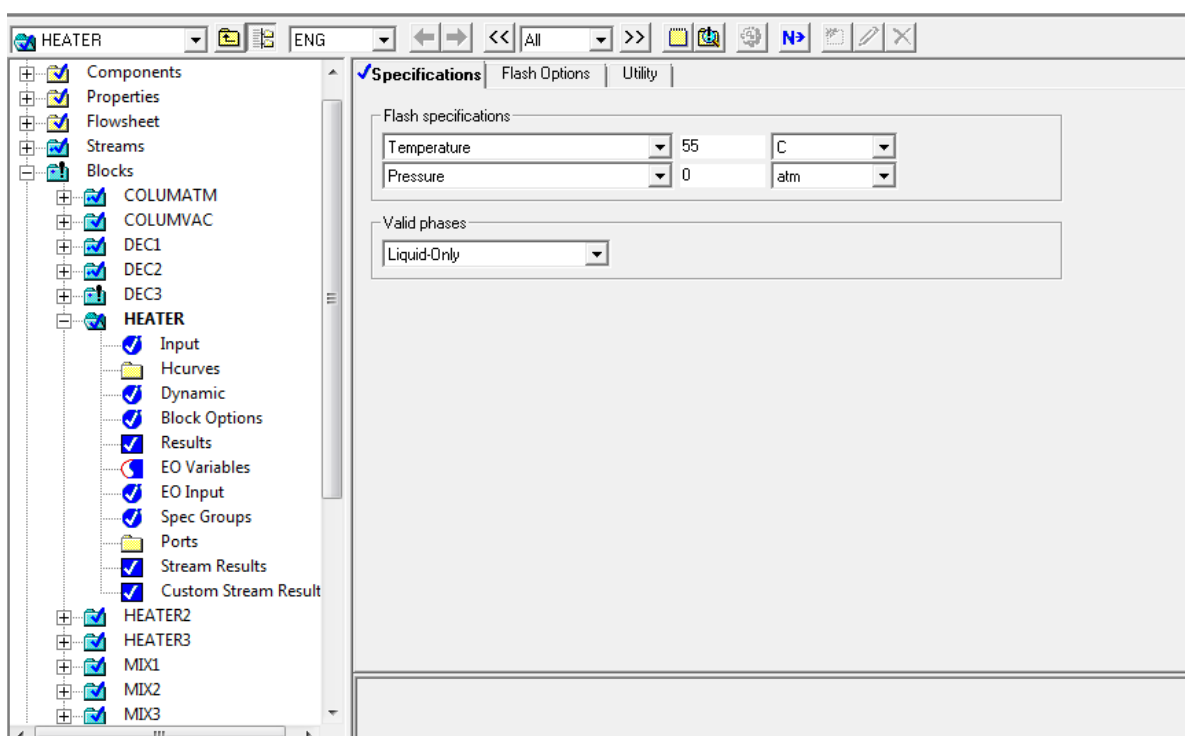


Figura 6: Intercambiador 1



CAPITULO 3. METODOLOGÍA



Para el segundo intercambiador se ilustra en la **Figura 7**.

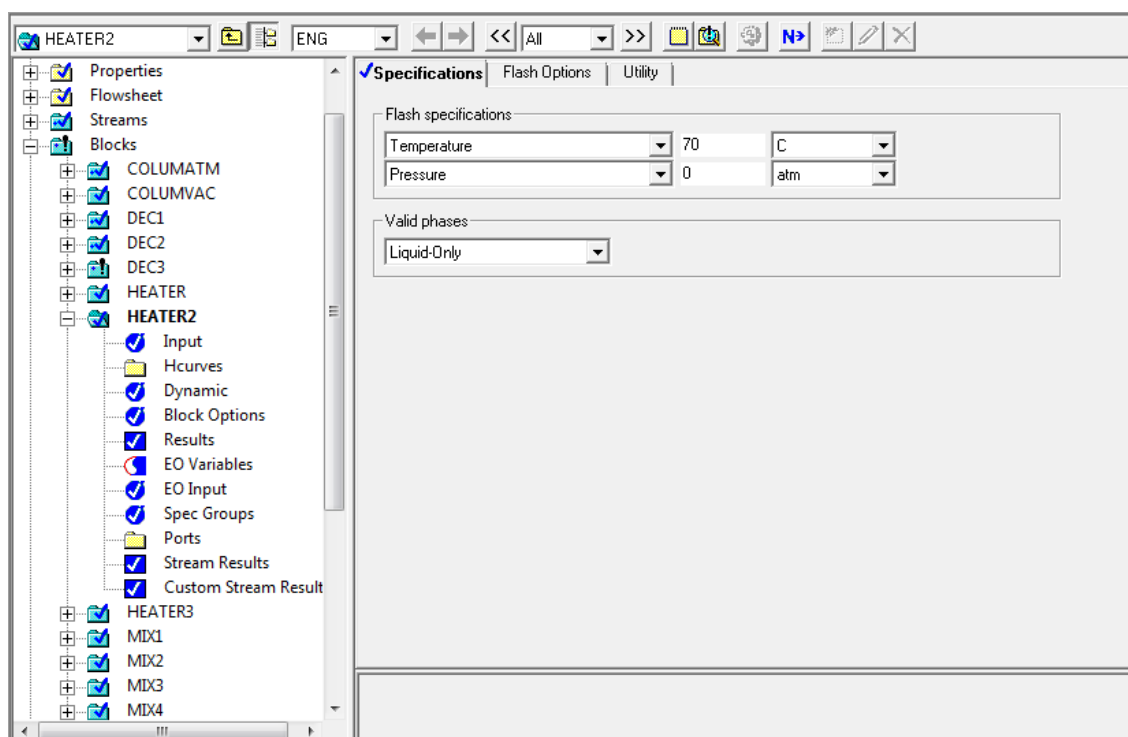


Figura 7: Intercambiador 2

Para el tercer intercambiador de calor, se ilustra en la **Figura 8**.

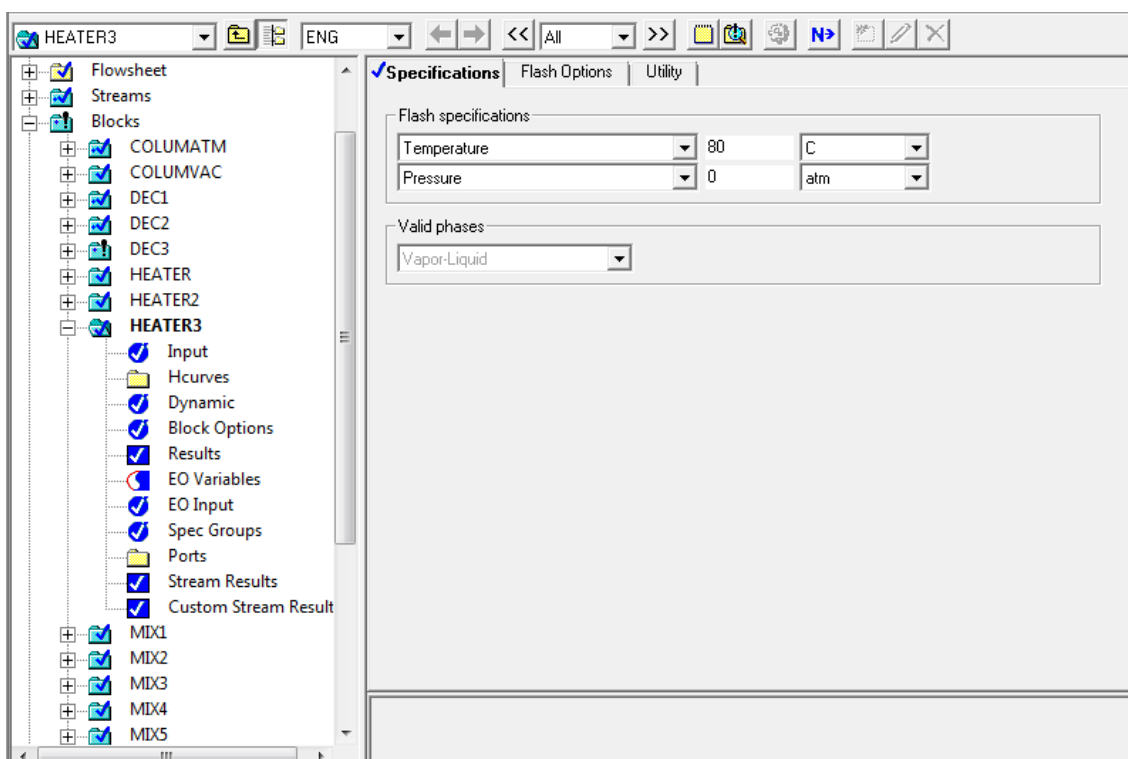


Figura 8: Intercambiador 3



3.3 Columnas de destilación

3.3.1 Columna atmosférica

Esta columna consta de dos etapas, las cuales se manejan a presión atmosférica. Así como se hizo en los intercambiadores de calor, posteriormente se mostrará los análisis de sensibilidad hechos para dar con las etapas que conforman la columna atmosférica.

En la columna atmosférica se utiliza un condensador total, una relación de reflujo de 0.5 y un flujo de destilado de 20kg/h, todo ello ilustrado en la **Figura 9**.

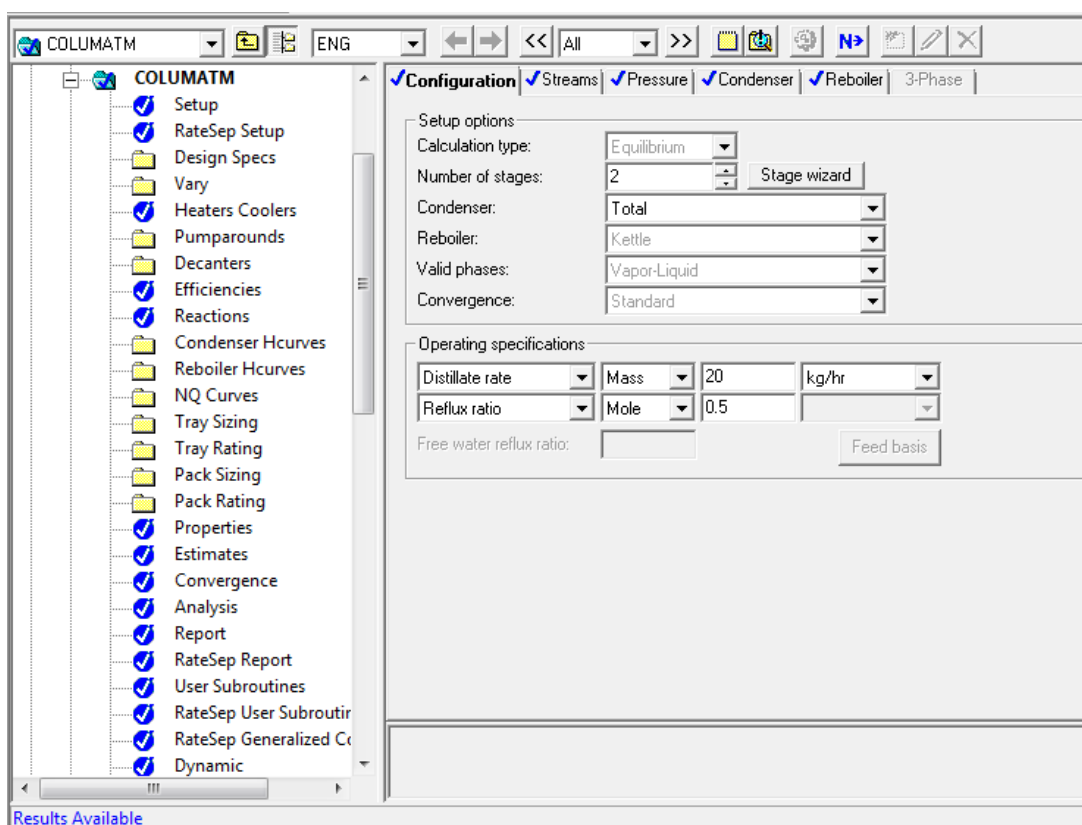


Figura 9: Configuración columna atmosférica

Después, en la **Figura 10** se ilustra cómo se determina que la etapa dos es la etapa de alimentación, así como la fase en las que se encuentra la entrada y la salida.



CAPITULO 3. METODOLOGÍA



Feed streams

Name	Stage	Convention
REFIN2	2	Above-Stage

Product streams

Name	Stage	Phase	Basis	Flow	Units	Flow ratio	Feed specs
DEST1	1	Liquid	Mole		lbmol/hr		Feed basis
PRODUCT1	2	Liquid	Mole		lbmol/hr		Feed basis

Figura 10: Alimentación columna atmosférica

Posteriormente también se mostrará en qué términos se definió la presión del sistema, la cual, como se muestra en la **Figura 11**, se caracterizó en 0.8 Atm.

Pressure

View: Top / Bottom

Top stage / Condenser pressure

Stage 1 / Condenser pressure: 0.8 atm

Stage 2 pressure (optional)

☒ Stage 2 pressure: [] psia

☐ Condenser pressure drop: [] psi

Pressure drop for rest of column (optional)

☒ Stage pressure drop: [] psi

☐ Column pressure drop: [] psi

Stage 2 pressure.

Figura 11: Presión columna atmosférica



CAPITULO 3. METODOLOGÍA



3.3.2 Columna a Vacío

La columna a vacío también se caracterizó con base en un análisis de sensibilidad, que posteriormente se mostrará. En éste se encontró que las etapas óptimas eran tres con un condensador total, una relación de reflujo de 1.3 y una tasa de destilado de 20 kg/h. Todo esto como se muestra en la **Figura 12**.

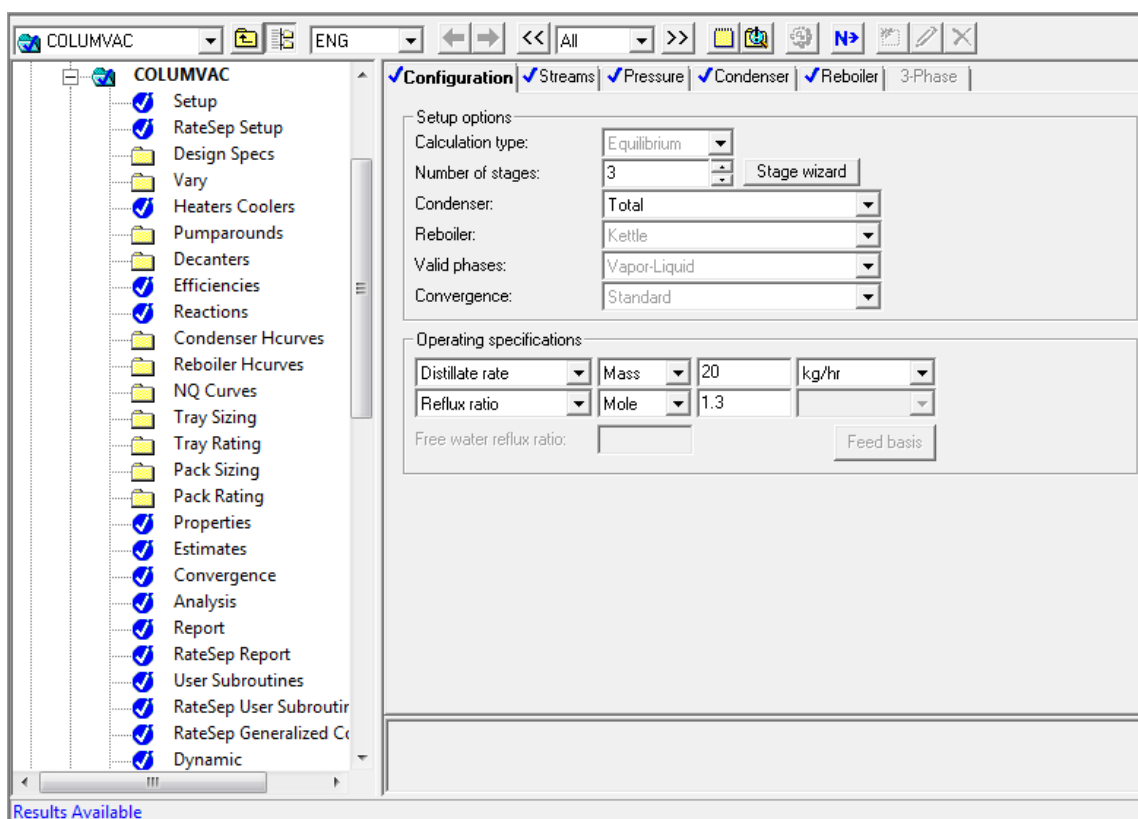


Figura 12: Configuración de vacío

En la **Figura 13** se definió, que la etapa de alimentación era la etapa tres y las fases en las que se encuentra la entrada como de la salida.



CAPITULO 3. METODOLOGÍA



Feed streams:

Name	Stage	Convention
PRODUCT1	3	Above-Stage

Product streams:

Name	Stage	Phase	Basis	Flow	Units	Flow ratio	Feed specs
PRODUCT2	3	Liquid	Mole		lbmol/hr		Feed basis
DEST2	1	Liquid	Mole		lbmol/hr		Feed basis

Figura 13: Alimentación columna a vacío

Posteriormente, en la **Figura 14** se especifica la presión de la columna, la cual se determinó en 160 mmHg con el fin de entrar en un vacío que ayude a la mejor separación del MEK, sin entrar en un alto vacío que eleve los costos de equipos y operación.

Pressure Settings:

View: Top / Bottom

Top stage / Condenser pressure:
Stage 1 / Condenser pressure: 160 mmHg

Stage 2 pressure (optional):
☒ Stage 2 pressure: [] psia
☐ Condenser pressure drop: [] psi

Pressure drop for rest of column (optional):
☒ Stage pressure drop: [] psi
☐ Column pressure drop: [] psi

Stage pressure drop.

Figura 14: Presión de la columna de vacío



3.3.3 Bomba de recirculación

Un detalle muy importante en lo que a simulación se refiere, es cómo vamos a trasladar el material de recirculación de un punto a otro después de la salida de la columna a vacío. Esto será utilizando una bomba, pero, ¿Cómo se determinaría la presión de salida de la bomba para tal fin? La respuesta a esto es simple, sólo se tiene que romper el vacío y si hay un entronque con otra línea de recirculación, igualar las dos presiones para que haya flujo y efectivamente este es nuestro caso. Para esto, se tiene que colocar una bomba a la salida de recirculación de la columna a vacío y determinar su presión de salida, como se muestra en la **Figura 15**.

