



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción**

**“Aumento de capacidad de almacenamiento de soda mediante
la aplicación de un modelo de optimización.”**

PROYECTO DE TITULACIÓN

Previo a la obtención del Título de:

MAGÍSTER EN MEJORAMIENTO DE PROCESOS

Presentada por:

Nicole Andrea Erazo Wellington

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2025

DEDICATORIA

Dedico este trabajo y esfuerzo realizado durante varios meses a mis padres, James y Ruth, quienes siempre me han brindado apoyo y siempre me han respaldado.

A mis hermanas, Nathaly y Justine, quienes siempre me recuerdan el valor de la resiliencia y la unión a pesar de las adversidades.

TRIBUNAL DE TITULACIÓN

María Laura Retamales G., MSc.

Profesor de Materia

Cinthia Perez S., Ph.D.

Tutor de proyecto

DECLARACIÓN EXPRESA

Yo, Nicole Andrea Erazo Wellington acuerdo y reconozco que: La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores. El o los estudiantes deberán procurar en cualquier caso de cesión de sus derechos patrimoniales incluir una cláusula en la cesión que proteja la vigencia de la licencia aquí concedida a la ESPOL.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, secreto empresarial, derechos patrimoniales de autor sobre software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí/nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me/nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi/nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique al/los autor/es que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 07 de marzo del 2025.

Nicole Erazo Wellington

RESUMEN

El presente proyecto consistió en el diseño y aplicación de un modelo de optimización para el aumento de capacidad de almacenamiento de Soda, obteniendo una distribución de asignación de sustancias químicas en los distintos tanques de almacenamiento disponibles.

La empresa objeto de estudio se dedica a la producción y comercialización de químicos para diversos sectores industriales. Sus principales clientes son industrias de los sectores de alimentos, flexografía, acuicultura, pesca, agrícola, tratamiento de aguas, entre otros. El proyecto se realizó en la Planta de Solventes, una de las tres plantas de la empresa, donde se realizan despachos a graneles y envasados de diversos solventes y soda cáustica líquida.

El objetivo del proyecto es determinar una nueva distribución y asignación de productos químicos en los diversos tanques de almacenamiento disponibles, mediante la aplicación de un modelo de optimización, para el aumento de la capacidad de almacenamiento de soda caustica líquida.

Lo primero que se realizó fue una recolección de información para entender el proceso. Luego se realizó la formulación del modelo de optimización, identificando variables, relaciones, restricciones y función objetivo. Después se resolvió el problema modelado mediante el complemento OpenSolver de Microsoft Excel, donde se obtuvo una solución que brinda un espacio de almacenamiento para soda de 2632 TN.

Posteriormente, se realizó un análisis de sensibilidad en el que se estudió el comportamiento de la solución obtenida frente a cambios en la demanda de otras sustancias y cambios máximos permitidos por la empresa estructuralmente.

También, se realizó una comparación de la capacidad de almacenamiento actual vs la final con la nueva distribución propuesta para la evaluación del éxito del proyecto. Teniendo en cuenta que se tenía como meta obtener un incremento de al menos el 50%, se superó dicha meta planteada con un 53.02% de aumento de almacenamiento.

Finalmente, se realizó un flujo de caja de la distribución propuesta para determinar el impacto financiero del proyecto, donde se determinó que el proyecto es factible y rentable para la empresa.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1	1
1. GENERALIDADES	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Declaración del problema	2
1.3 Objetivos	4
1.4 Descripción de la Metodología	4
1.5 Resultados esperados	6
CAPÍTULO 2	7
2. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA	7
2.1 Recolección de datos	7
2.2 Variables de decisión	9
2.3 Restricciones individuales para variables	9
2.4 Restricciones del modelo	9
2.5 Función objetivo y modelo completo	15
2.6 Aplicación del modelo	17
2.7 Validación con el cliente	20
CAPÍTULO 3	23
3. EVALUACIÓN DE RESULTADOS	23
3.1 Análisis de Sensibilidad	23
3.2 Verificación del cumplimiento de la meta	24
3.3 Impacto Financiero	25
CAPÍTULO 4	29
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	29
4.1 Conclusiones	29
4.2 Recomendaciones	29
BIBLIOGRAFÍA	31

CAPÍTULO 1

1. GENERALIDADES

1.1 Antecedentes

La empresa en estudio se especializa en la producción y comercialización de químicos para diversos sectores industriales. Sus principales clientes son de los sectores de alimentos, flexografía, acuicultura, pesca, agrícola, tratamiento de aguas, entre otros. La rama de la empresa que opera en Guayaquil posee tres plantas productivas. El presente proyecto se enfocará en la Planta de Solventes, donde se realizan despachos a graneles y envasados de diversos solventes y soda cáustica líquida. En dicha planta se cuenta con diversos tanques de almacenamiento, los cuales tienen distintas capacidades, como se detalla en la Tabla 1.