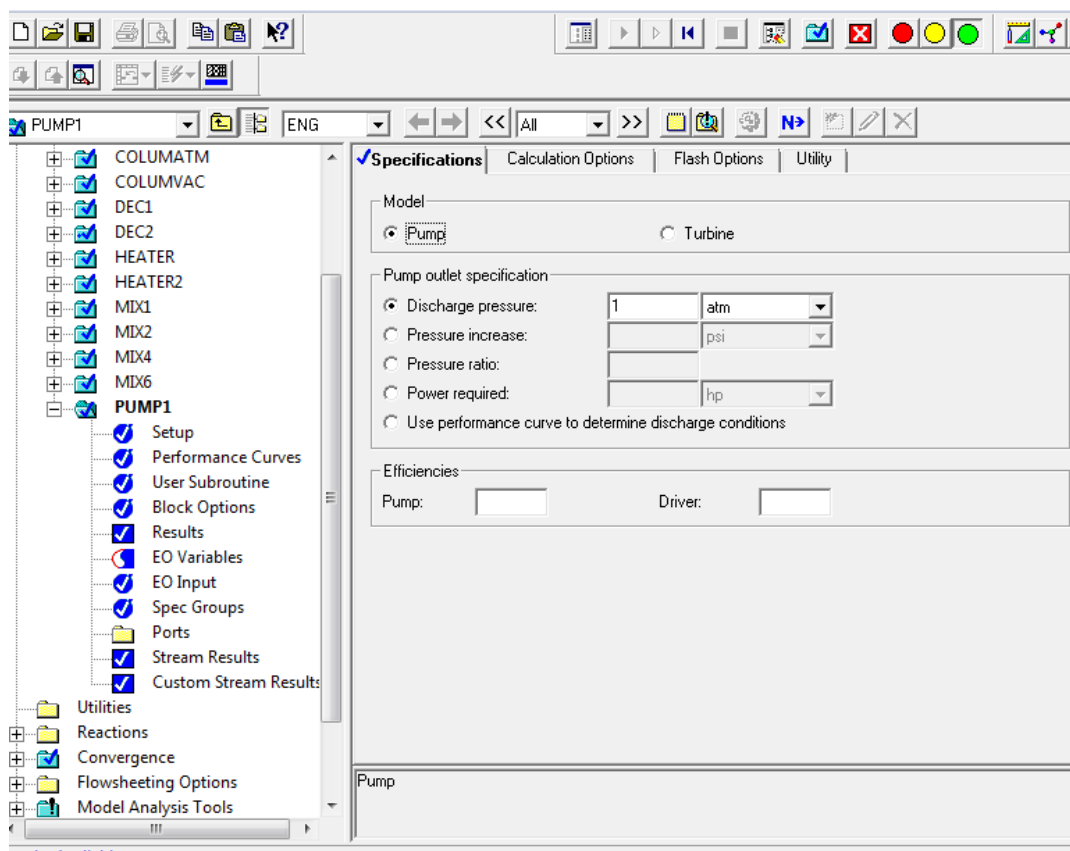


Figura 15: Especificaciones de Bomba

La presión de salida determinada es de 1 atm, con lo cual se asegura que el vacío a la salida de la recirculación de la columna a vacío se rompe y se puede tener flujo de material por esa línea.



3.4 PROPUESTA CON DOS ETAPAS.

Para la siguiente propuesta la súper estructura se muestra en la **Figura 16** y las condiciones de operación son las siguientes:

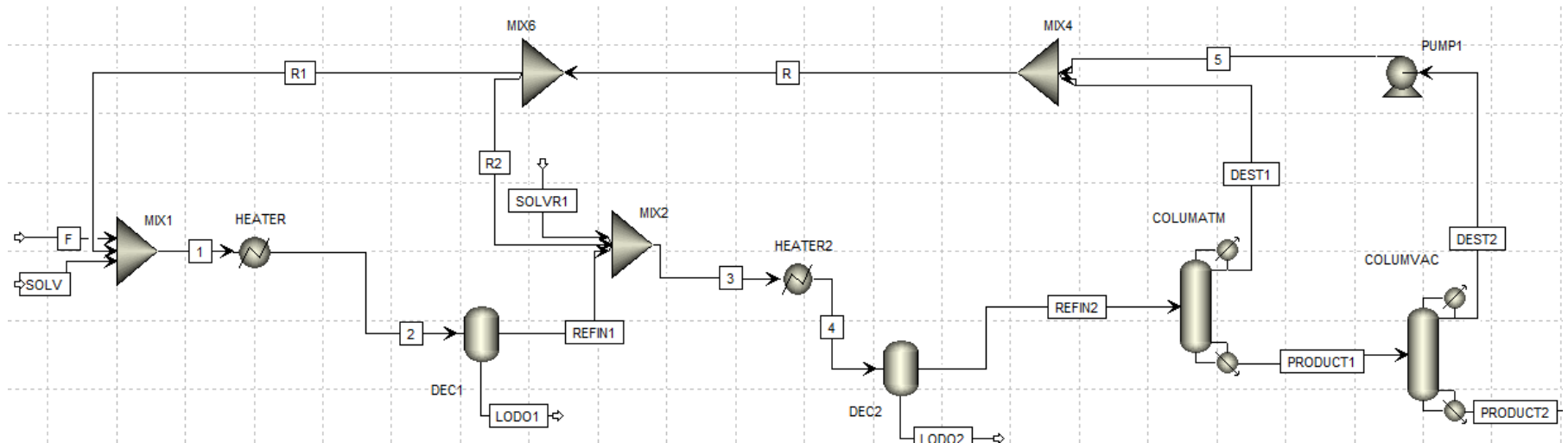


Ilustración 16: Propuesta con dos etapas



CAPITULO 3. METODOLOGÍA



Este modelo, al igual que el modelo de tres etapas se simuló con una entrada de materia prima, es decir, el aceite lubricante usado, una entrada de solvente virgen y una entrada de solvente en recirculación que viene producto de los sistemas de destilación. Después pasa a un precalentamiento, en el cual se eleva a una temperatura para posteriormente ir a una etapa de decantación donde se separan las impurezas del refinado. El refinado pasa a una segunda etapa de decantación en donde se le agrega una cantidad mínima de solvente adicional, la cual recupera pérdidas que pudiera tener en la primera etapa de decantación. Al separarse la segunda corriente de impurezas y la segunda de refinado, esta última pasa a una etapa de separación de solvente en la que intervienen dos columnas de destilación, una atmosférica y una a vacío, las cuales, bajo distintas condiciones, separan el solvente del aceite lubricante usado.

La simulación de la propuesta con dos etapas se hizo de la misma manera que la anterior simulación, con diferencia sólo en el número de etapas y la temperatura de los intercambiadores de calor.

3.4.1 Intercambiador de calor “HEATER1”

Para este intercambiador, la configuración fue se ilustra en la **Figura 17**.

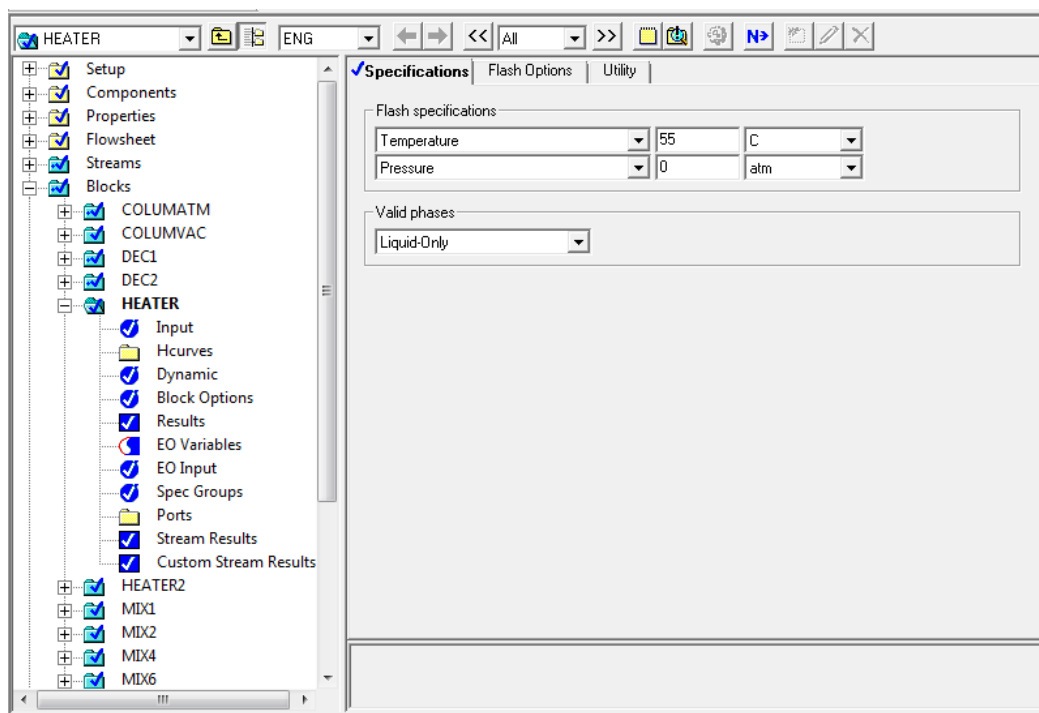


Figura 17: Especificaciones intercambiador 1

3.4.2 Intercambiador de calor “HEATER2”

Para este intercambiador, la configuración se muestra en la **Figura 18**.

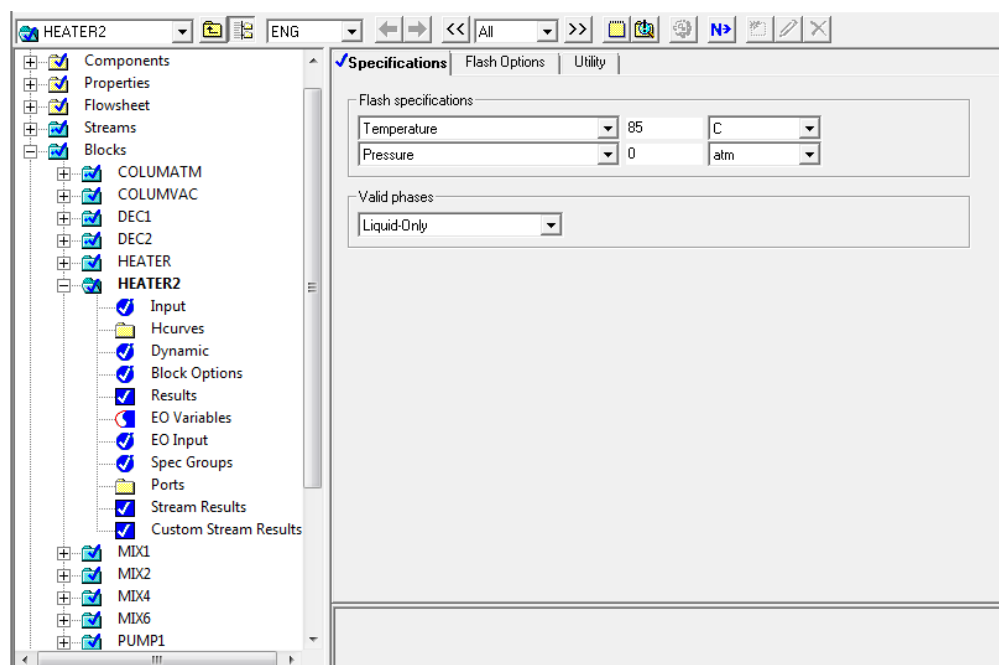


Figura 18: Configuración Intercambiador 2



CAPITULO 3. METODOLOGÍA



Para estas dos configuraciones, se hicieron análisis de sensibilidad para elegir las temperaturas a las cuales operarían. Estos análisis se mostrarán posteriormente en otro apartado de este trabajo.

El concentrado de condiciones de operación y simulación se muestra en las **Tablas 3 a la 8:**

Alimentación

Tabla 3: Condiciones de operación en alimentación

	Material	Entrada (kg/h)
Corriente F	C28H58	425
	C30H62	425
	AL	18.75
	BA	18.75
	B	18.75
	CA	18.75
	CU	18.75
	FE	18.75
	NI	18.75
	MN	18.75
Corriente Solv	METHY-01	5

Calentadores

Tabla 4: Condiciones de alimentación en intercambiadores

Heater 1	
Temperatura	55 °C
Presión	0 (sin caída de presión)
Heater 2	
Temperatura	70 °C
Presión	0 (sin caída de presión)
Heater 3	
Temperatura	80 °C
Presión	0 (sin caída)



CAPITULO 3. METODOLOGÍA



Para la propuesta con dos intercambiadores:

Tabla 5: Condiciones de operación en intercambiadores para propuesta con dos etapas

Heater 1	
Temperatura	55 °C
Presión	0 (sin caída de presión)
Heater 2	
Temperatura	85 °C
Presión	0 (sin caída de presión)

Decantadores: Esto aplica para las dos propuestas

Tabla 6: Condiciones de operación para decantadores

Dec 1, 2 y/o 3			
Componente disponible	Componente clave		
C28H58	AL	CA	NI
C30H62	BA	CU	MN
	B	FE	METHY-01

Columnas de destilación

Tabla 7: Condiciones de operación para columna de destilación atmosférica

Columna Atmosférica	
Etapas	2
Condensador	Total
Flujo destilado	20 Kg/h
Radio reflujo	0.5
Alimentación	1ra etapa
Fases	Líquida
Presión	1 atm

Tabla 8: Condiciones de operación para columna de destilación a vacío

Columna a vacío	
Etapas	3
Condensador	Total
Flujo destilado	20 Kg/h
Radio reflujo	1.3
Alimentación	3ra etapa
Fases	Líquida
Presión	160 mmHg



CAPITULO 3. METODOLOGÍA



Cabe aclarar que hay ciertas variables que son críticas en la simulación, también se llevan a cabo en la operación de la planta. Una de ellas es la temperatura de los calentadores. Antes del inicio de cada etapa de decantación hay un calentador, en los cuales se seleccionó la temperatura ideal en la que debiera funcionar. Esta temperatura está entre la temperatura de fusión y la temperatura en la que el aceite lubricante empieza a adquirir propiedades de adición de impurezas, donde estas no se pueden separar de la mezcla que compone el aceite lubricante. La temperatura de fusión del Octacosano es de 66°C y la del Triacotano es de 64.5°C , por lo tanto se hizo un análisis de sensibilidad para encontrar el tope de temperatura con respecto al flujo másico de un componente clave, con el que no se perdieran las propiedades antes mencionadas de la mezcla que conforma al aceite lubricante. El componente clave que se eligió fue el Calcio por estar presente en la mezcla, además de tener la mayor parte de sedimentación en la última etapa y de ser el componente que más produce sales corrosivas para equipos.



4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD



4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

En esta parte del proyecto se justificarán cada una de las decisiones tomadas en cuestión de temperaturas, etapas y demás cuestiones antes mencionadas para la simulación.

Una de ellas fue la elección de las temperaturas de los precalentadores. Esta decisión fue tomada gracias a un análisis de sensibilidad realizado entre la temperatura de operación del precalentador y el flujo de salida de los componentes de desecho. Es decir, se cambió la temperatura en determinado rango para ver el comportamiento de salida de los contaminantes por la línea de desecho (lodo 1, 2 y 3)

4.1 Análisis de sensibilidad para el intercambiador de calor “HEATER1” para la versión de tres etapas

Ahora se ilustra cómo se hizo el análisis de sensibilidad del “HEATER1” en ASPEN Plus en la **Figura 19**.

El primer paso es seguir la ruta Data/Model analysis tools/sensitivity.

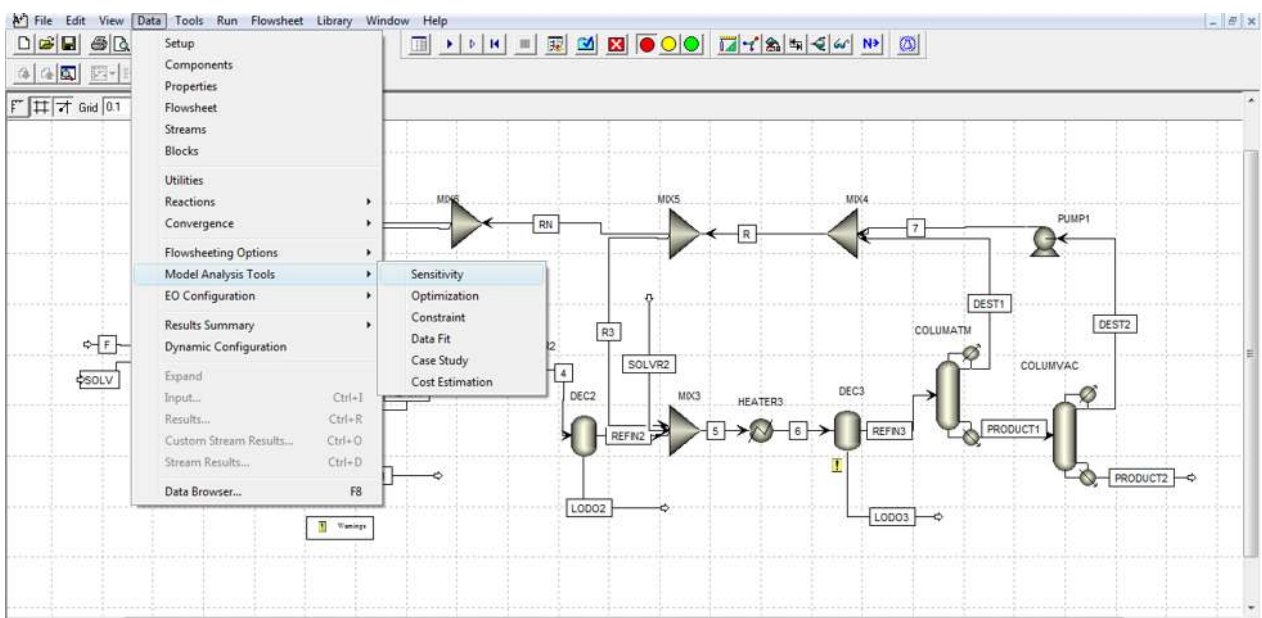


Figura 19: Paso N°1



4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

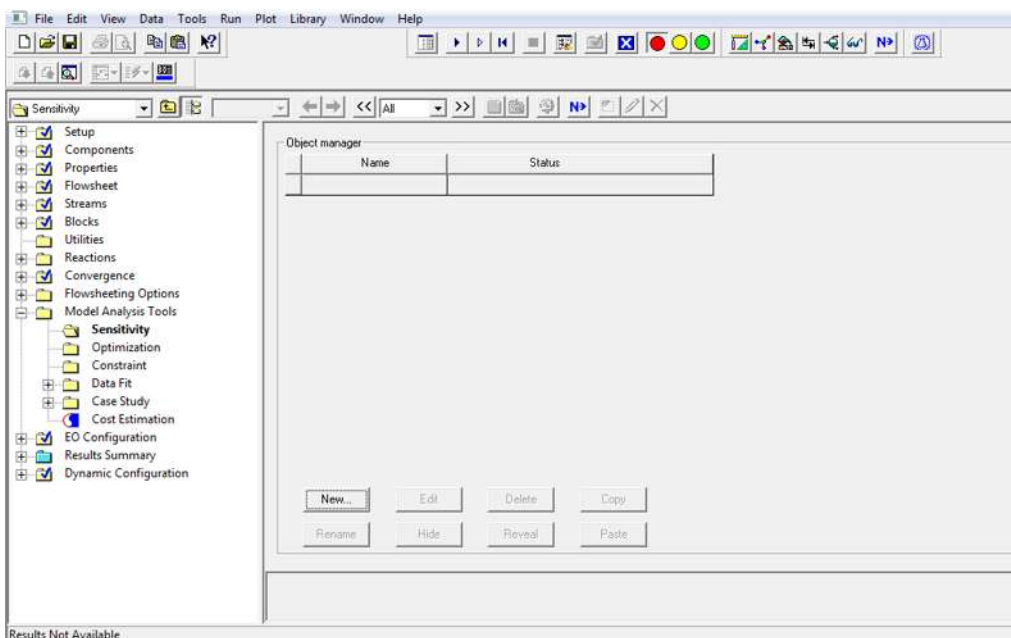


Figura 20: Paso N°2

Después se ve una pantalla como la de la **Figura 20**, en la que se tendrá que definir el nombre del objeto para hacer el análisis de sensibilidad. En este caso, se le puso el nombre de cada uno de los componentes “impuros” que lleva el aceite lubricante usado como se muestra en la **Figura 21**.

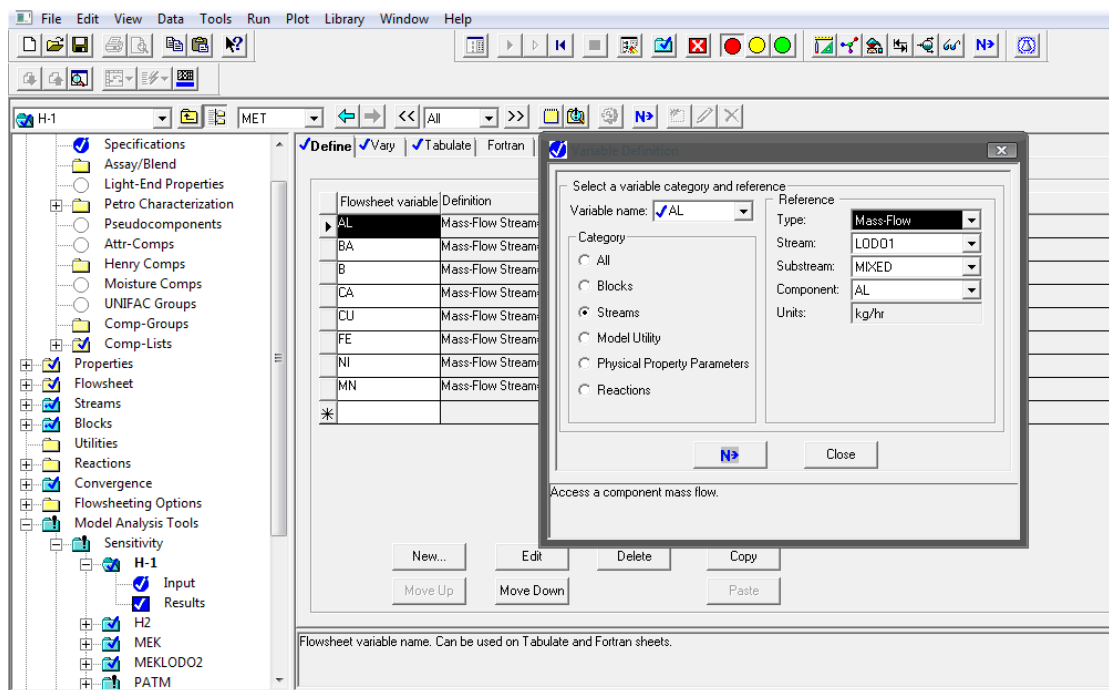


Figura 21: Definición de objeto



4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD



Después, se ingresa la categoría de la variable que se quiera analizar, que en este caso será una corriente y posteriormente el cómo se analizará. En nuestro caso se analizará la corriente “LODO 1” por flujo másico de Al primeramente. Estos pasos se repetirán para cada uno de los componentes impuros de la mezcla. Posteriormente, se da en el signo “N” para continuar y manda a la ventana como la que se muestra en la **Figura 22**.

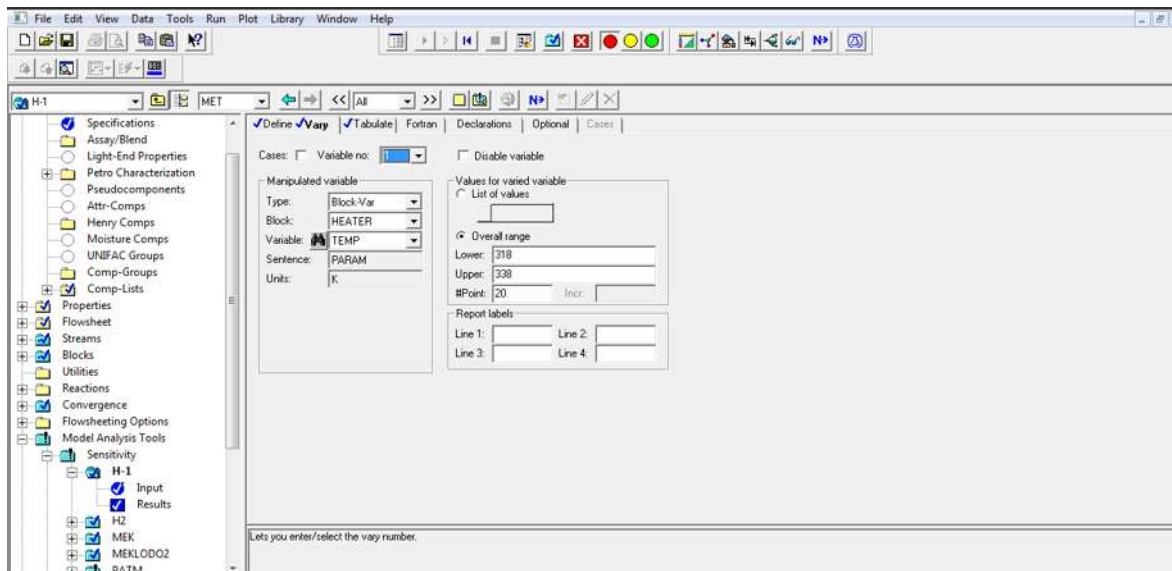


Figura 22: Definición de variable dependiente

En esta definimos el tipo de variable independiente que se utilizará. En este caso es la variable temperatura que es una variable de bloque del “HEATER1”, la cual se variará desde 318 hasta 338 K (45°C hasta 65°C) Después de esto, se pasará a la pestaña que dice “Tabulate” que se muestra en la **Figura 23**.

En esta pestaña, al presionar el botón “Fill Variables” aparecerá el nombre de las variables que se definieron para estudiar. Después de esto, se corrió la simulación y arrojó los resultados de la **Tabla 9**.



4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

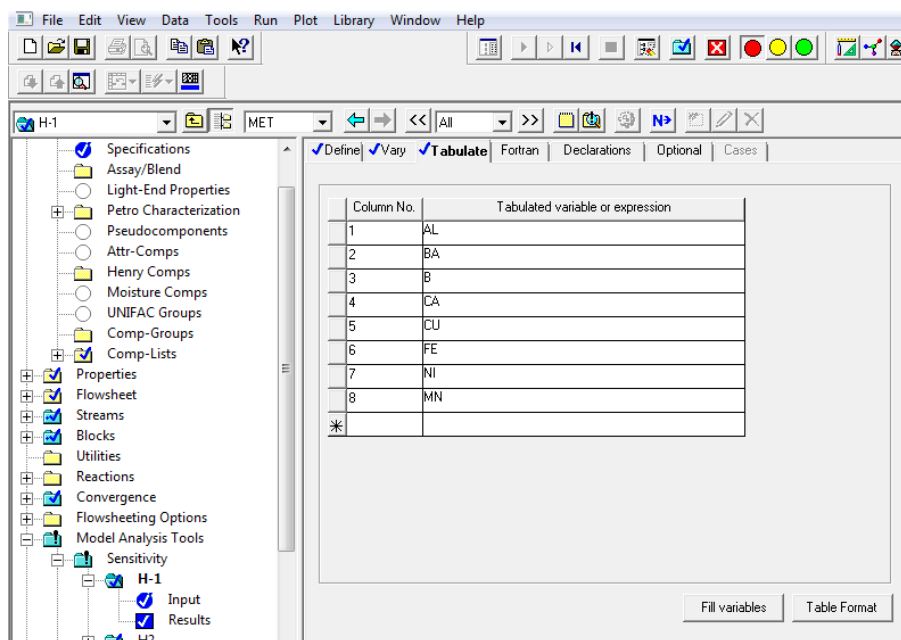


Figura 23: Tabla de variables

Tabla 9: Resultados Análisis de sensibilidad Componentes de corriente "LODO1" vs Temperatura

Flujo en Kg/h								
Temp (°C)	CA	AL	BA	B	CU	FE	NI	MN
44.8	0	18.7	0	0	0	18.7	0	0
45.9	0	18.7	0	0	0	18.7	0	0
46.9	0	18.7	0	0	0	18.7	0	0
48.0	0	18.7	0	0	0	18.7	0	0
49.0	0	18.7	0	0	0	18.7	0	0
50.1	0	18.7	0	0	0	18.7	0	0
51.1	0	18.7	0	0	0	18.7	0	0
52.2	0	18.7	0	0	0	18.7	0	0
53.2	0	18.7	0	0	0	18.7	0	0
54.3	0	18.7	0	0	0	18.7	0	0
55.3	0	18.7	0	0	0	18.7	0	0
56.4	0	18.7	0	0	0	18.7	0	0
57.4	0	18.7	0	0	0	18.7	0	0
58.5	0	18.7	0	0	0	18.7	0	0
59.5	0	18.7	0	0	0	18.7	0	0
60.6	0	18.7	0	0	0	18.7	0	0
61.6	0	18.7	0	0	0	18.7	0	0
62.7	0	18.7	0	0	0	18.7	0	0
63.7	0	18.7	0	0	0	18.7	0	0
64.8	0	18.7	0	0	0	18.7	0	0



4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD



Para entenderlo de mejor manera, se ilustran los resultados en las **Figuras 24 y 25**.

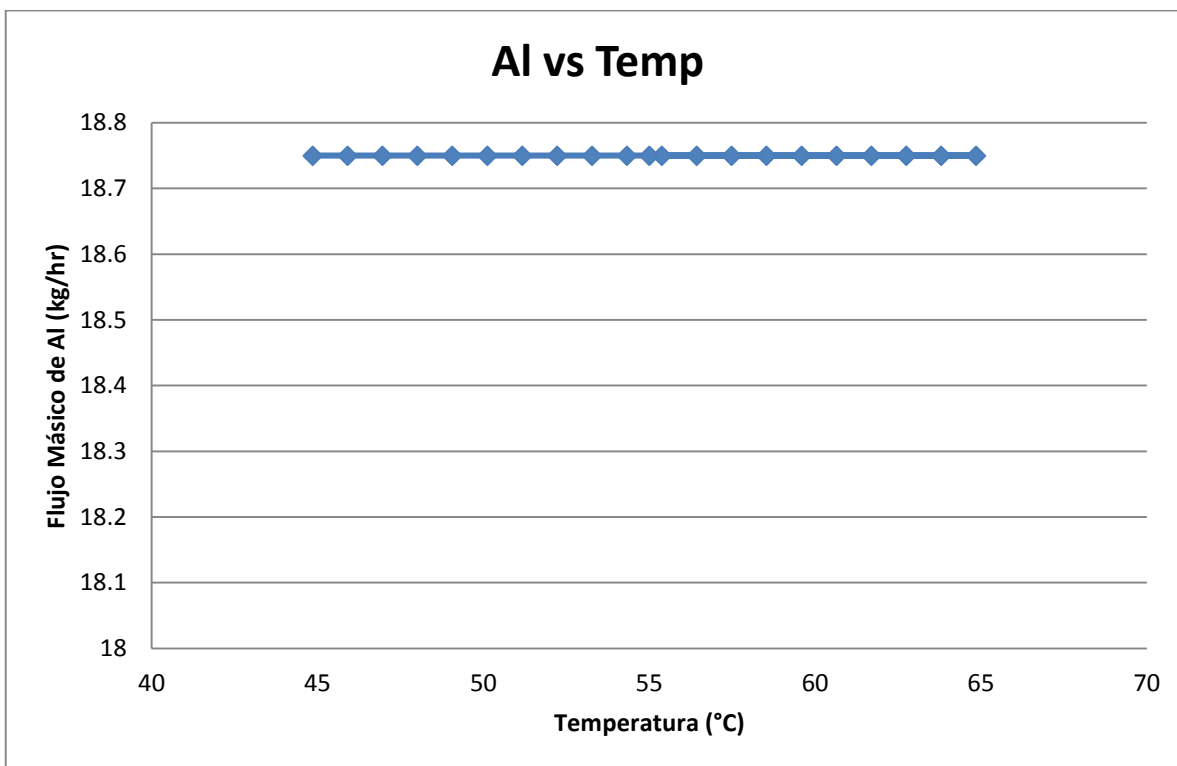


Figura24: Aluminio vs Temperatura

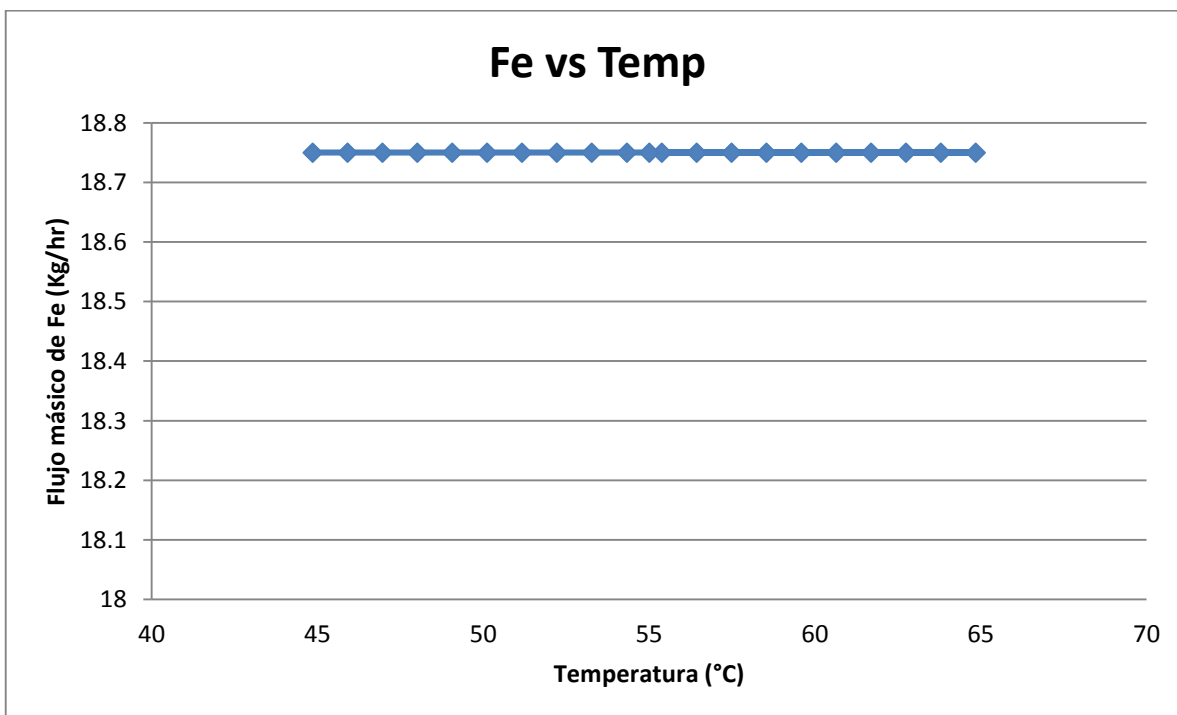


Figura 25: Fierro Vs Temperatura



4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD



Dado este análisis de sensibilidad, se puede elegir la temperatura de 55°C. Es claro que, según el análisis, se podría elegir una temperatura menor, ya que no hay diferencia apreciable en la salida de residuos de Aluminio y hierro en los lodos, pero se eligió la de 55°C para hacer menor las diferencias de temperaturas entre cada intercambiador de calor.

Otro dato a destacar, es que en los demás componentes no se aprecia salida en los lodos, esto se debe a las propiedades de esos compuestos que según la simulación, siguen siendo inseparables de la mezcla a esas temperaturas.



4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

4.2 Análisis de sensibilidad para el Intercambiador “HEATER2” para la versión de tres etapas

En este análisis de sensibilidad se definió la temperatura que es una variable de bloque del “HEATER2”, la cual se variará desde 328 hasta 343 K (55°C hasta 70°C)

Tabla 10: Resultados de análisis de sensibilidad para Intercambiador “Heater2”

°C	Flujo en kg/h							
	CA	AL	BA	B	CU	FE	NI	MN
54.85	18.31	3.53E-10	18.69	18.69	18.69	2.84E-10	18.69	18.69
55.90	18.37	3.53E-10	18.69	18.69	18.69	2.84E-10	18.69	18.69
56.96	18.43	3.53E-10	18.69	18.69	18.69	2.84E-10	18.69	18.69
58.01	18.47	3.53E-10	18.69	18.69	18.69	2.84E-10	18.69	18.69
59.06	18.51	3.53E-10	18.69	18.69	18.69	2.84E-10	18.69	18.69
60.11	18.54	3.53E-10	18.69	18.69	18.69	2.84E-10	18.69	18.69
61.17	18.57	3.53E-10	18.69	18.69	18.69	2.84E-10	18.69	18.69
62.22	18.60	3.53E-10	18.69	18.69	18.69	2.84E-10	18.69	18.69
63.27	18.62	3.53E-10	18.69	18.69	18.69	2.84E-10	18.69	18.69
64.32	18.63	3.53E-10	18.69	18.69	18.69	2.84E-10	18.69	18.69
65.38	18.65	3.53E-10	18.69	18.69	18.69	2.84E-10	18.69	18.69
66.43	18.66	3.53E-10	18.69	18.69	18.69	2.84E-10	18.69	18.69
67.48	18.67	3.53E-10	18.69	18.69	18.69	2.84E-10	18.69	18.69
68.53	18.68	3.53E-10	18.69	18.69	18.69	2.84E-10	18.69	18.69
69.59	18.69	3.53E-10	18.69	18.69	18.69	2.84E-10	18.69	18.69
70.64	18.70	3.53E-10	18.69	18.69	18.69	2.84E-10	18.69	18.69
71.69	18.70	3.53E-10	18.69	18.69	18.69	2.84E-10	18.69	18.69
72.74	18.71	3.53E-10	18.69	18.69	18.69	2.84E-10	18.69	18.69
73.80	18.72	3.53E-10	18.69	18.69	18.69	2.84E-10	18.69	18.69
74.85	18.72	3.53E-10	18.68	18.68	18.68	2.84E-10	18.68	18.68

Para entenderlo de mejor manera se muestran los resultados en las Figuras 26 a la 31.