Tabla 1
Capacidades de tanques de almacenamiento en Planta Solventes

TANQUE#	CAPACIDAD [m ³]
1	38
3	16
4	16
6	56
7	32
8	37
9	37
10	34
11	16
12	25
13	29
15	185
16	182
17	182
18	101
19	233
20	133
21	133
S1	250
S2	145
S3	198
S6	270
S7	270

Fuente: Autor

En esta planta se almacenan las siguientes sustancias: xileno, metanol, etanol, tolueno, propanol, NPA, acetato de etilo, rubber solvent y soda líquida. De las sustancias mencionadas, la soda líquida es la que mayor consumo tiene por lo que es la que mayor capacidad de almacenamiento requiere. Es importante recalcar que la soda líquida es un producto que se adquiere únicamente por importación por vía marítima, lo que significa que su tiempo de reposición es elevado, e inclusive se puede retrasar por inconvenientes con las navieras o eventos climáticos. Este producto de importación se almacena en la planta Solventes y en un almacén alquilado externo.

La necesidad de aumento de capacidad de almacenamiento surge debido al aumento en quiebres de inventario que se han dado a lo largo del presente año, ocasionados ya sea, por un aumento de la demanda de soda o por atrasos en las importaciones. Dichos quiebres de inventario representan pérdidas en ventas y una afectación en la imagen de la empresa frente a sus clientes al no poder cumplir con su promesa de valor. Hasta la actualidad, en el año 2024 se han dado 5 quiebres de inventario; mientras que en el año 2023 se tuvo uno; y en el 2022, se suscitaron dos.

Por lo antes expuesto, la empresa desea realizar una reasignación de almacenamiento de sustancias en los tanques de almacenamiento disponibles, de tal manera que se maximice la capacidad de almacenamiento de la soda líquida, que actualmente es de 1720 TN (1133 m³), y se aproveche de mejor manera los tanques disponibles, teniendo en cuenta las necesidades de almacenamiento de cada sustancia.

1.2 Declaración del problema

El consumo promedio mensual de soda cáustica líquida ha tenido un incremento del 28.69% con respecto al último año, en la planta de producción de químicos, ocasionando quiebres de inventario al no poder reabastecerse con stock en el tiempo necesario, generando atrasos o incumplimiento en entregas a clientes. Por lo que, se requiere realizar una reasignación de ubicación de almacenamiento de sustancias con el objetivo de aumentar la capacidad de almacenamiento de soda líquida en un 50%, y así incrementar el stock de seguridad de acuerdo con la demanda y el tiempo de reposición actual del producto.

Los consumos promedio mensuales de Soda líquida desde enero 2023 hasta agosto 2024 se presentan en la Tabla 2. Además, se presentan dichos datos gráficamente en la Figura 1.1 mediante una serie de tiempo, donde se puede observar el aumento del consumo de Soda durante el último año.

Tabla 2
Consumo de Soda Líquida durante el periodo 2023 - 2024

Mes	Consumo (Kg)
ene-23	890321.5
feb-23	1072516
mar-23	1236454
abr-23	1550550
may-23	1140766
jun-23	1483802.48
jul-23	1107207
ago-23	1360768
sep-23	1192162
oct-23	1757179.68
nov-23	1648670.8
dic-23	1330427
ene-24	1800621
feb-24	1504515.4
mar-24	1722840
abr-24	1491184
may-24	2148371.4
jun-24	1889134.44
jul-24	1634718
ago-24	1336803.02

Fuente: Autor

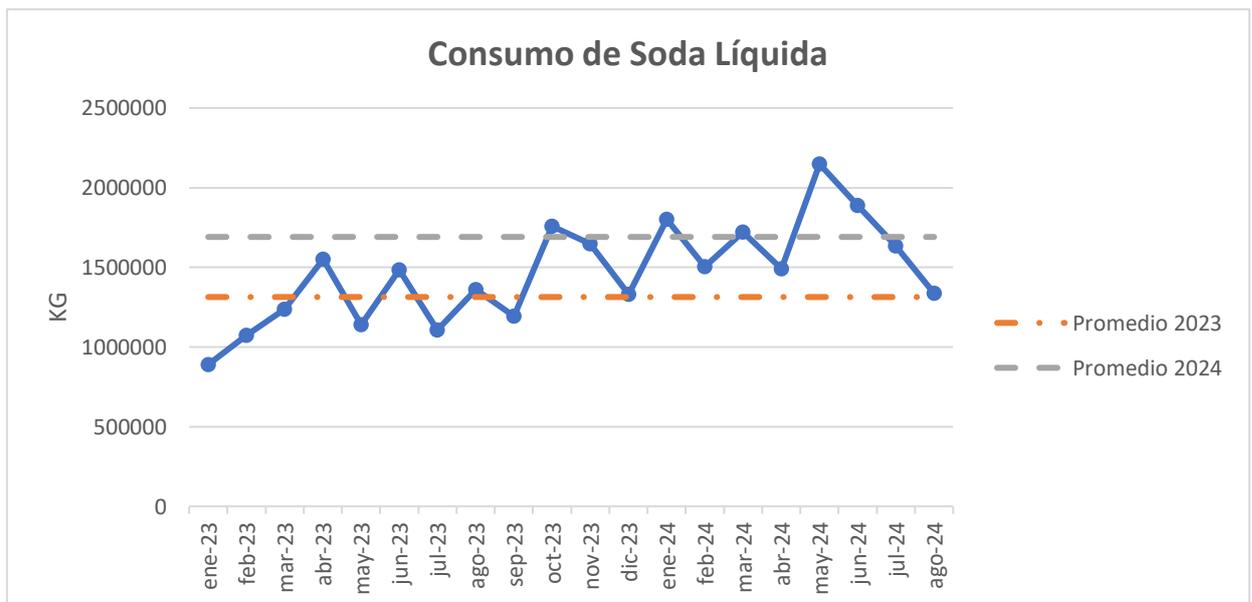


Figura 1.1: Consumo de soda Líquido durante el periodo 2023 - 2024

Fuente: Autor

1.3 Objetivos

Objetivo General

Determinar una nueva distribución y asignación de productos químicos en los diversos tanques de almacenamiento disponibles, mediante la aplicación de un modelo de optimización, para el aumento de la capacidad de almacenamiento de soda caustica líquida.

Objetivos Específicos

- Definir variables, parámetros y restricciones con la finalidad de describir el almacenamiento de productos químicos en tanques.
- Diseñar un modelo matemático de asignación para la determinación de una nueva distribución de almacenamiento de sustancias químicas.
- Realizar un análisis de sensibilidad del modelo desarrollado para la determinación de la factibilidad de la solución obtenida
- Comparar la capacidad de almacenamiento actual vs la final con la nueva distribución para la evaluación del éxito del proyecto.

1.4 Descripción de la Metodología

- i. En primer lugar, se realizará una recolección de información, para obtener datos de las sustancias a almacenar, los requerimientos de stock de cada una de ellas y el número y capacidad de tanques de almacenamiento disponibles. Esta etapa resulta relevante, puesto que, por lo general el problema se encuentra definido de forma vaga, y son los datos los cuales permiten interpretar la situación y llevarla posteriormente a ecuaciones matemáticas (Linares, Ramos, Sánchez, Sarabia, & Vitoriano, 2001).
- ii. Una vez obtenida la información, se procederá a realizar la formulación del problema, identificando las variables, relaciones, restricciones y objetivo. En este caso, el problema a resolver sería uno de asignación. El problema de asignación es una generalización tanto del problema de la mochila (múltiple) como el problema del empaquetamiento de contenedores. En este tipo de problema se tiene un número de contenedores con capacidades establecidas y n ítems, los cuales también tienen su tamaño definido (Krumke & Thielen, 2013).

El problema de asignación ha tenido varias aplicaciones en diversas áreas. En la programación de horarios, por ejemplo, es posible encontrar la asignación de trabajos con menor coste a un número limitado de recursos. En el ámbito de transportación y ruteo, se utiliza este problema de optimización para asignar pacientes entre diferentes hospitales militares en Estados Unidos, con el objetivo de minimizar las molestias para los pacientes (es decir, el número de días en el que tienen que permanecer internados), y minimizar la duración o distancia del viaje. Por otra parte, en el área de telecomunicaciones, se tiene como aplicación la maximización de cobertura teniendo en cuenta restricciones de capacidad (potencia y flujo), asignando terminales a estaciones base. Asimismo, se han visto varias aplicaciones en la planificación de producción en industrias, como

en la asignación de cargas por lotes y la programación de secuencia de dichos lotes (Öncan, 2007).