4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

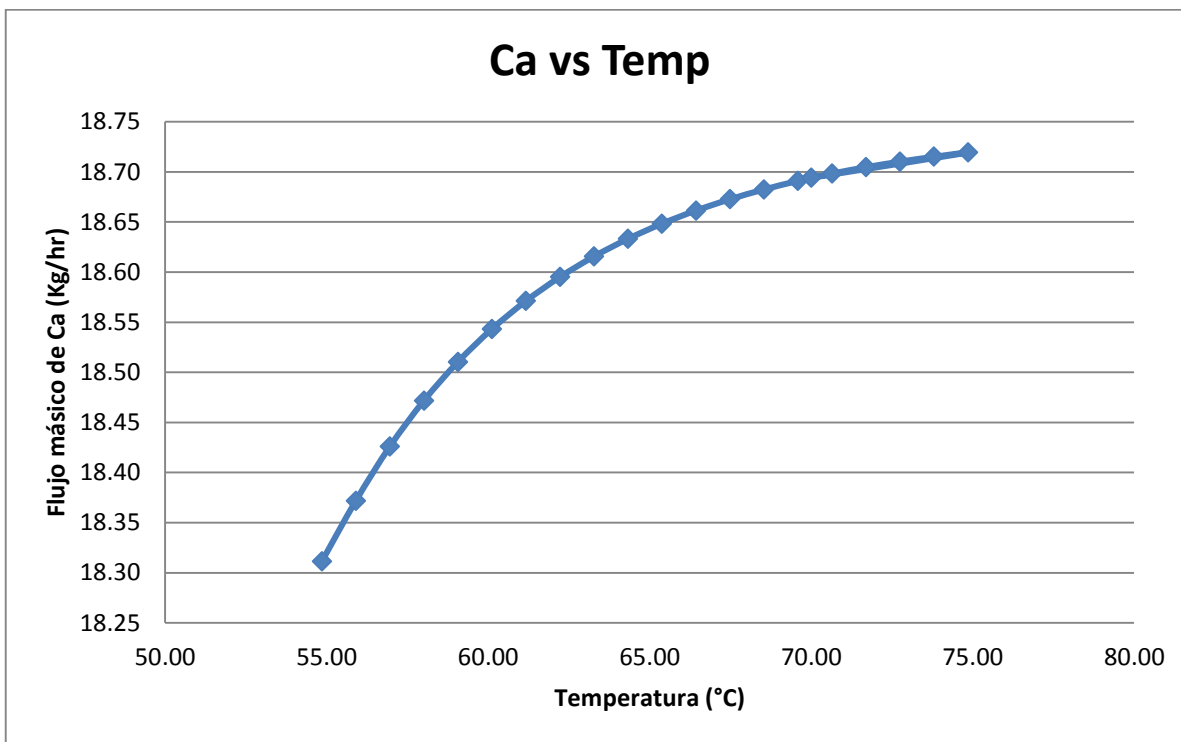


Figura 26: Calcio Vs Temperatura

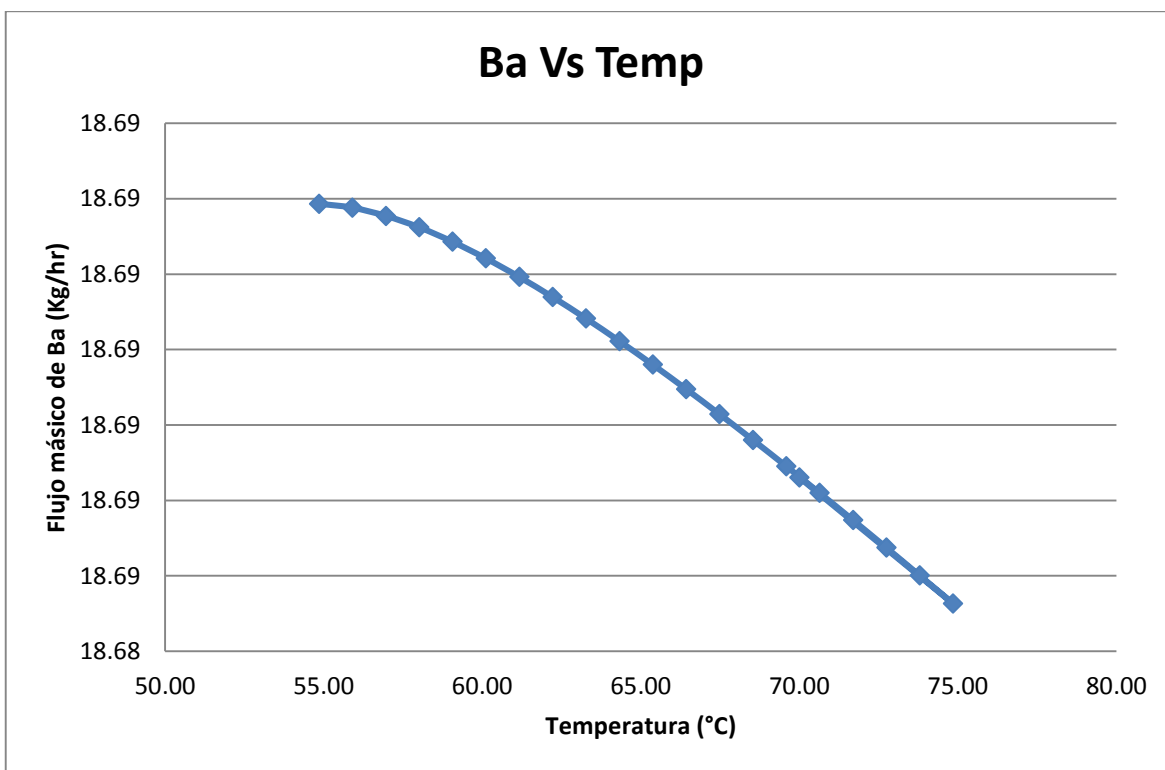


Figura 27: Bario Vs Temperatura



4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

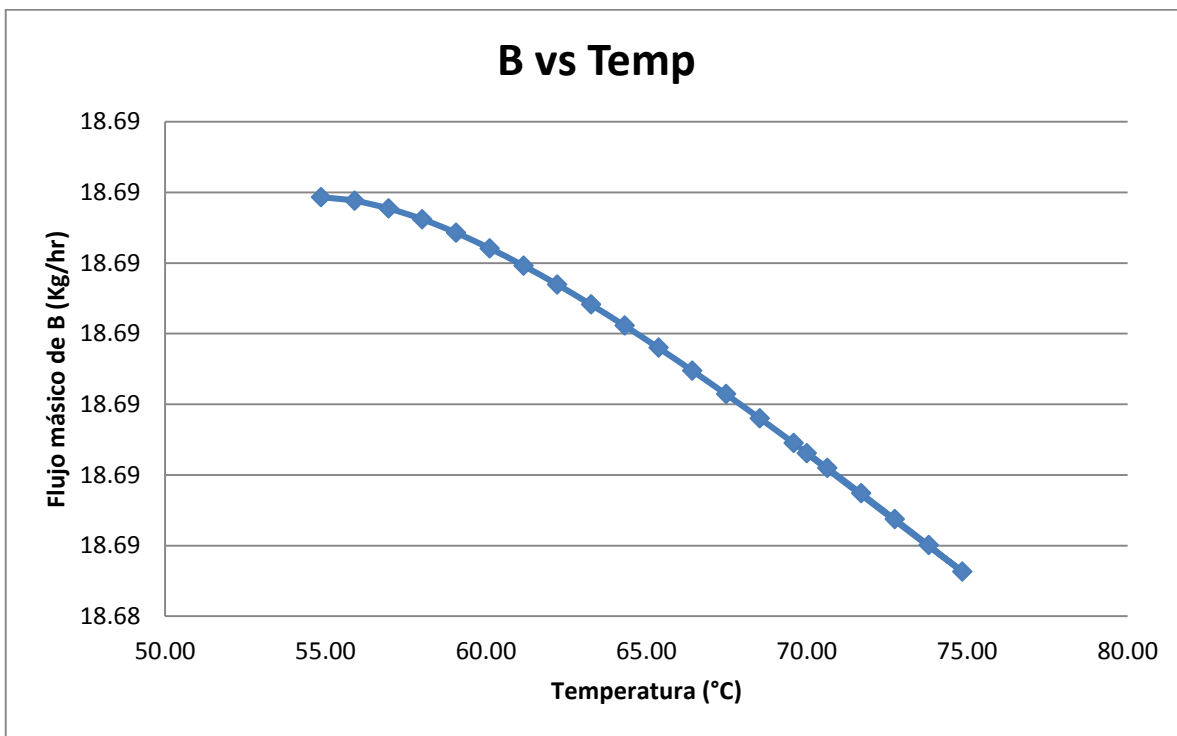


Figura 28: Boro Vs Temperatura

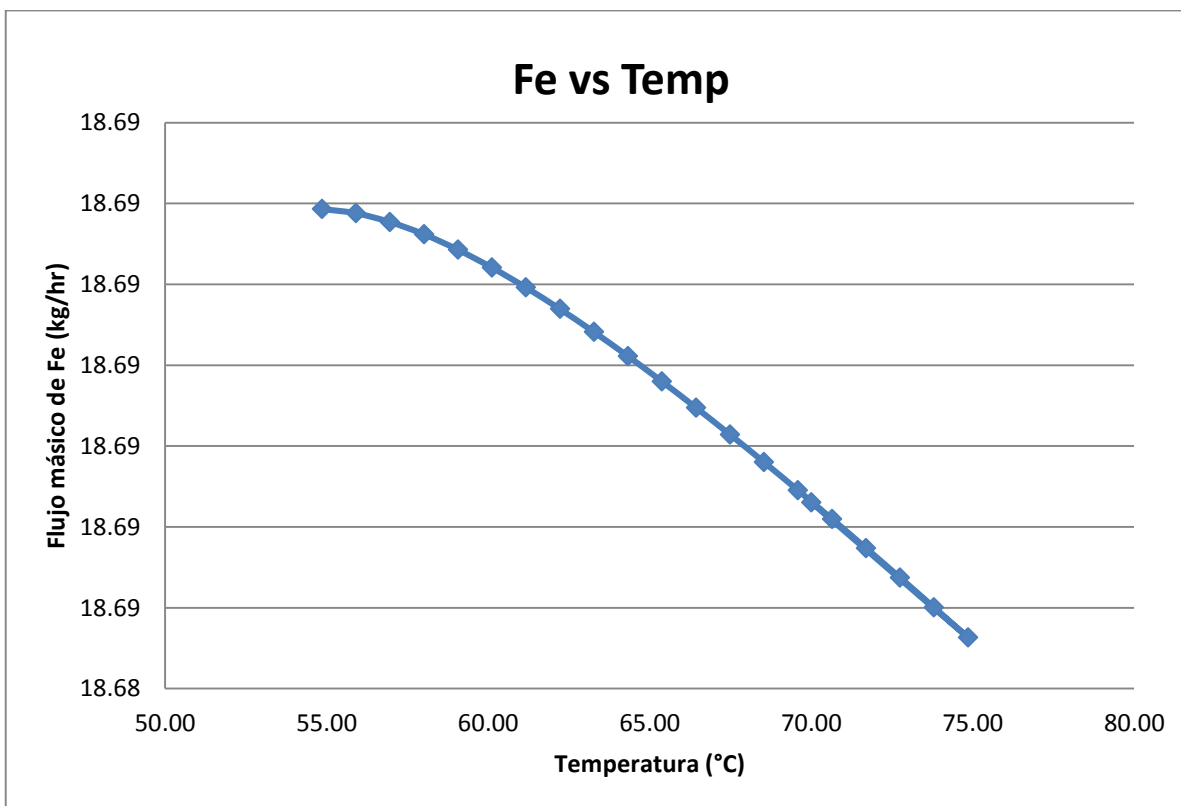


Figura29: Fierro Vs Temperatura



4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

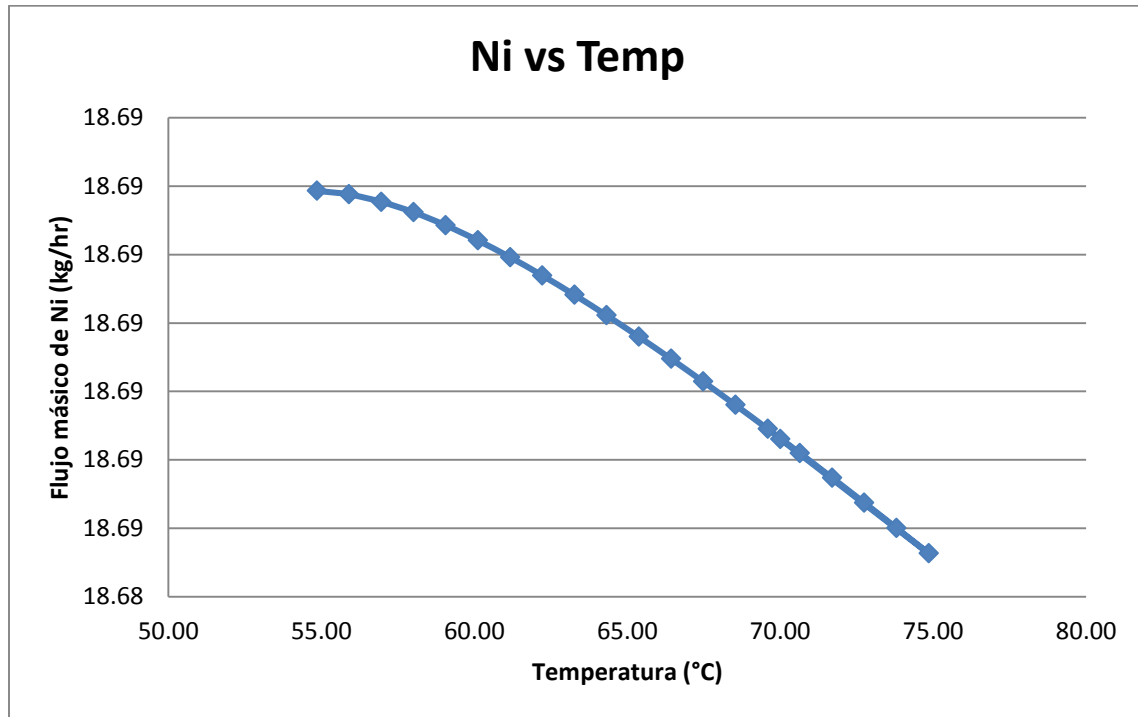


Figura30: Niquel Vs Temperatura

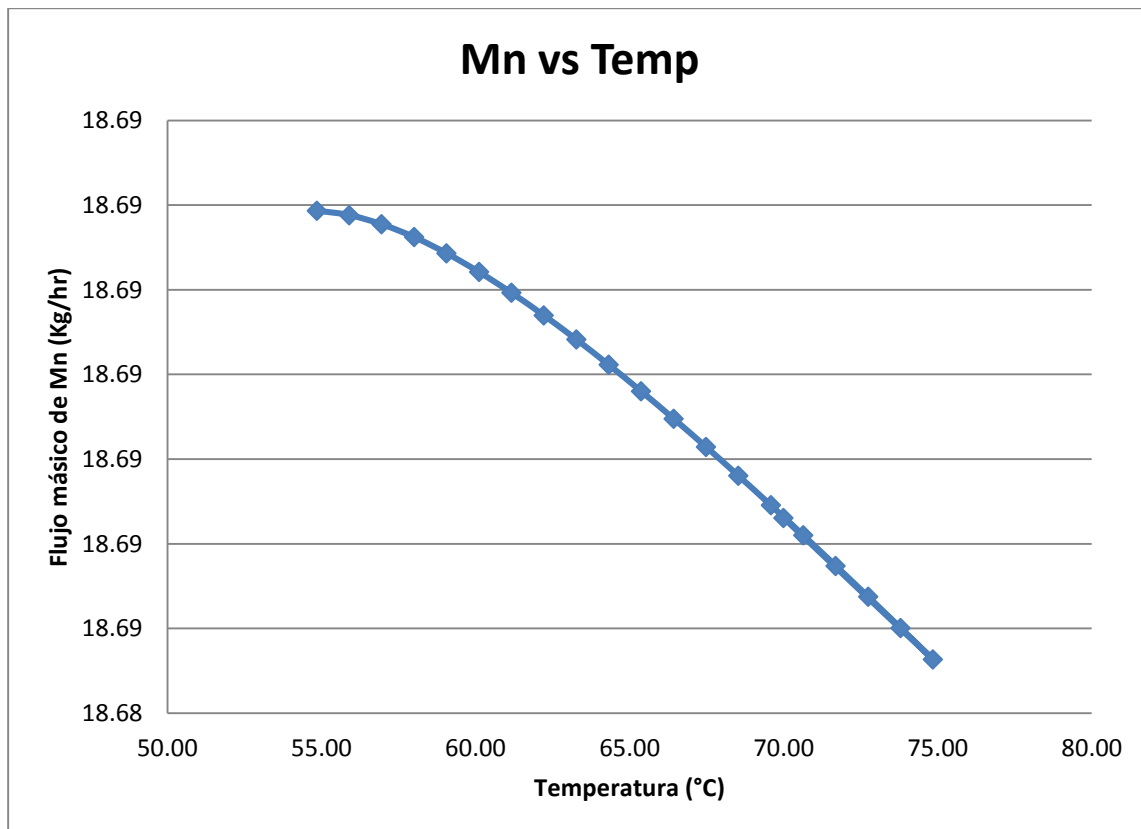


Figura31: Manganeso Vs Temperatura



4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Como se aprecia en la gráfica del Calcio, la diferencia de salida de este metal con respecto a la temperatura se ve más pronunciada hasta 70°C y después de allí su salida no es tan significativa. Además, en las demás gráficas, no se nota una disminución sustancial de salida de metales por la línea “LODO2”, por esta razón, la temperatura que se eligió para este intercambiador fue de 70°C.

4.3 Análisis de sensibilidad para el intercambiador de calor “HEATER3” para la versión de tres etapas

En este análisis de sensibilidad se define la temperatura que es una variable de bloque del “HEATER3” la cual se variará desde 343 hasta 358 K (70°C hasta 85°C), cuyos resultados se tabulan en la **Tabla 11**.

Tabla 11: Resultados del análisis de sensibilidad del intercambiador “Heater3”

Flujo en kg/h								
°C	CA	AL	BA	B	CU	FE	NI	MN
69.85	0.00038	0	0.0020	0.0020	0.0020	0	0.0020	0.0020
70.64	0.00038	0	0.0018	0.0018	0.0018	0	0.0018	0.0018
71.43	0.00037	0	0.0015	0.0015	0.0015	0	0.0015	0.0015
72.22	0.00034	0	0.0013	0.0013	0.0013	0	0.0013	0.0013
73.01	0.00031	0	0.0010	0.0010	0.0010	0	0.0010	0.0010
73.80	0.00025	0	0.0008	0.0008	0.0008	0	0.0008	0.0008
74.59	0.00016	0	0.0004	0.0004	0.0004	0	0.0004	0.0004
75.38	3.37E-05	0	8.09E-05	8.09E-05	8.09E-05	0	8.09E-05	8.09E-05
76.17	0	0	0	0	0	0	0	0
76.96	0	0	0	0	0	0	0	0
77.74	0	0	0	0	0	0	0	0
78.53	0	0	0	0	0	0	0	0
79.32	0	0	0	0	0	0	0	0
80.11	0	0	0	0	0	0	0	0
80.90	0	0	0	0	0	0	0	0
81.69	0	0	0	0	0	0	0	0
82.48	0	0	0	0	0	0	0	0
83.27	0	0	0	0	0	0	0	0
84.06	0	0	0	0	0	0	0	0
84.85	0	0	0	0	0	0	0	0



4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD



Para entenderlo de mejor manera, se muestran los resultados en las **Figuras 32 a la 37**.