En este proyecto, el modelo genérico del problema de asignación para maximizar el almacenamiento se formula de la siguiente manera:

$$\text{Maximizar} \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \right)$$

Sujeto a:

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1 \quad j = 1, \dots, n$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad i = 1, \dots, n$$

$$x_{ij} = 0 \text{ o } 1$$

Donde:

x_{ij} es igual a 1 si el ítem i se almacena en el contenedor j , sino es 0
 c_{ij} , es la capacidad de almacenamiento del ítem i en el contenedor j

Es importante tener en cuenta que se tienen restricciones específicas, propias de la actividad de almacenamiento sustancias químicas líquidas, las cuales permiten aterrizar el modelo matemático a la realidad o contexto que se estudia. Las restricciones de este proyecto incluyen que las sustancias no pueden mezclarse dentro del mismo tanque, ciertas sustancias no pueden ubicarse en cercanía con otras sustancias, los tanques poseen distintas capacidades y las sustancias tienen diferentes demandas en el mercado.

El modelo que se obtenga después de establecer relaciones y restricciones, además de brindar una solución a la problemática actual, también brindará flexibilidad a la operación y administración del almacenamiento, puesto que sería posible determinar nuevas distribuciones frente a los cambios en el mercado y la demanda de los productos (Epstein, et al., 2012).

- iii. Luego, se procederá a resolver el problema modelado mediante la herramienta Solver de Microsoft Excel. Es importante tener en consideración que la solución obtenida a través de Solver en Excel puede ser un óptimo local, el cual su valor depende del valor inicial. Es por esto que, es necesario realizar varias pruebas con distintos valores iniciales con el objetivo de encontrar el óptimo global. (Sánchez Álvarez & López Ares, 1998).
- iv. Se evaluarán los resultados obtenidos, para determinar si la solución es factible desde un punto de vista operativo y económico. Existe la posibilidad de que, a pesar de que el modelo matemático brinde una solución óptima, en la situación real existan otros factores que no estén considerados que provoquen que la solución óptima, no sea la solución final por implementar (Pérez Peña, 2019). En este caso, la compatibilidad de sustancias juega un papel importante, ya que, dependiendo de la naturaleza de la sustancia, no podría ser almacenada junto a otras, a menos que se realice una inversión económica separando dichas sustancias mediante una barrera (cubeto), lo cual puede que ya no resulte atractivo para la administración de la empresa.

- v. Se realizará un análisis de sensibilidad donde se estudie el comportamiento de la solución óptima frente a cambios en la demanda de las demás sustancias. Aquello resulta importante, puesto que, la demanda de los productos es muy cambiante y depende de varios factores externos como la situación económica del país, precios internacionales y la competencia. Así, los resultados de dicho análisis pueden brindar indicios de qué tan duradera puede ser la solución encontrada. Y finalmente, se realizará una cuantificación de costos de manos de obra y materiales para analizar el impacto económico que la nueva distribución frente a la distribución actual.

1.5 Resultados esperados

Objetivo SMART: Incrementar la capacidad de almacenamiento de soda líquida en un 50% de 1720 TN a 2580 TN a partir de octubre 2024

CAPÍTULO 2

2. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA

2.1 Recolección de datos

Para proceder con la modelación es necesario identificar los datos que nos permitan describir el problema y la naturaleza del proceso a analizar. La información recolectada se obtuvo mediante datos históricos, registros y fichas técnicas de los tanques y las sustancias que se almacenan en la empresa.

Como primer dato importante se tienen los tanques de almacenamiento disponibles. De los 23 tanques de almacenamiento que se encuentran en la planta, se puede realizar la redistribución de 17 tanques, descritos mediante la siguiente manera:

$$T = \{1,6,7,8,10,15,16,17,18,19,20,21,S1,S2,S3,S6,S7\}$$

Los tanques de almacenamiento se ubican dentro de cubetos, los cuales cumplen la función de contener posibles derrames. Los tanques mencionados anteriormente se distribuyen en 5 cubetos, como se muestra a continuación.

$$A = \{S1,S2,S3,S6,S7\}$$

$$B = \{1,15,16,17\}$$

$$C = \{18,19\}$$

$$D = \{6,7,8,10\}$$

$$E = \{20,21\}$$

En los tanques de almacenamiento descritos, se almacenan diversas sustancias químicas, las cuales se detallan a continuación:

$$S = \{Xileno, Metanol, Etanol, Tolueno, Propanol, NPA, Acetato de Etilo, Soda\}$$

A su vez, las sustancias que son almacenadas se pueden clasificar en dos grupos: Solventes y Bases, los cuales no son compatibles entre sí, por lo tanto, no deberían almacenarse juntos.

$$Y = \{Xileno, Metanol, Etanol, Tolueno, Propanol, NPA, Acetato de Etilo\}$$

$$Z = \{Soda\}$$

También es importante tener en cuenta que los tanques poseen diferentes capacidades de almacenamiento (Q_T), como se puede observar en la Tabla 3.