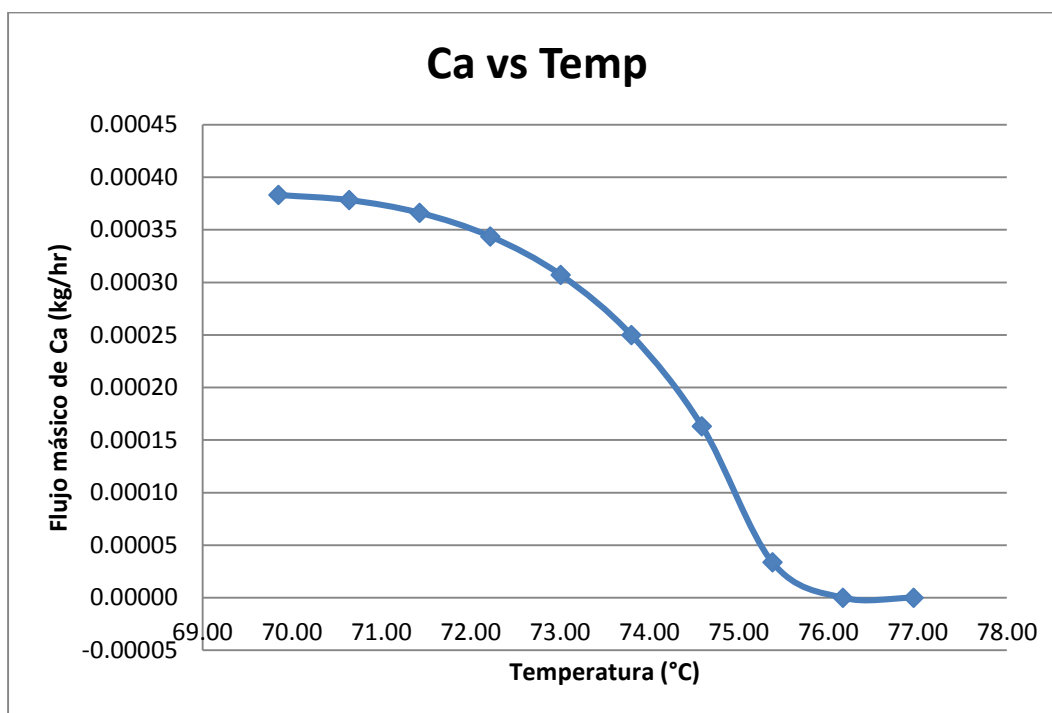


Figura 32: Calcio Vs Temperatura

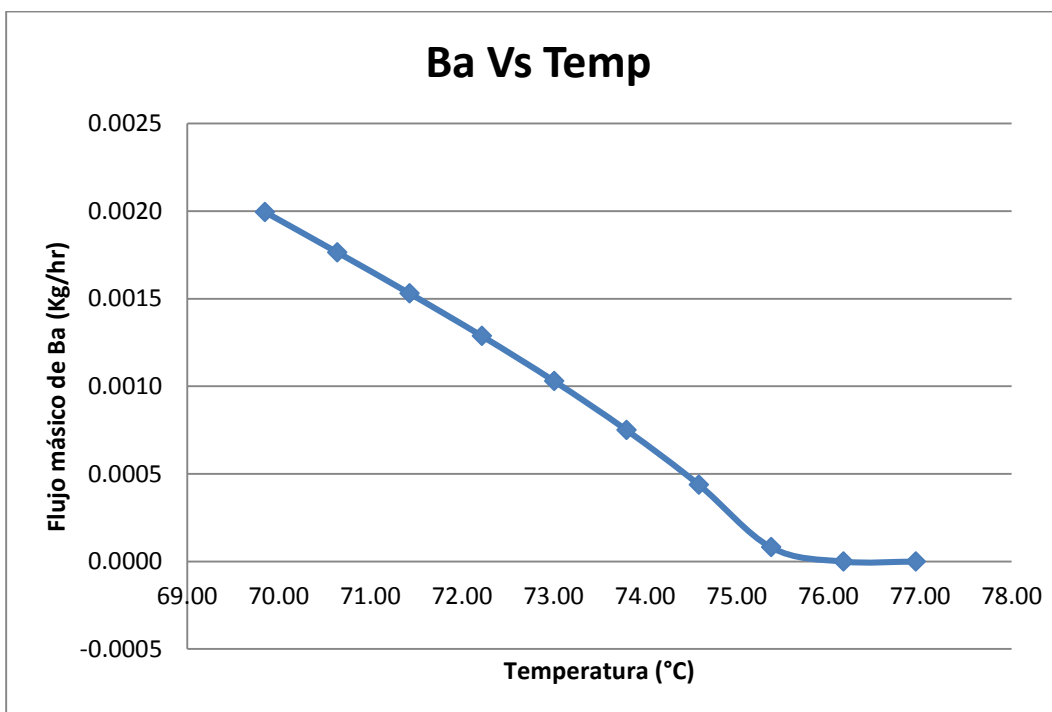


Figura 33: Bario vs Temperatura



4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

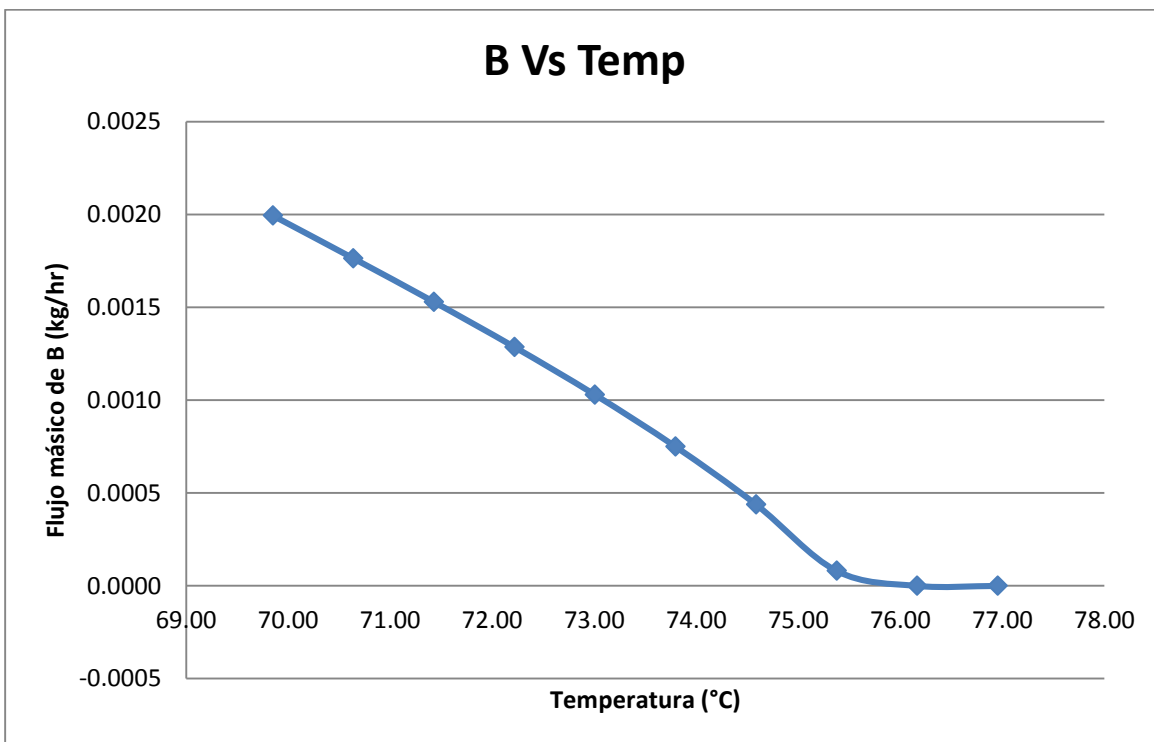


Figura 34: Boro vs Temperatura

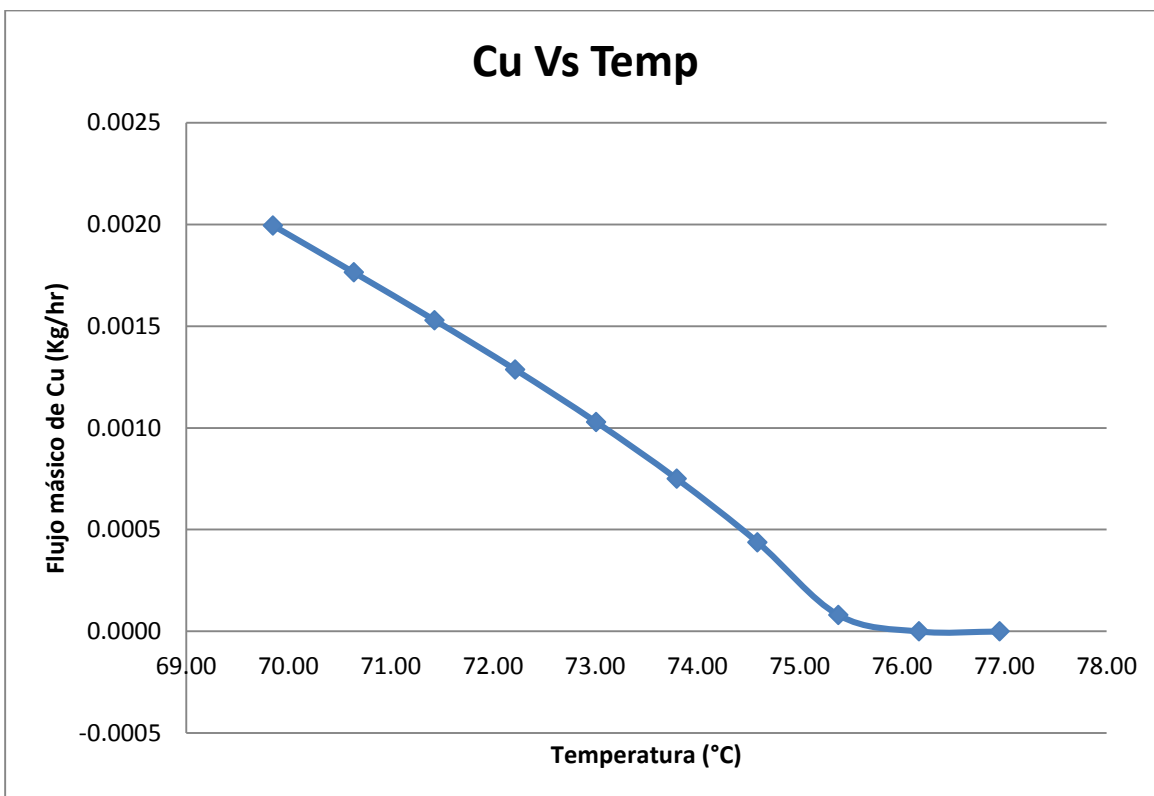


Figura 35: Cobre vs Temperatura



4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

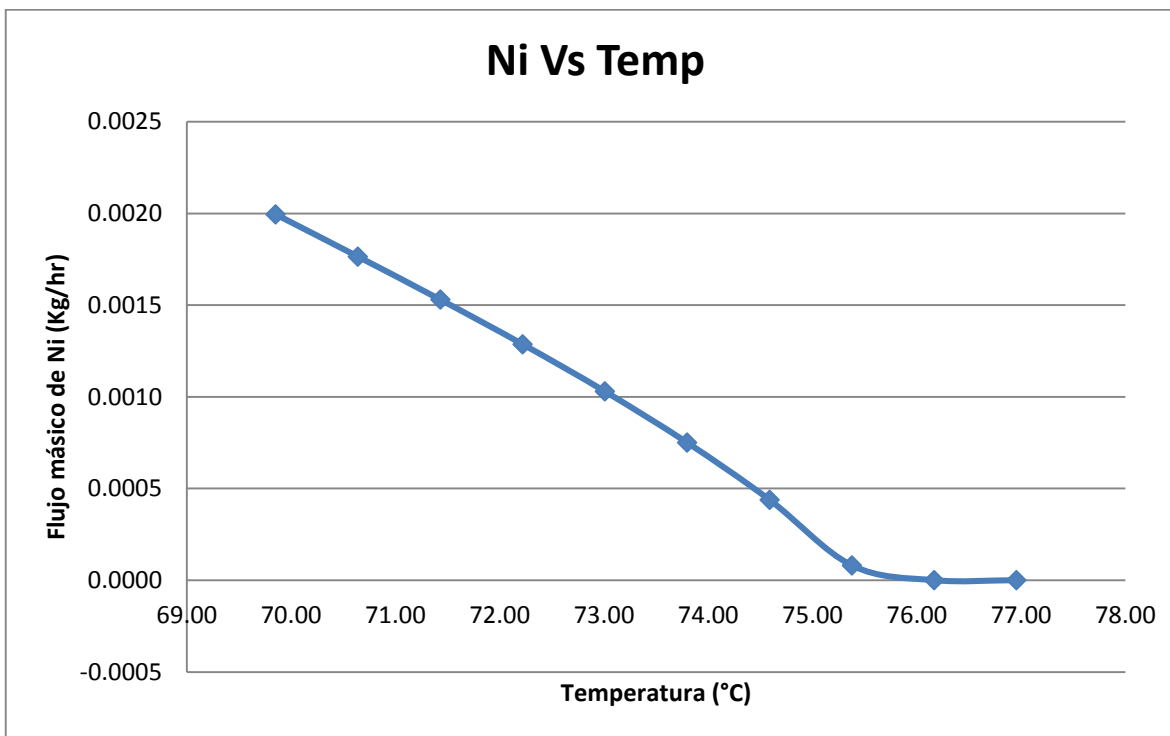


Figura 36: Niquel Vs Temperatura

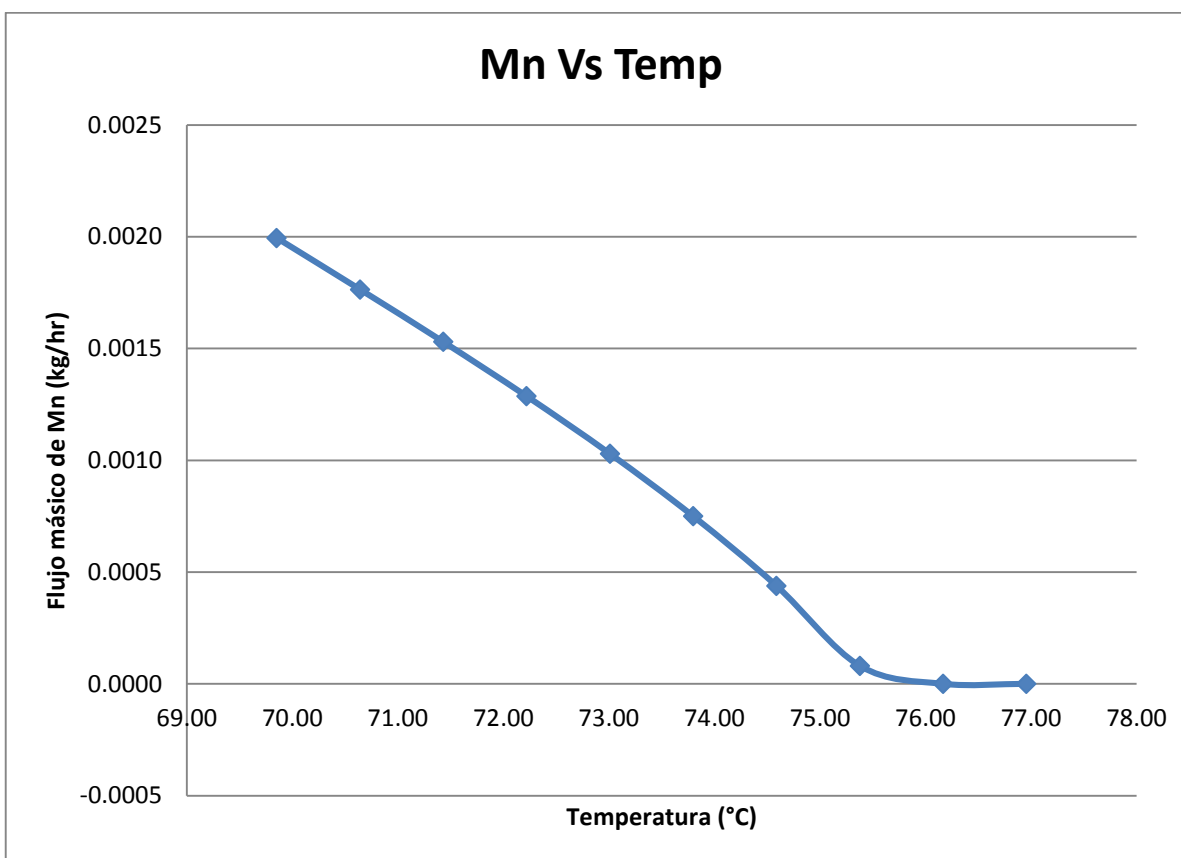


Figura 37: Manganeso Vs Temperatura



4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD



Como se aprecia en todas las gráficas anteriores, el flujo de salida de cada uno de los metales se ve disminuido conforme aumenta la temperatura. Esto es ocasionado, como ya se mencionó, por la naturaleza de las impurezas. Por consiguiente, la utilización de una tercera etapa en este modelo tiende a ser inútil con un gradiente de temperatura mayor a 5°C con respecto a la segunda etapa de decantación. Aun así, el modelo se simuló con una temperatura de 80°C para que se hiciera más evidente la inutilidad de esta etapa.

Al ver esta simulación, el proceso natural fue hacer el análisis de sensibilidad ya descrito dándonos cuenta de los resultados anteriores, es por ello que en el presente trabajo de tesis se propuso la utilización de solamente dos etapas para verificar con cuántas de estas etapas sería necesario simular el proceso para obtener mejores resultados. Lamentablemente no se pudo hacer un análisis de sensibilidad general para estas dos etapas y se tuvieron que simular todos los equipos para obtener los resultados que pudieran debelar, cuántas etapas serían las óptimas para el proceso de regeneración de aceite lubricante usado.



4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD



4.4 Análisis de sensibilidad para el Intercambiador “HEATER1” para la versión de dos Etapas

En este análisis de sensibilidad se definió la temperatura que es una variable de bloque del “HEATER1”, la cual se variará desde 318 hasta 338 K (45°C hasta 65°C). Al correr este análisis se obtuvieron los datos mostrados en la **Tabla 12**.

Tabla 12: Resultados del análisis de sensibilidad para la versión de dos etapas del intercambiador “Heater1”

°C	Flujo en kg/h							
	AL	BA	B	CA	CU	FE	NI	MN
44.85	18.75	0	0	0	0	18.75	0	0
45.90	18.75	0	0	0	0	18.75	0	0
46.96	18.75	0	0	0	0	18.75	0	0
48.01	18.75	0	0	0	0	18.75	0	0
49.06	18.75	0	0	0	0	18.75	0	0
50.11	18.75	0	0	0	0	18.75	0	0
51.17	18.75	0	0	0	0	18.75	0	0
52.22	18.75	0	0	0	0	18.75	0	0
53.27	18.75	0	0	0	0	18.75	0	0
54.32	18.75	0	0	0	0	18.75	0	0
55.38	18.75	0	0	0	0	18.75	0	0
56.43	18.75	0	0	0	0	18.75	0	0
57.48	18.75	0	0	0	0	18.75	0	0
58.53	18.75	0	0	0	0	18.75	0	0
59.59	18.75	0	0	0	0	18.75	0	0
60.64	18.75	0	0	0	0	18.75	0	0
61.69	18.75	0	0	0	0	18.75	0	0
62.74	18.75	0	0	0	0	18.75	0	0
63.80	18.75	0	0	0	0	18.75	0	0
64.85	18.75	0	0	0	0	18.75	0	0



4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD



Para entenderlo un poco mejor, los resultados se muestran en las **Figuras 38 y 39**.