Tabla 3
Capacidades de tanques de almacenamiento en Planta Solventes

T	Q _T [m ³]
1	38
6	56
7	32
8	37
10	34
15	185
16	182
17	182
18	101
19	233
20	133
21	133
S1	250
S2	145
S3	198
S6	270
S7	270

Fuente: Autor

Es importante considerar que, si bien el objetivo de la empresa es aumentar la capacidad de almacenamiento de soda líquida, se debe cumplir un requerimiento mínimo de capacidad de almacenamiento para las demás sustancias, el cual se describe en la Tabla 4. Los datos de los requerimientos de almacenamiento se obtienen de la demanda y proyecciones de los productos, estos datos se determinaron en conjunto con el departamento Comercial.

Tabla 4
Requerimientos mínimos de almacenamiento por sustancia

SUSTANCIA	NECESIDAD [m ³]
XILENO	69
METANOL	38
ETANOL	32
TOLUENO	34
PROPANOL	148
NPA	159
ACETATO DE ETILO	178

Fuente: Autor

2.2 Variables de decisión

Las variables de decisión de un modelo de optimización representan la respuesta para los tomadores de decisión frente al problema a resolver.

En este caso, la variable de decisión para el problema de aumento de almacenamiento es la asignación de sustancia a cada tanque de almacenamiento, en donde:

$$X_{t,s} = \begin{cases} 1, & \text{si asigno tanque } t \in T \text{ para almacenar la sustancia } s \in S \\ 0, & \text{caso contrario} \end{cases}$$

$$\forall t \in T, s \in S$$

2.3 Restricciones individuales para variables

Las variables de decisión que se definieron previamente están sujetas a restricciones que dependen de la naturaleza de la variable. En este caso la variable de decisión es una variable binaria, por lo que los únicos valores permitidos que puede tener dicha variables es 0 o 1.

2.4 Restricciones del modelo

Las restricciones del modelo están dadas por la naturaleza del proceso, y su función consiste en relacionar las variables entre ellas y con la data disponible.

Como primera restricción del modelo, se tiene que tomar en cuenta que sólo se puede almacenar una sustancia por tanque, es decir, no es posible mezclar sustancias en el tanque de almacenamiento para compartir espacio.

$$\sum_{s=1}^S X_{t,s} \leq 1, \quad \forall t \in T$$

También se tienen requerimientos de almacenamiento mínimo para las sustancias, los cuales se detallaron en la Tabla 4.

Así, recordando que las sustancias disponibles son:

$$S = \{Xileno, Metanol, Etanol, Tolueno, Propanol, NPA, Acetato de Etilo, Soda\}$$

Las restricciones por requerimiento de almacenamiento se formulan a continuación:

- Requerimiento de almacenamiento de Xileno

$$\sum_{t=1}^{17} Q_t * X_{t,Xileno} \geq 69$$

- Requerimiento de almacenamiento de Metanol

$$\sum_{t=1}^{17} Q_t * X_{t, Metanol} \geq 38$$

- Requerimiento de almacenamiento de Etanol

$$\sum_{t=1}^{17} Q_t * X_{t, Etanol} \geq 32$$

- Requerimiento de almacenamiento de Tolueno

$$\sum_{t=1}^{17} Q_t * X_{t, Tolueno} \geq 34$$

- Requerimiento de almacenamiento de Propanol

$$\sum_{t=1}^{17} Q_t * X_{t, Propanol} \geq 148$$

- Requerimiento de almacenamiento de NPA

$$\sum_{t=1}^{17} Q_t * X_{t, NPA} \geq 159$$

- Requerimiento de almacenamiento de Acetato de etilo

$$\sum_{t=1}^{17} Q_t * X_{t, Acetato de etilo} \geq 178$$

Como se mencionó anteriormente, las sustancias (conjunto S) se clasifican en dos grupos de acuerdo a sus características, los cuales son Solventes y Bases (subconjuntos Y y Z). Estos grupos no son compatibles entre sí, por lo tanto, no deberían almacenarse juntos. Esto significa que en cada cubeto deberían encontrarse tanques almacenando uno de los dos grupos de las sustancias. En caso en que se quiera asignar en una distribución sustancias de las dos clasificaciones en tanques que se encuentren en un mismo cubeto, para cumplir con la compatibilidad de sustancias sería necesario construir un nuevo cubeto que separe los tanques (trabajo civil) o realizar un movimiento

del tanque en particular hacia otro cubeto (involucra el uso de grúa). La empresa está dispuesta en realizar no más de 2 cambios en los cubetos.