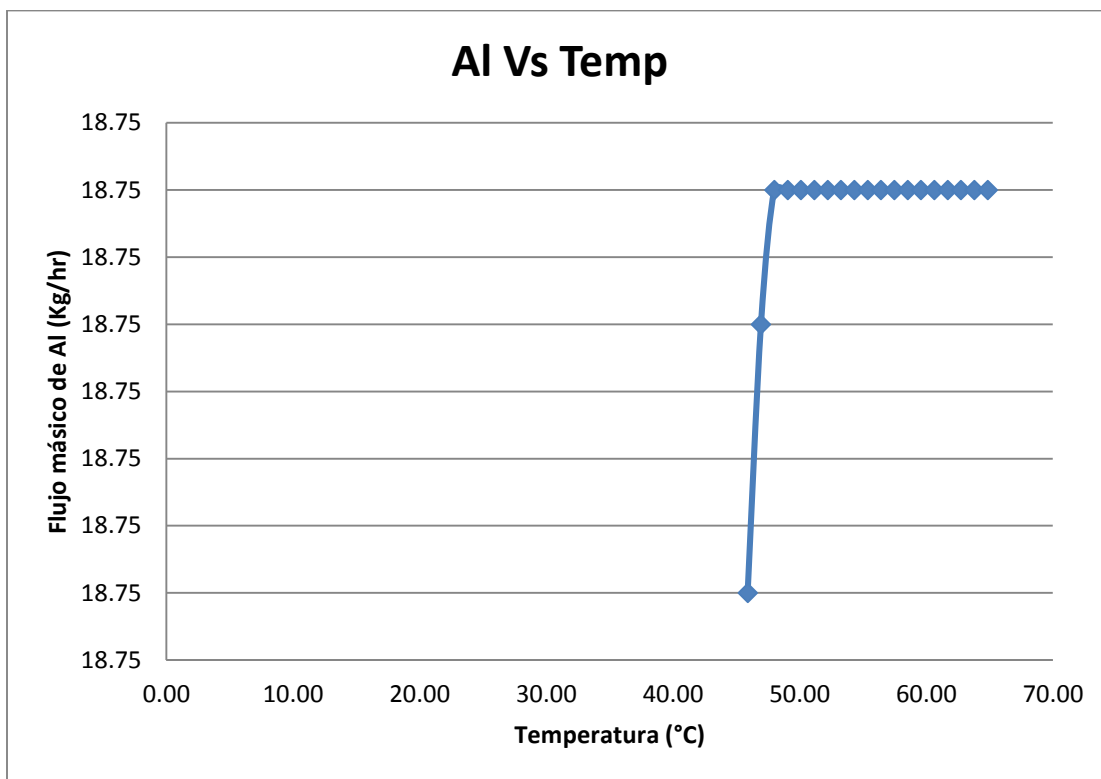


Figura 38: Aluminio Vs Temperatura

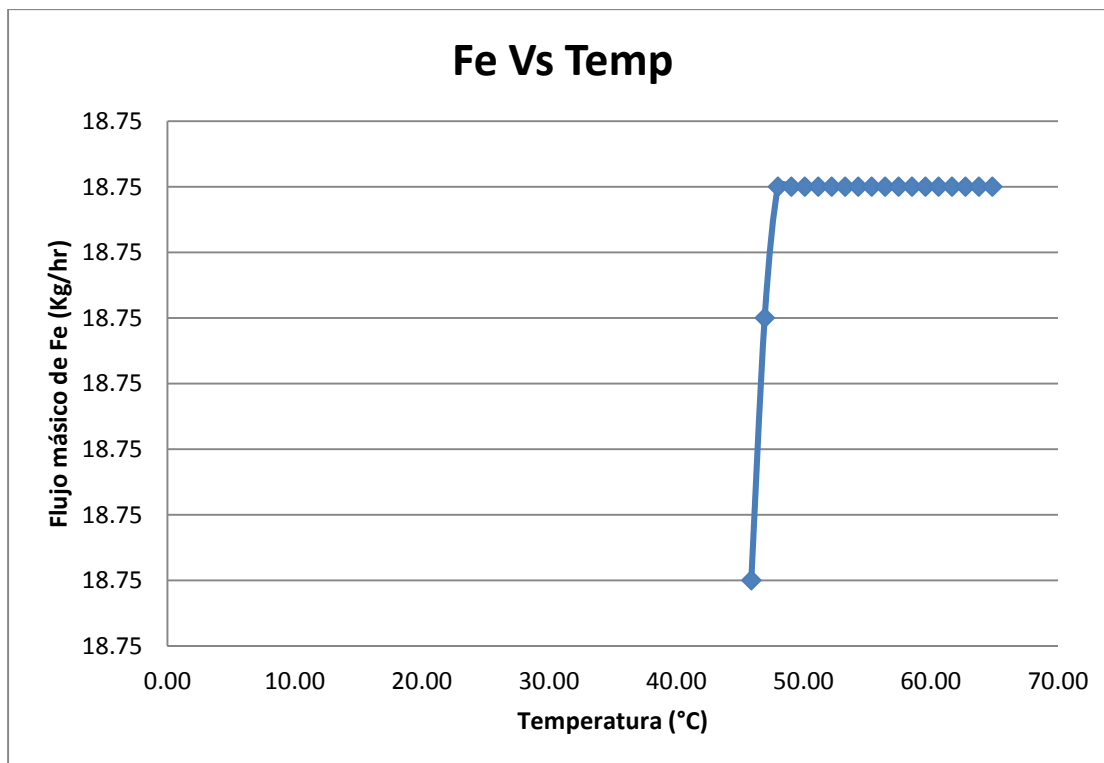


Figura39: Fierro Vs Temperatura



4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD



Como se puede apreciar en las **Figuras 38 y 39**, así como en los resultados de la **Tabla 12**, sólo se obtuvo flujo de salida para el Hierro y el aluminio, mismo caso que en el análisis de sensibilidad para el intercambiador de calor 1 en la versión de tres etapas, además en las gráficas se aprecia una diferencia de flujo de salida ínfimo al variar la temperatura, por lo cual en este caso elegimos una temperatura de 55 °C con el fin de no hacer una diferencia de temperatura tan grande entre una y otra etapa.



4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

4.5 Análisis de sensibilidad para el intercambiador de calor “HEATER2” para la versión de dos Etapas

En este análisis de sensibilidad, se definió la temperatura que es una variable de bloque del “HEATER1”, la cual se variará desde 328 hasta 358 K (45°C hasta 65°C). La **Tabla 13** muestra los resultados de este análisis de sensibilidad.

Tabla 13: Resultados del análisis de sensibilidad para la propuesta con dos etapas del intercambiador “Heater2”

Flujo en kg/h								
°C	CA	AL	BA	B	CU	FE	NI	MN
54.85	18.42	3.45E-10	18.69	18.69	18.69	2.77E-10	18.69	18.69
56.53	18.49	3.45E-10	18.69	18.69	18.69	2.77E-10	18.69	18.69
58.22	18.55	3.45E-10	18.69	18.69	18.69	2.77E-10	18.69	18.69
59.90	18.59	3.45E-10	18.69	18.69	18.69	2.77E-10	18.69	18.69
61.59	18.62	3.45E-10	18.69	18.69	18.69	2.77E-10	18.69	18.69
63.27	18.65	3.46E-10	18.69	18.69	18.69	2.77E-10	18.69	18.69
64.96	18.67	3.46E-10	18.69	18.69	18.69	2.77E-10	18.69	18.69
66.64	18.68	3.46E-10	18.69	18.69	18.69	2.77E-10	18.69	18.69
68.32	18.70	3.46E-10	18.69	18.69	18.69	2.77E-10	18.69	18.69
70.01	18.71	3.46E-10	18.69	18.69	18.69	2.77E-10	18.69	18.69
71.69	18.72	3.46E-10	18.69	18.69	18.69	2.78E-10	18.69	18.69
73.38	18.72	3.46E-10	18.69	18.69	18.69	2.78E-10	18.69	18.69
75.06	18.73	3.46E-10	18.69	18.69	18.69	2.78E-10	18.69	18.69
76.74	18.73	3.46E-10	18.68	18.68	18.68	2.78E-10	18.68	18.68
78.43	18.73	3.46E-10	18.68	18.68	18.68	2.78E-10	18.68	18.68
80.11	18.74	3.46E-10	18.68	18.68	18.68	2.78E-10	18.68	18.68
81.80	18.74	3.46E-10	18.68	18.68	18.68	2.78E-10	18.68	18.68
83.48	18.74	3.46E-10	18.68	18.68	18.68	2.78E-10	18.68	18.68
85.17	18.74	3.46E-10	18.68	18.68	18.68	2.78E-10	18.68	18.68
86.85	18.74	3.46E-10	18.68	18.68	18.68	2.78E-10	18.68	18.68
85.00	18.74	3.46E-10	18.68	18.68	18.68	2.78E-10	18.68	18.68



4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD



Para entenderlo un poco mejor estos resultados, estos se grafican en las Figuras 40 a la 45.