Para formular la restricción del máximo número de cambios que se pueden realizar en los cubetos de los tanques, primero se definieron las siguientes variables:

- Asignación de sustancias del grupo de Solventes (conjunto Y) en el Cubeto A

$$J_{A,t,y} = \begin{cases} 1, & \text{si dentro del cubeto A existe un tanque } t \in T \\ & \text{que almacena el tipo de sustancia } y \in Y \\ 0, & \text{caso contrario} \end{cases}$$

$$\forall t \in T, y \in Y$$

- Asignación de sustancias del grupo de Bases (conjunto Z) en el Cubeto A

$$J_{A,t,z} = \begin{cases} 1, & \text{si dentro del cubeto A existe un tanque } t \in T \\ & \text{que almacena el tipo de sustancia } z \in Z \\ 0, & \text{caso contrario} \end{cases}$$

$$\forall t \in T, z \in Z$$

- Asignación de sustancias del grupo de Solventes (conjunto Y) en el Cubeto B

$$J_{B,t,y} = \begin{cases} 1, & \text{si dentro del cubeto B existe un tanque } t \in T \\ & \text{que almacena el tipo de sustancia } y \in Y \\ 0, & \text{caso contrario} \end{cases}$$

$$\forall t \in T, y \in Y$$

- Asignación de sustancias del grupo de Bases (conjunto Z) en el Cubeto B

$$J_{B,t,z} = \begin{cases} 1, & \text{si dentro del cubeto B existe un tanque } t \in T \\ & \text{que almacena el tipo de sustancia } z \in Z \\ 0, & \text{caso contrario} \end{cases}$$

$$\forall t \in T, z \in Z$$

- Asignación de sustancias del grupo de Solventes (conjunto Y) en el Cubeto C

$$J_{C,t,y} = \begin{cases} 1, & \text{si dentro del cubeto C existe un tanque } t \in T \\ & \text{que almacena el tipo de sustancia } y \in Y \\ 0, & \text{caso contrario} \end{cases}$$

$$\forall t \in T, y \in Y$$

- Asignación de sustancias del grupo de Bases (conjunto Z) en el Cubeto C

$$J_{C,t,z} = \begin{cases} 1, & \text{si dentro del cubeto C existe un tanque } t \in T \\ & \text{que almacena el tipo de sustancia } z \in Z \\ 0, & \text{caso contrario} \end{cases}$$

$$\forall t \in T, z \in Z$$

- Asignación de sustancias del grupo de Solventes (conjunto Y) en el Cubeto D

$$J_{D,t,y} = \begin{cases} 1, & \text{si dentro del cubeto D existe un tanque } t \in T \\ & \text{que almacena el tipo de sustancia } y \in Y \\ 0, & \text{caso contrario} \end{cases}$$

$$\forall t \in T, y \in Y$$

- Asignación de sustancias del grupo de Bases (conjunto Z) en el Cubeto D

$$J_{D,t,z} = \begin{cases} 1, & \text{si dentro del cubeto D existe un tanque } t \in T \\ & \text{que almacena el tipo de sustancia } z \in Z \\ 0, & \text{caso contrario} \end{cases}$$

$$\forall t \in T, z \in Z$$

- Asignación de sustancias del grupo de Solventes (conjunto Y) en el Cubeto E

$$J_{E,t,y} = \begin{cases} 1, & \text{si dentro del cubeto E existe un tanque } t \in T \\ & \text{que almacena el tipo de sustancia } y \in Y \\ 0, & \text{caso contrario} \end{cases}$$

$$\forall t \in T, y \in Y$$

- Asignación de sustancias del grupo de Bases (conjunto Z) en el Cubeto E

$$J_{E,t,z} = \begin{cases} 1, & \text{si dentro del cubeto E existe un tanque } t \in T \\ & \text{que almacena el tipo de sustancia } z \in Z \\ 0, & \text{caso contrario} \end{cases}$$

$$\forall t \in T, z \in Z$$

Estas variables tienen como objetivo permitir identificar si dentro de los cubetos se almacenan sustancias compatibles o no, y por ende si es necesario realizar cambios. Los cambios se determinan a partir del número de tanques almacenando sustancias de un tipo diferente al tipo de la sustancia que se esté almacenando en la mayoría de los tanques dentro del cubeto. Por ejemplo, dentro del cubeto *A* se tienen 5 tanques, si se obtuviera una distribución donde 3 de los tanques almacenen Solventes (elementos del

conjunto Y) y los 2 restantes Soda (elemento del conjunto Z), los cambios se deberían realizar con el menor número de tanques, que en este caso serían en los dos tanques que almacenan Soda.