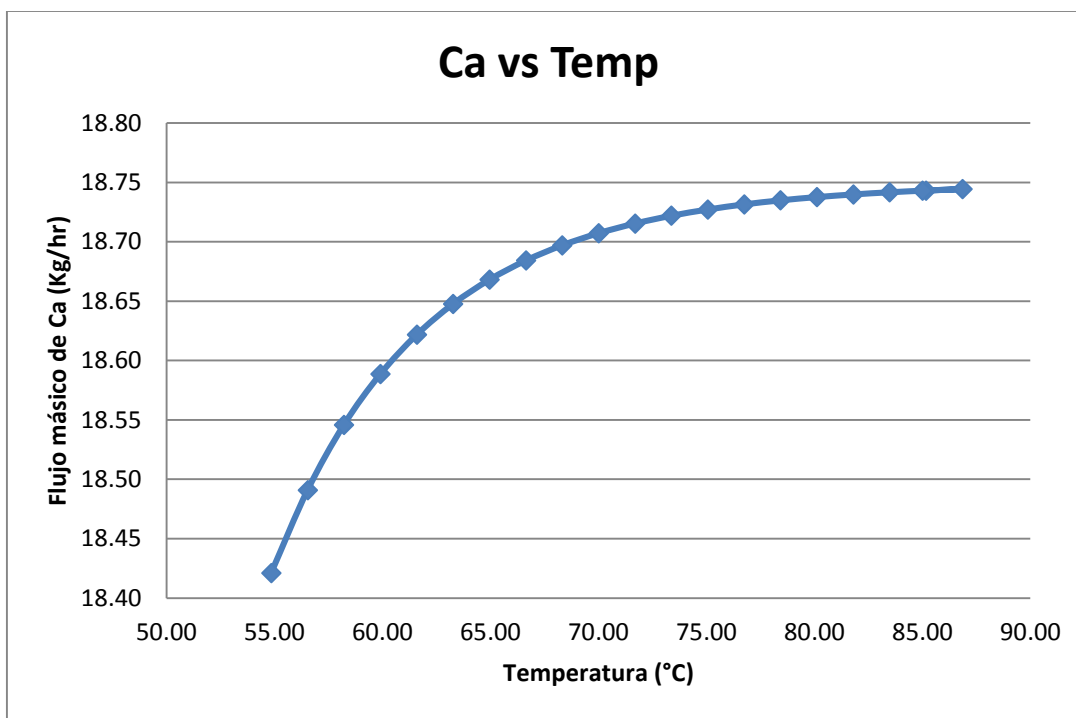


Figura 40: Calcio vs Temperatura

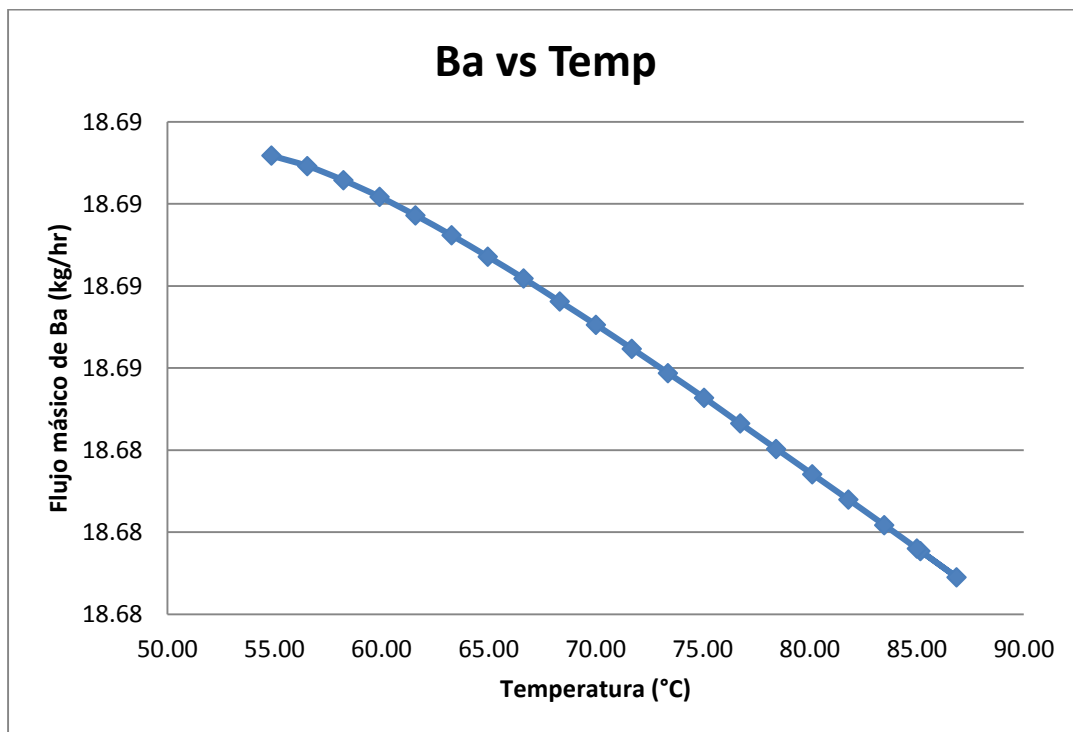


Figura 41: Bario Vs Temperatura



4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

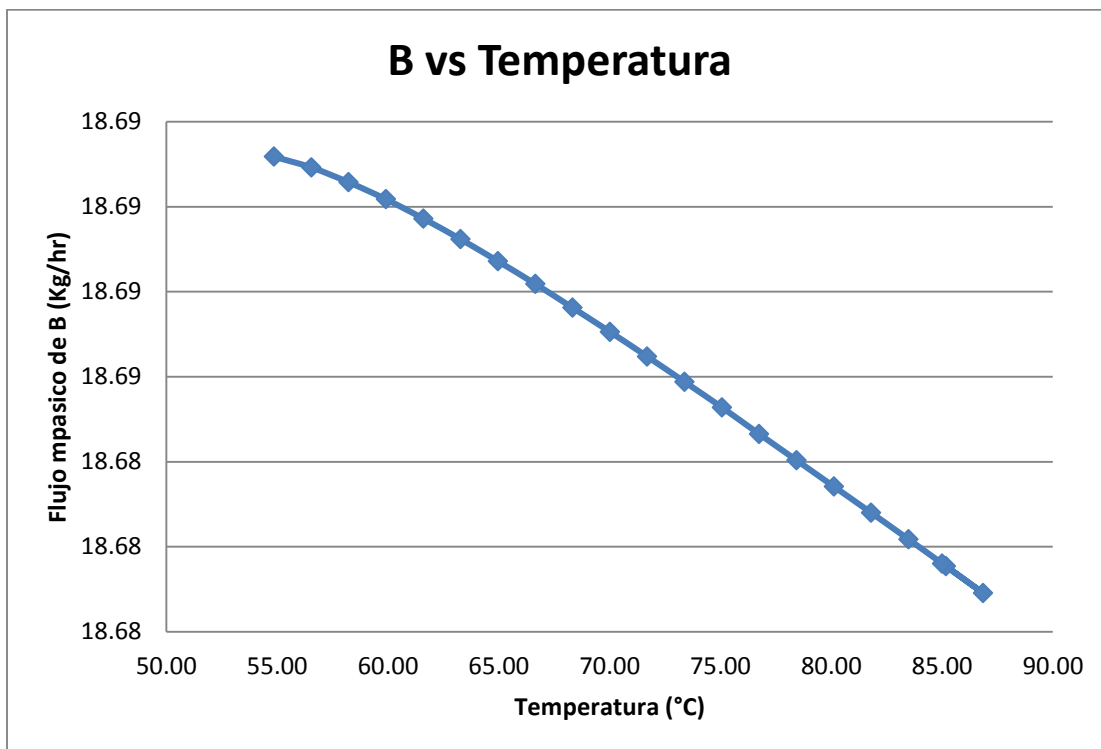


Figura 42: Boro vs Temperatura

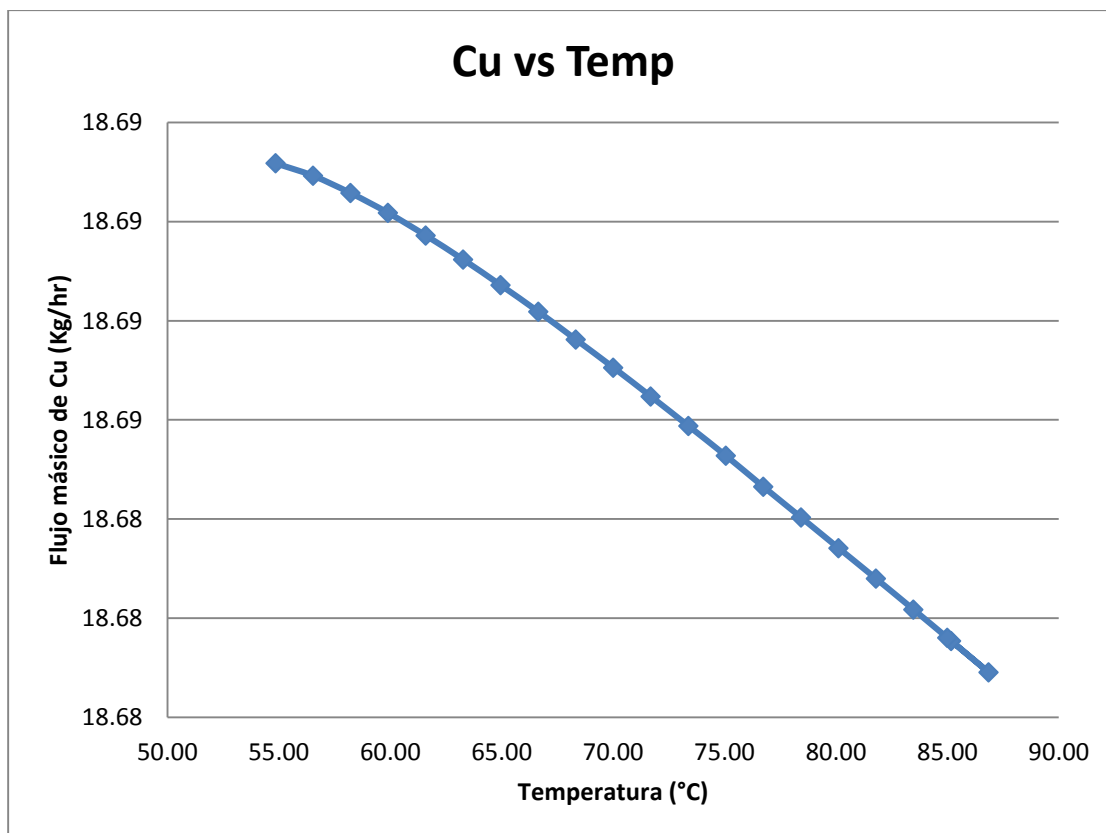


Figura 43: Cobre vs Temperatura



4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

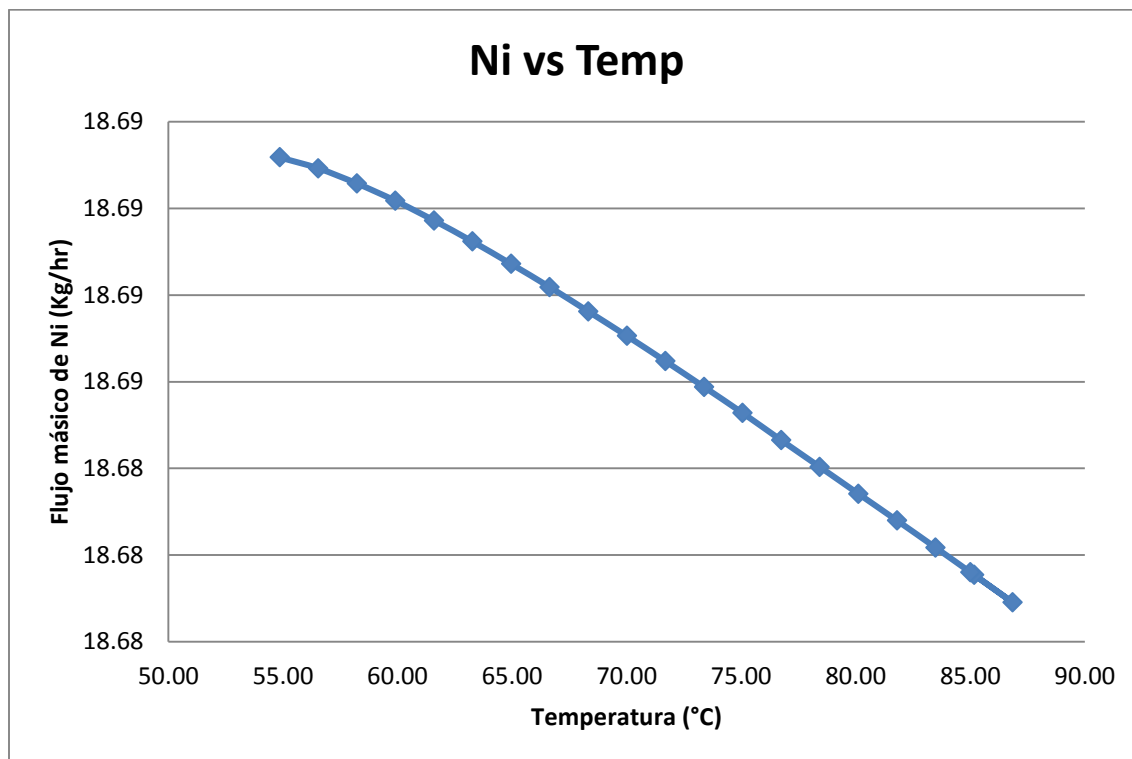


Figura 44: Níquel Vs Temperatura

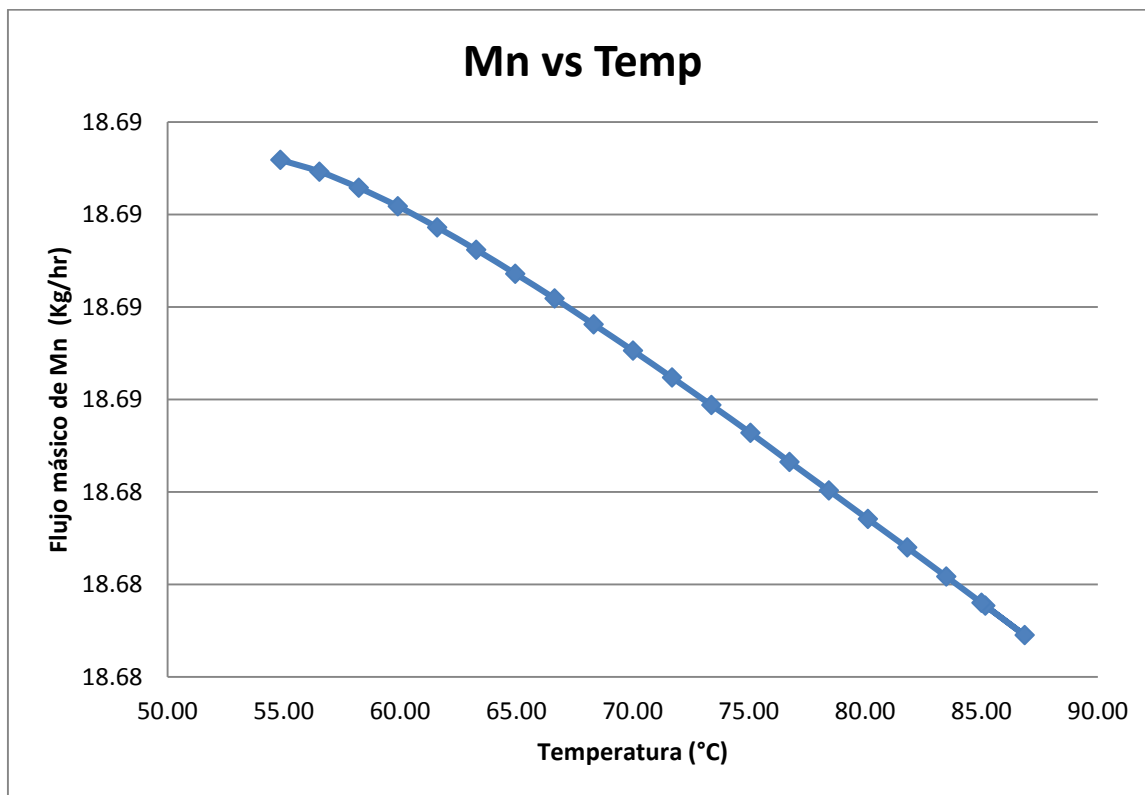


Figura 45: Manganeso Vs Temperatura



4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD



La elección de la temperatura de este intercambiador fue de 85°C. Esta elección se hizo con base en los resultados del flujo de salida del calcio. Como se muestra en la **Figura 40**, el aumento del flujo de salida del calcio se da con el aumento de la temperatura. Este aumento es más significativo que la disminución del flujo de todos los demás elementos mostrados de la **Figura 41 hasta la 45**, además de que los efectos dañinos causados por el Calcio en los sistemas de lubricación (incrustación y corrosión, por ejemplo), son más notorios y potentes que los provocados por los demás elementos metálicos presentes en la mezcla de aceite lubricante usado.



4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

4.6 Análisis de sensibilidad para la entrada de MEK en la alimentación fresca

Este caso es de vital importancia, ya que la pregunta que uno particularmente se hace en este tipo de simulaciones es: “Si meto más de mi solvente ¿Realmente saldrá más de los componentes que quiero sacar?” Con base en esta pregunta se formula una manera de hacer un análisis de sensibilidad, que es analizando la entrada fresca de MEK y variándola en un rango de 5 a 50 kg/h, contra la salida de impurezas en la línea “LODO2”. Este análisis sólo se hizo en la versión de dos etapas, para conocer el comportamiento de la salida de impurezas. Los resultados de este análisis de sensibilidad se muestran en la **Tabla 14**.

Tabla 14: Resultados de análisis de sensibilidad para la entrada de MEK en la alimentación fresca

MASSFLOW	Flujo másico kg/h						
kg/h	BA	B	Ca	Cu	Fe	Ni	Mn
5	18.68	18.68	18.74	18.68	2.78E-10	18.68	18.68
10	18.68	18.68	18.74	18.68	2.89E-10	18.68	18.68
15	18.68	18.68	18.74	18.68	3.01E-10	18.68	18.68
20	18.67	18.67	18.74	18.67	3.13E-10	18.67	18.67
25	18.67	18.67	18.74	18.67	3.22E-10	18.67	18.67
30	18.67	18.67	18.74	18.67	3.30E-10	18.67	18.67
35	18.67	18.67	18.74	18.67	3.38E-10	18.67	18.67
40	18.67	18.67	18.74	18.67	3.46E-10	18.67	18.67
45	18.67	18.67	18.74	18.67	3.54E-10	18.67	18.67
50	18.67	18.67	18.74	18.67	3.63E-10	18.67	18.67



4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD



Para visualizar mejor los resultados, se muestran en las **Figuras 46 a 52**.

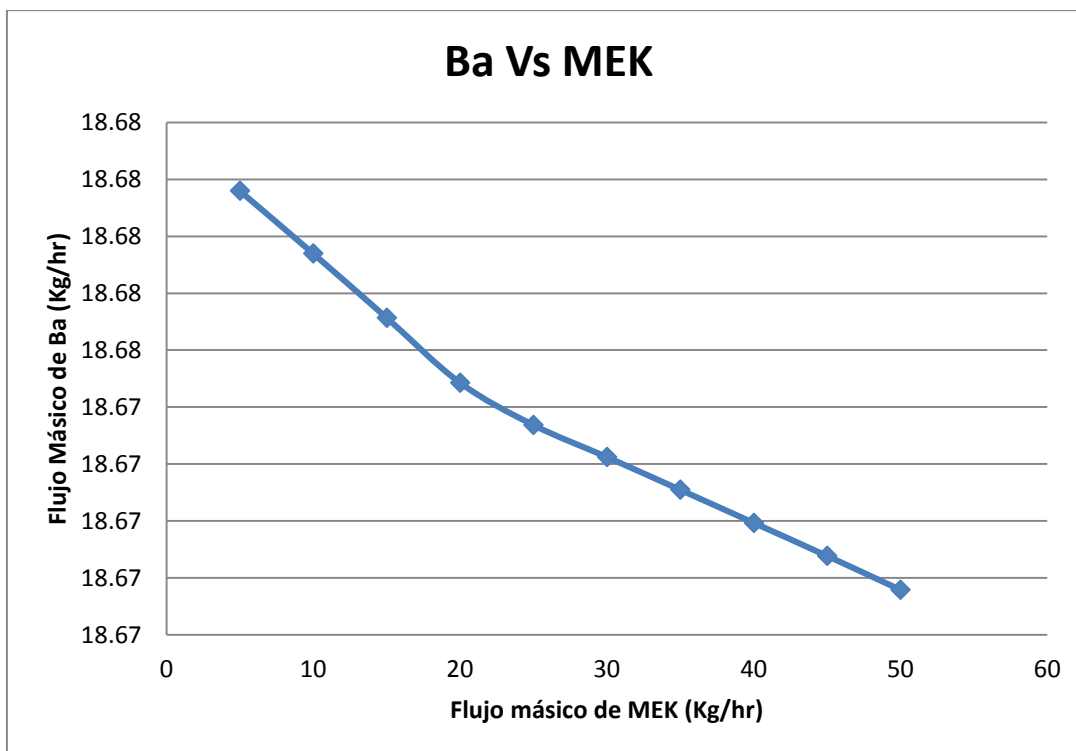


Figura46: Bario Vs MEK

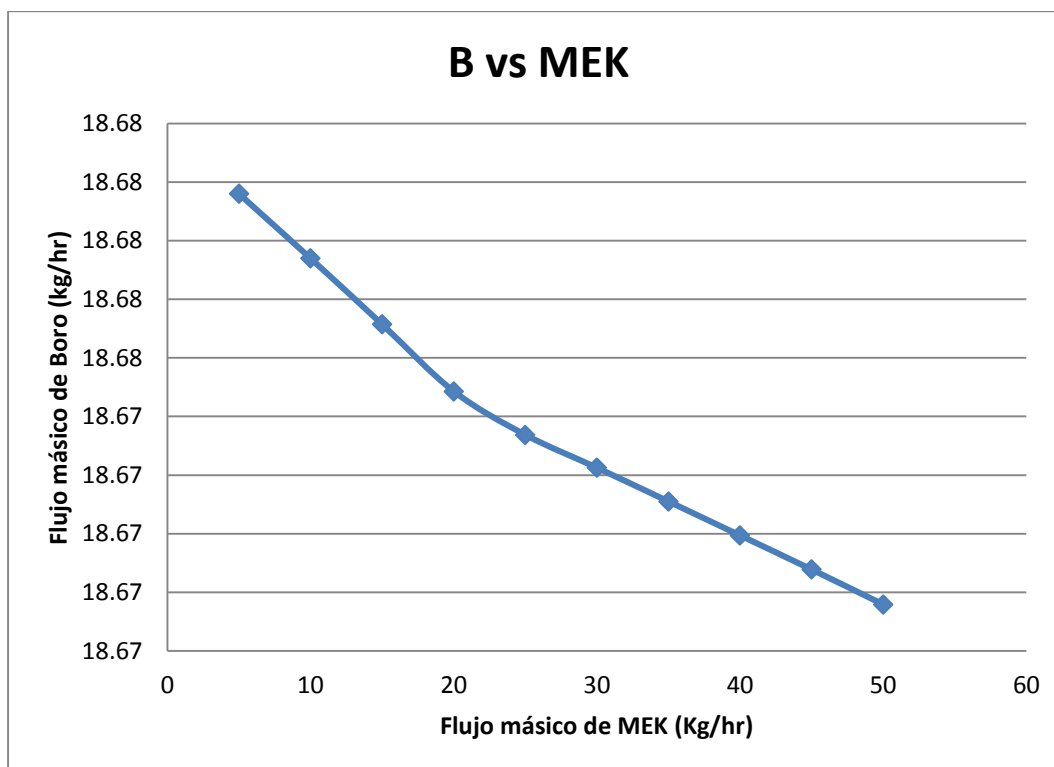


Figura 47: Boro vs MEK



4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

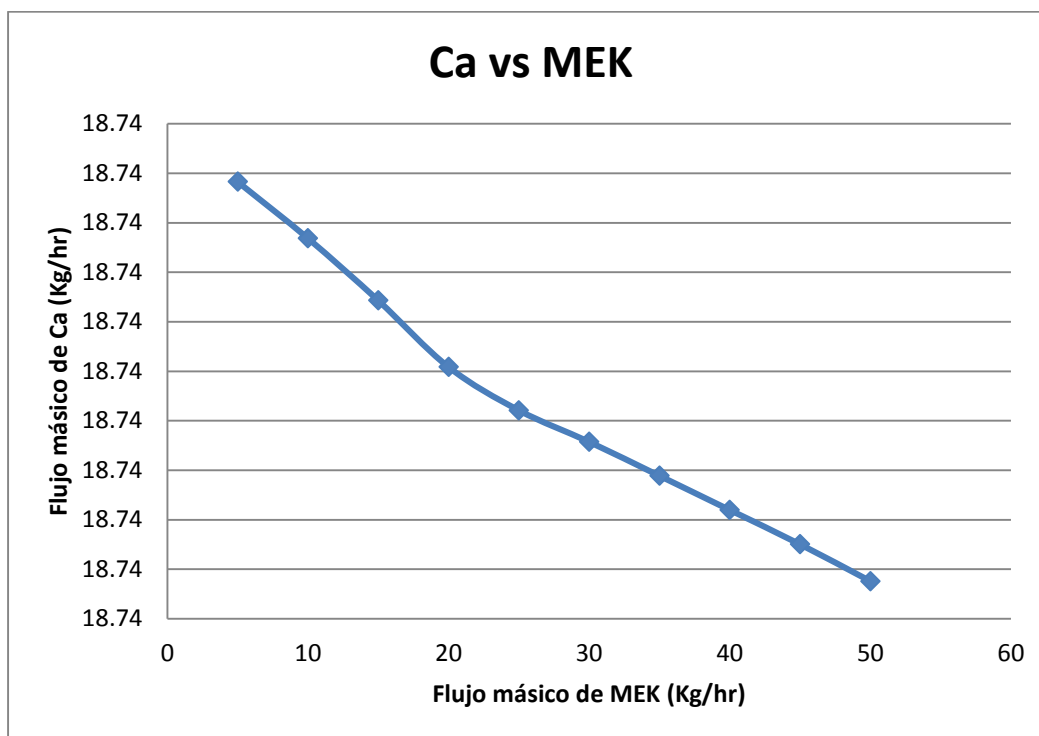


Figura 48: Calcio Vs MEK

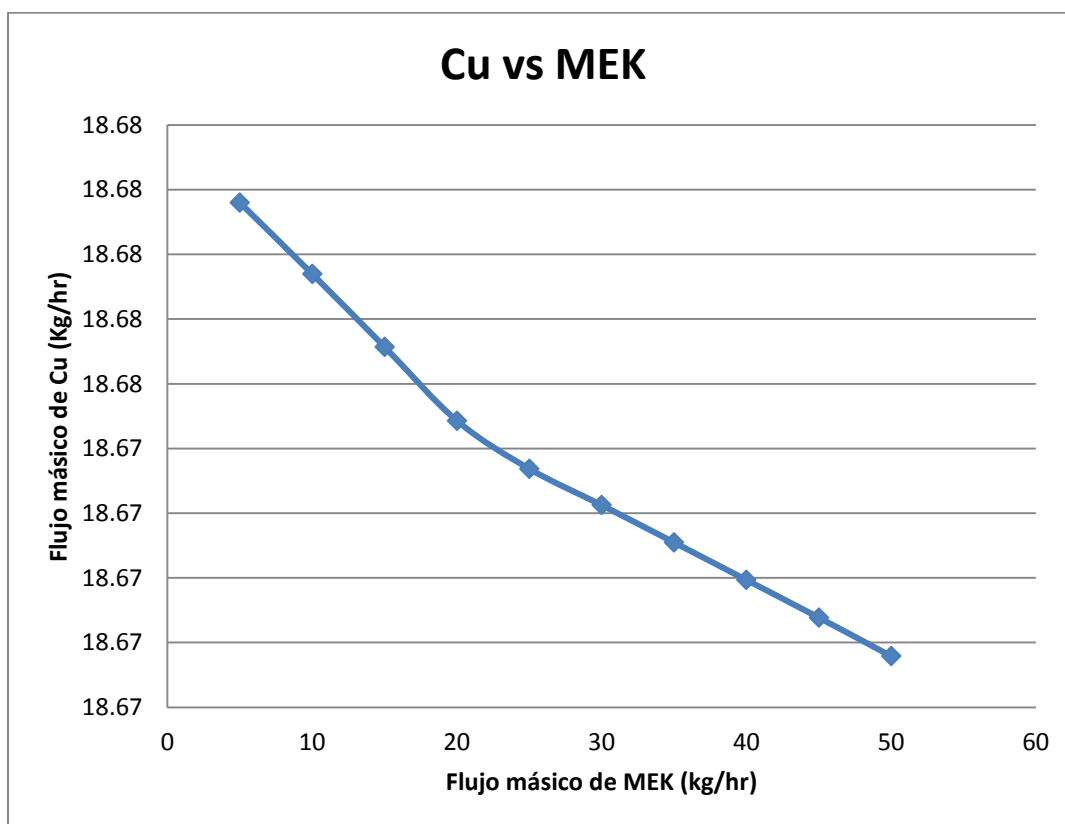


Figura 49: Cobre Vs MEK



4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

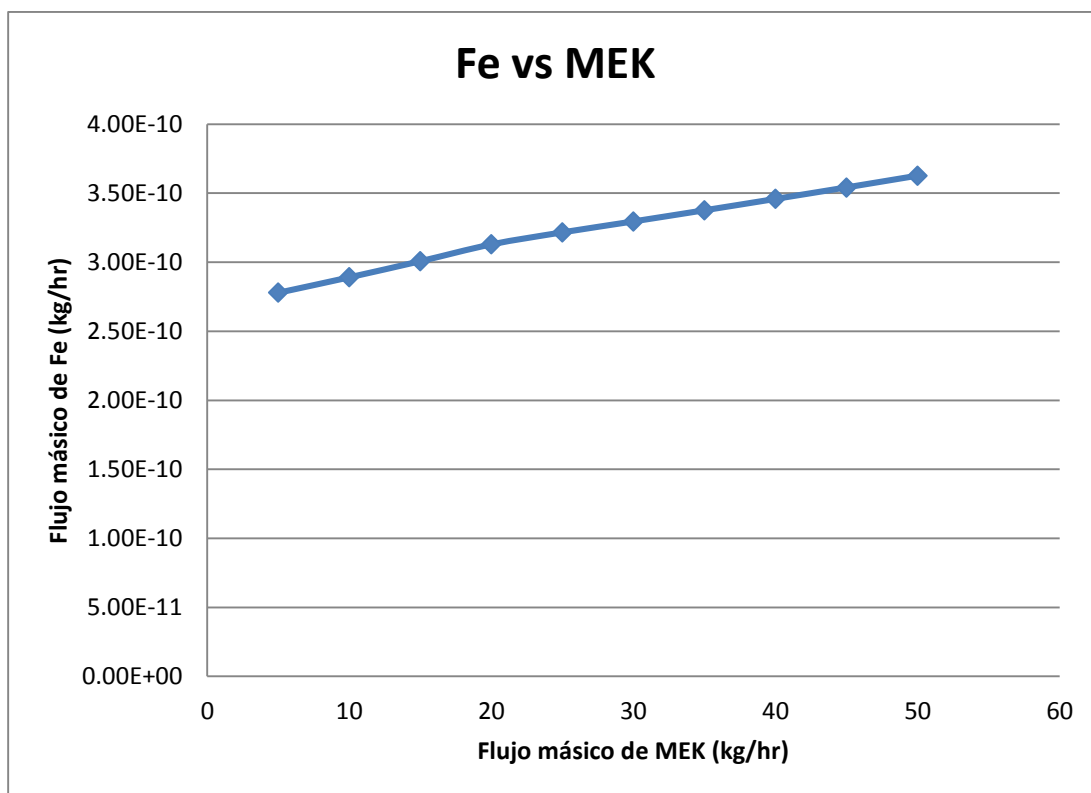


Figura 50: Fierro Vs MEK

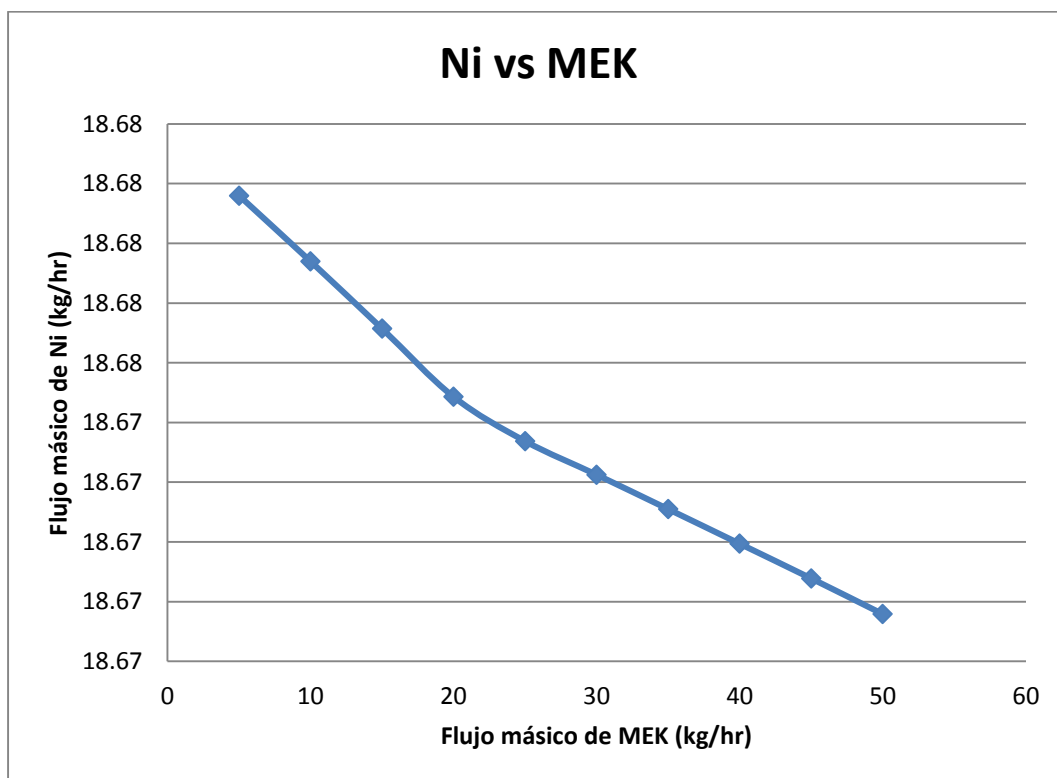


Figura51: Níquel Vs MEK



4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

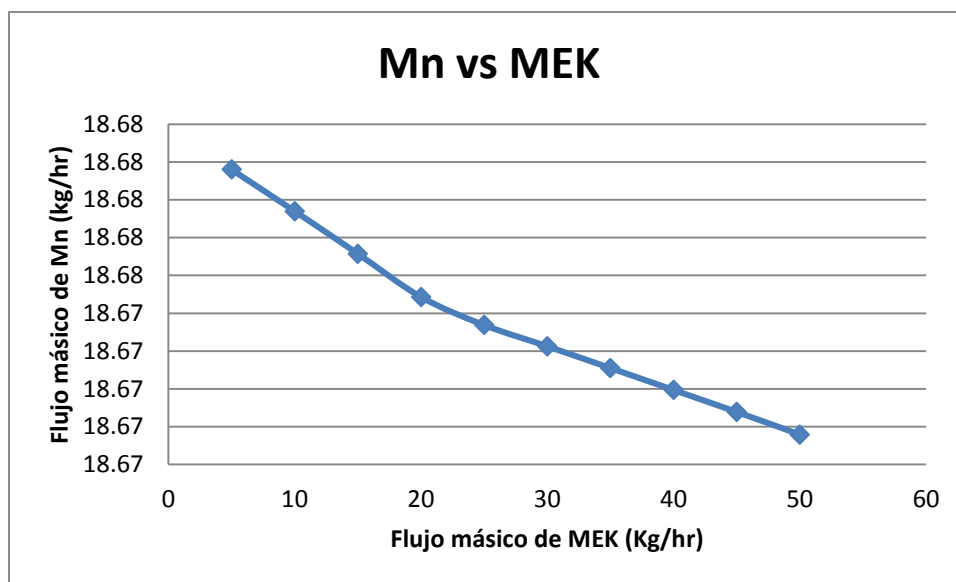


Figura 52: Manganeso vs MEK

Como observa en las Figuras **de la 48 a la 52**, con excepción de la **Figura 50**, hay una tendencia a la baja en la salida de impurezas en la corriente “LODO2”, a mayor uso de MEK en la corriente fresca de alimentación a los decantadores, por la tanto, la utilización mínima de MEK en la entrada es la idónea para el modelo. Con esto se minimiza la utilización de recursos materiales y monetarios dado el costo del MEK y su importancia en un análisis de factibilidad económica.

4.7 Análisis de sensibilidad de las etapas de la columna atmosférica

Este análisis de sensibilidad, se hizo para conocer el número de etapas óptimas en la columna de destilación atmosférica propuesta para la recuperación de MEK. Se realizó variando el número de etapas con respecto a la recuperación de MEK en el flujo de destilado. Los resultados son los mostrados en la **Tabla 15**.



4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD



Tabla 15: Resultados de análisis de sensibilidad del número de etapas de la columna atmosférica

N° etapas	Flujo MEK (kg/h)
1	9.19
1.5	9.19
2	9.19
2.5	9.19
3	9.19

Para entenderlo mejor, los resultados se muestran en la **Figura 53**.

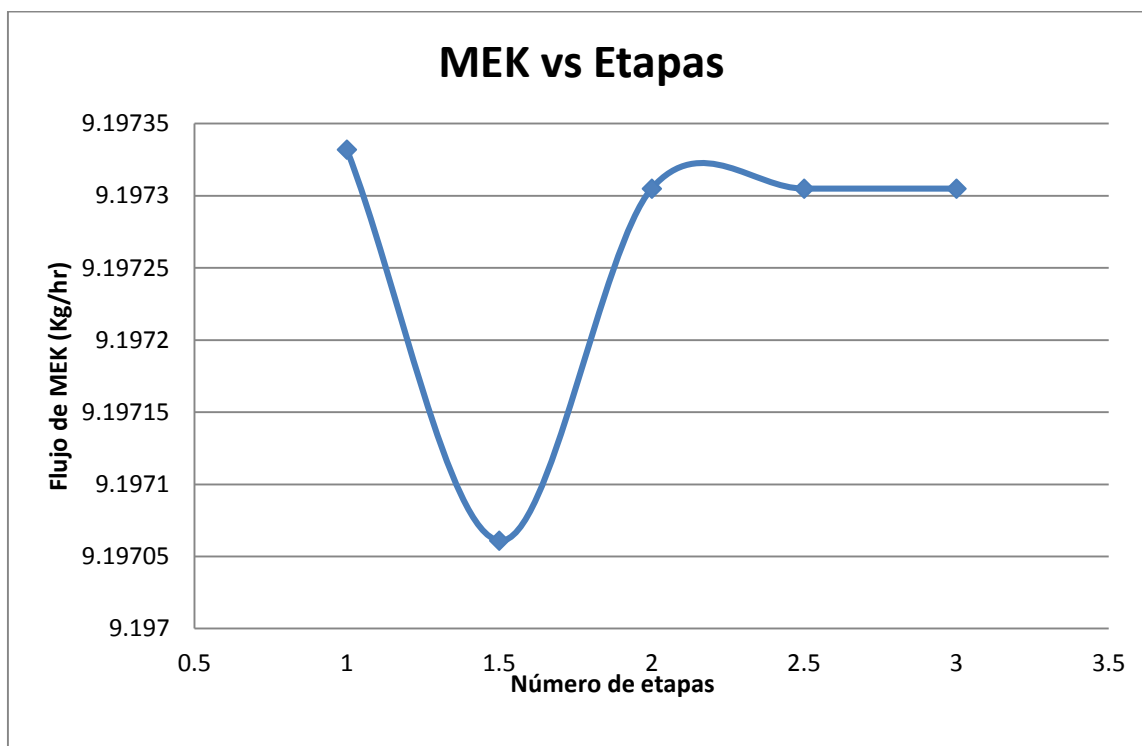


Figura 53: Flujo másico de MEK Vs N° de etapas de la columna atmosférica

Como se puede ver en la **Figura 53**, las etapas dos y tres conservan esencialmente la misma salida de MEK en el flujo de destilado. Por lo cual, la elegida será la columna de dos etapas pensando en la optimización de costos de equipos así como de recursos para su operación.



4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

4.8 Análisis de sensibilidad para las etapas de la columna de destilación a vacío

Así como el anterior, éste análisis de sensibilidad se hizo para conocer el número de etapas existentes en la columna de destilación a vacío propuesta para la recuperación de MEK. Se hizo variando el número de etapas con respecto a la recuperación de MEK en el flujo de destilado. Los resultados se muestran en la **Tabla 16** y en la **Figura 54**.

Tabla 16: Análisis de sensibilidad del número de etapas de la columna de destilación a vacío

Etapas	Flujo (kg/h)
2	2.21
2.5	2.61
3	2.61
3.5	2.61
4	2.61

Para entender mejor, los resultados se ilustran en la **Figura 54**.

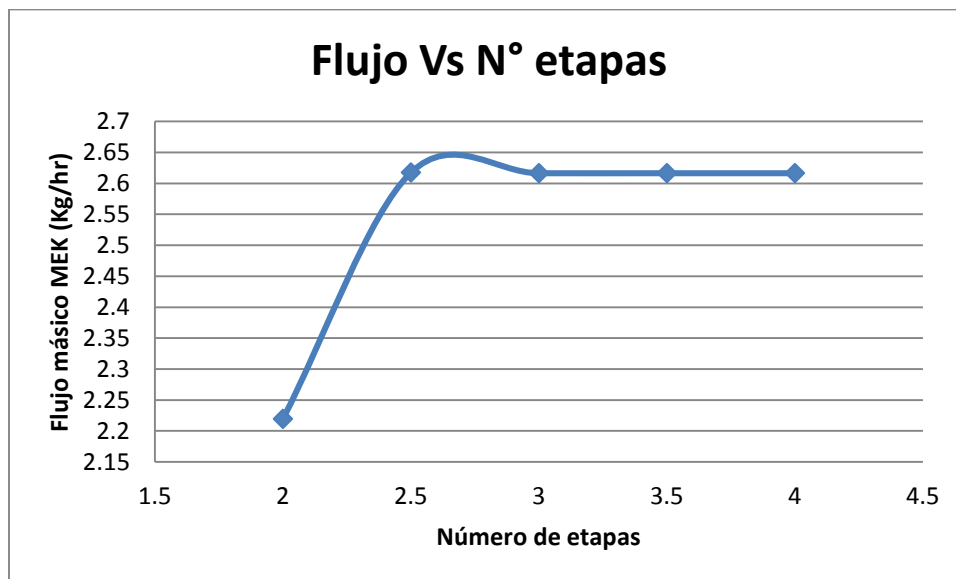


Figura 54: Flujo másico de MEK Vs N° Etapas de la columna a vacío

Como se puede observar las etapas tres y cuatro conservan esencialmente la misma salida de MEK en el flujo de destilado. Por lo cual, la elegida será la columna de tres etapas para la optimización de costos en equipo y operación.



Capítulo 5. Análisis y discusión de resultados

Al hacer los análisis de sensibilidad, se puede apreciar que las condiciones de operación se podían mejorar en algunos casos. Por ejemplo, en la entrada de MEK en la corriente fresca “SOLV”. En este apartado, se notó que no necesariamente la adición de más solvente significa que la separación de impurezas será mejor. Esto, aunado a los costos de solventes y operación del proceso, hace que la restricción de solvente sea lo adecuado.

Algunos otros detalles optimizados gracias a los análisis de sensibilidad fueron los siguientes:

- La temperatura del intercambiador de calor tres en la versión con tres etapas no podía ser mayor a 80°C porque la simulación marcaba la corriente de salida “LODO3” como nula.
- Las etapas para la columna atmosférica y la columna a vacío, se determinaron en dos y en tres respectivamente. Esto nos dio una optimización en uso de equipo pero nos indica que en términos reales se podría no hablar de una columna de destilación, si no de un sistema de evaporación. Se llegó a esta conclusión, gracias a que los sistemas de destilación más comunes utilizan una gran estructura para lograr una separación deseada.



CAPITULO 5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Para un mejor análisis de los resultados, se muestran las corrientes de salida de las dos simulaciones en las **tablas 17 y 18**.

Tabla 17: Resultados de la simulación con tres etapas

Mass Flow kg/h	F	SOLV	LODO1	REFIN1	SOLVR1	LODO2	REFIN2	SOLVR2	LODO3	REFIN3	DEST1	PRODUCT1	DEST2	PRODUCT2
C28H58	425.00	0	0	425.00	0	3.75E-06	425.00	0	0	425.00	0.001	425.00	2.61E-09	425.00
C30H62	425.00	0	0	425.00	0	6.34E-07	425.00	0	0	425.00	0.000	425.00	2.66E-10	425.00
AL	18.75	0	18.75	3.53E-10	0	3.53E-10	0	0	0	0	0	0	0	0
BA	18.75	0	0	18.75	0	18.69	0.064	0	0	0.06	3.44E-08	0.064	1.81E-15	0.064
B	18.75	0	0	18.75	0	18.69	0.064	0	0	0.06	3.44E-08	0.064	1.81E-15	0.064
CA	18.75	0	0	18.75	0	18.69	0.056	0	0	0.06	4.22E-10	0.056	4.09E-19	0.056
CU	18.75	0	0	18.75	0	18.69	0.064	0	0	0.06	3.44E-08	0.064	1.81E-15	0.064
FE	18.75	0	18.75	2.84E-10	0	2.84E-10	0	0	0	0	0	0	0	0
NI	18.75	0	0	18.75	0	18.69	0.064	0	0	0.06	3.44E-08	0.06	1.81E-15	0.064
MN	18.75	0	0	18.75	0	18.69	0.064	0	0	0.06	3.44E-08	0.06	1.81E-15	0.064
METHY-01	0	4.99	0	20.00	1.99	12.66	19.336	1.99	0	41.33	19.998	21.34	19.99	1.337

Tabla 18: Resultados de la simulación con dos etapas

Mass Flow kg/hr	F	SOLV	SOLVR1	LODO1	REFIN1	LODO2	REFIN2	SOLVR2	LODO3	REFIN3	PRODUCT1	DEST1	DEST2	PRODUCT2
C28H58	425	0	0	0	426.66	3.39E-06	428.32	0	0	431.64	431.62	0.025	6.617	425
C30H62	425.00	0	0	0	425.71	5.64E-07	426.41	0	0	427.82	427.81	0.011	2.810	425
AL	18.75	0	0	18.7500131	3.42E-10	3.42E-10	0	0	0	0	0	0	0	0
BA	18.75	0	0	0	18.75	18.6877627	0.062	0	0	0.062	0.062	4.40E-07	1.00E-05	0.062
B	18.75	0	0	0	18.75	18.6877627	0.062	0	0	0.062	0.062	4.40E-07	1.00E-05	0.062
CA	18.75	0	0	0	18.75	18.6975537	0.052	0	0	0.052	0.052	1.15E-08	1.89E-07	0.052
CU	18.75	0	0	0	18.75	18.6877627	0.062	0	0	0.062	0.062	4.40E-07	1.00E-05	0.062
FE	18.75	0	0	18.7500131	2.75E-10	2.75E-10	0	0	0	0	0	0	0	0
NI	18.75	0	0	0	18.75	18.6877627	0.062	0	0	0.062	0.062	4.40E-07	1.00E-05	0.062
MN	18.75	0	0	0	18.75	18.6877627	0.062	0	0	0.062	0.062	4.40E-07	1.00E-05	0.062
METHY-01	0	5	2	0	12.63	8.8427323	13.425	2	0	30.693	10.73	19.96	10.57	0.157



CAPITULO 5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS



Empezando con el análisis, en la **Tabla 17** se muestra que la columna “Lodo3” no presenta ninguna salida, esto es porque a las condiciones que se programan en simulación no se permiten la salida teórica de nada por esa corriente. Esto lleva a pensar, en lo poco indispensable que es utilizar una tercera etapa.

A la par, en la misma **Tabla 17**, en la corriente que entra al tercer decantador “SOLVR1” solo se añade 1.99 Kg/hr de MEK, que es una adición controlada que nivela la presencia de esta perdida por la corriente “LODO2” que va hasta los 12.66 kg/hr, en comparación con la salida de la corriente con el mismo nombre pero en la versión de dos etapas, que ronda los 6.98kg/hr de MEK mostrado en la tabla 18.

Otra de las cosas a resaltar, es la minimización de la salida de MEK por la corriente “Product2” en las dos versiones simuladas. En la **Tabla 17**, se aprecia una salida de 1.337 Kg/hr de MEK mientras que en la **Tabla 18** se muestran 0.017 Kg/Hr.



6. Conclusiones

En este trabajo se presentan dos propuestas de simulación para la recuperación del aceite lubricante usado, donde se involucra una serie de análisis de sensibilidad que permiten determinar las mejores condiciones de operación, así como su factibilidad técnica para una futura puesta en marcha de un proyecto de tales dimensiones.

Los resultados muestran claramente que bajo las condiciones de simulación, la utilización de dos etapas de extracción es la más adecuada por las razones que se enlistan a continuación:

- La minimización en el uso de equipos para el refinado del aceite lubricante usado.
- La minimización en uso de energéticos (Electricidad, Vapor, etc.).
- La minimización de sistemas de control para equipos.
- Menos necesidad de mantenimiento de equipos.
- La minimización de producción de lodos residuales.
- La minimización de impurezas en la salida de producto.
- Menos desperdicio de MEK en salidas residuales y de producto terminado.
- La minimización de costos de operación.

Con esto, se logró dar una propuesta óptima en un equilibrio ambiental, social y económica, a la dada por Kheireddine et al. (2004) en su artículo antes mencionado.



7. Bibliografía

- Elección de solvente estudiada en el artículo “A holistic Approach for the optimization of the used lubricating oils regeneration process” De Houssein A. Kheireddine, José María Porce Ortega, Nimir O. Elbashir y Mahmoud M. El Halwagi.
- “Reproceso y comercialización de aceite lubricante usado” Universidad de Cema. Nov. 2012.
- “Plan de manejo para la recepción de aceite lubricante automotriz usado en estaciones de servicio” Gobierno del D.F. y Grupo Plus. 2005
- U.S. E.P.A. United States Environmental protection agency.
- “Estudio experimental para la regeneración de aceites automotrices usados mediante la extracción supercrítica” Andrés F. Paz Menéndez. Instituto Politécnico Nacional Tesis doctoral. Agosto 2004.
- <http://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/octacosane#section=Physical-Description> (Propiedades octacosano)
- <http://www.chemspider.com/Chemical-Structure.12018.html> (propiedades Triacosano)
- Ley general de para la prevención y gestión integral de los residuos.
- <http://www.recycle-oil.com.mx/plantas.html>
- http://www.inegi.org.mx/lib/olap/consulta/general_ver4/MDXQueryDatos.asp?#Regreso&c=13158 Vehículos de motor registrados en circulación 2012.
- <http://www.bvsde.paho.org/bvsare/e/lubricantes-vfinal.pdf> “Revisión Y Análisis De Las Experiencias De Argentina, Brasil, Colombia Ecuador Y México Respecto A Los Cinco Elementos Claves Para El Manejo Ambiental De Lubricantes Usados” Junio 2002.
- Technical team of Everest transmission, 2005. Lube Oil Purification.Everest Transmission New Delhi, India. Retrieved January 15, 2011. From
- <http://www.everestblowers.com/technical-articles/lube-oil-purification.pdf>