Para determinar el número tanques que almacenan uno de los dos grupos de sustancias en cada cubeto, se deben realizar las siguientes sumatorias:

- Número de tanques que almacenan sustancias del grupo de Solventes (conjunto Y) en Cubeto A

$$\sum_{t=1}^T J_{A,t,y} \quad \forall, y \in Y$$

- Número de tanques que almacenan sustancias del grupo de Bases (conjunto Z) en Cubeto A

$$\sum_{t=1}^T J_{A,t,z} \quad \forall, z \in Z$$

- Número de tanques que almacenan sustancias del grupo de Solventes (conjunto Y) en Cubeto B

$$\sum_{t=1}^T J_{B,t,y} \quad \forall, y \in Y$$

- Número de tanques que almacenan sustancias del grupo de Bases (conjunto Z) en Cubeto B

$$\sum_{t=1}^T J_{B,t,z} \quad \forall, z \in Z$$

- Número de tanques que almacenan sustancias del grupo de Solventes (conjunto Y) en Cubeto C

$$\sum_{t=1}^T J_{C,t,y} \quad \forall, y \in Y$$

- Número de tanques que almacenan sustancias del grupo de Bases (conjunto Z) en Cubeto C

$$\sum_{t=1}^T J_{C,t,z} \quad \forall, z \in Z$$

- Número de tanques que almacenan sustancias del grupo de Solventes (conjunto Y) en Cubeto D

$$\sum_{t=1}^T J_{D,t,y} \quad \forall, y \in Y$$

- Número de tanques que almacenan sustancias del grupo de Bases (conjunto Z) en Cubeto D

$$\sum_{t=1}^T J_{D,t,z} \quad \forall, z \in Z$$

- Número de tanques que almacenan sustancias del grupo de Solventes (conjunto Y) en Cubeto E

$$\sum_{t=1}^T J_{E,t,y} \quad \forall, y \in Y$$

- Número de tanques que almacenan sustancias del grupo de Bases (conjunto Z) en Cubeto E

$$\sum_{t=1}^T J_{E,t,z} \quad \forall, z \in Z$$

Con las sumatorias obtenidas, se pueden identificar el número de cambios necesarios por cubeto que se deberían realizar, que sería el mínimo entre las sumatorias. Para esto se define el conjunto H el cual contiene los números de cambios necesarios en los cubetos, al tener cinco cubetos, este conjunto también contendrá 5 elementos. Para poder linealizar la función mínimo se tiene en cuenta que cada elemento del conjunto H puede tomar uno de dos valores, puede ser el número de tanques que almacenan sustancias del grupo de Solventes (conjunto Y) en un cubeto, o el número de tanques que almacenan sustancias del grupo de Bases (conjunto Z). El valor mínimo se selecciona entre estos dos valores y se puede formular mediante dos restricciones de menor igual, como se presenta a continuación:

$$H_A = \left\{ h \mid h \leq \sum_{t=1}^T J_{A,t,y} \wedge h \leq \sum_{t=1}^T J_{A,t,z} \right\} \quad \forall, y \in Y, \quad z \in Z$$

$$H_B = \left\{ h \mid h \leq \sum_{t=1}^T J_{B,t,y} \wedge h \leq \sum_{t=1}^T J_{B,t,z} \right\} \quad \forall, y \in Y, \quad z \in Z$$

$$H_C = \left\{ h \mid h \leq \sum_{t=1}^T J_{C,t,y} \wedge h \leq \sum_{t=1}^T J_{C,t,z} \right\} \quad \forall, y \in Y, \quad z \in Z$$

$$H_D = \left\{ h \mid h \leq \sum_{t=1}^T J_{D,t,y} \wedge h \leq \sum_{t=1}^T J_{D,t,z} \right\} \quad \forall, y \in Y, \quad z \in Z$$

$$H_E = \left\{ h \mid h \leq \sum_{t=1}^T J_{E,t,y} \wedge h \leq \sum_{t=1}^T J_{E,t,z} \right\} \quad \forall, y \in Y, \quad z \in Z$$

Finalmente, la sumatoria de los elementos del conjunto H , brinda la cantidad total de cambios que se necesitarían realizar. En este caso, la restricción es que la empresa no está dispuesta a realizar más de dos cambios.

$$\sum_{h \in H} H \leq 2$$

2.5 Función objetivo y modelo completo

La función objetivo del modelo es maximizar el almacenamiento de la soda cáustica líquida, que se formula de la siguiente forma:

$$Max \left(\sum_{t=1}^{17} Q_t * X_{t,Soda} \right)$$

Sujeta a:

$$X_{t,s} = \begin{cases} 1, & \text{si asigno tanque } t \in T \text{ para almacenar la sustancia } s \in S \\ 0, & \text{caso contrario} \end{cases}$$

$$\forall t \in T, s \in S$$

$$\sum_{s=1}^S X_{t,s} \leq 1, \quad \forall t \in T$$

$$\sum_{t=1}^{17} Q_t * X_{t,Xileno} \geq 69$$

$$\sum_{t=1}^{17} Q_t * X_{t,Metanol} \geq 38$$

$$\sum_{t=1}^{17} Q_t * X_{t,Etanol} \geq 32$$

$$\sum_{t=1}^{17} Q_t * X_{t,Tolueno} \geq 34$$

$$\sum_{t=1}^{17} Q_t * X_{t,Propanol} \geq 148$$

$$\sum_{t=1}^{17} Q_t * X_{t,NPA} \geq 159$$

$$\sum_{t=1}^{17} Q_t * X_{t,Acetato\ de\ etilo} \geq 178$$

$$H_A = \left\{ h \mid h \leq \sum_{t=1}^T J_{A,t,y} \wedge h \leq \sum_{t=1}^T J_{A,t,z} \right\} \quad \forall, y \in Y, \quad z \in Z$$

$$H_B = \left\{ h \mid h \leq \sum_{t=1}^T J_{B,t,y} \wedge h \leq \sum_{t=1}^T J_{B,t,z} \right\} \quad \forall, y \in Y, \quad z \in Z$$

$$H_C = \left\{ h \mid h \leq \sum_{t=1}^T J_{C,t,y} \wedge h \leq \sum_{t=1}^T J_{C,t,z} \right\} \quad \forall, y \in Y, \quad z \in Z$$

$$H_D = \left\{ h \mid h \leq \sum_{t=1}^T J_{D,t,y} \wedge h \leq \sum_{t=1}^T J_{D,t,z} \right\} \quad \forall y \in Y, \quad z \in Z$$

$$H_E = \left\{ h \mid h \leq \sum_{t=1}^T J_{E,t,y} \wedge h \leq \sum_{t=1}^T J_{E,t,z} \right\} \quad \forall y \in Y, \quad z \in Z$$

$$\sum_{h \in H} H \leq 2$$

2.6 Aplicación del modelo

Para aplicar el modelo matemático planteado, se utilizó la herramienta OpenSolver en Microsoft Excel. Se utilizó este complemento de código abierto puesto que el problema que se desea resolver consta de 136 variables de decisión, y OpenSolver permite superar las limitaciones de tamaño de Solver, es decir que es capaz de resolver modelos más grandes.

En primer lugar, se ubicaron los tanques y sustancias en una columna y fila respectivamente. Las variables de decisión que indican qué sustancia se almacena en qué tanque se encuentran en las celdas contenidas en dicha matriz, como se observa en la Figura 2.1

Tanque/ Sustancia	Xileno	Metanol	Etanol	Tolueno	Propanol	NPA	Acetato de Etilo	Soda
1	0	1	0	0	0	0	0	0
6	0	0	1	0	0	0	0	0
7	0	1	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	1	0	0	0
10	0	0	0	1	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	1	0
16	0	0	0	0	0	1	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	1
18	0	0	0	0	0	0	0	1
19	0	0	0	0	0	0	0	1
20	0	0	0	0	0	0	0	1
21	0	0	0	0	0	0	0	1
S1	0	0	0	0	0	0	0	1
S2	0	0	0	0	0	0	0	1
S3	0	0	0	0	0	0	0	1
S6	0	0	0	0	0	0	0	1
S7	0	0	0	0	0	0	0	1

Figura 2.1: Solución del modelo en Excel

Fuente: Autor

Luego, se colocaron las restricciones del modelo que indican que los tanques pueden almacenar una sustancia y los parámetros de capacidad de almacenamiento de cada tanque, como se puede observar en la Figura 2.2.

Tanque/ Sustancia	Capacidad máxima x tambor (m3)	RESTRICCIÓN		
		(una solo sustancia x tambor)		
1	38	1	<=	1
6	56	1	<=	1
7	32	1	<=	1
8	37	1	<=	1
10	34	1	<=	1
15	185	1	<=	1
16	182	1	<=	1
17	182	1	<=	1
18	101	1	<=	1
19	233	1	<=	1
20	133	1	<=	1
21	133	1	<=	1
S1	250	1	<=	1
S2	145	1	<=	1
S3	198	1	<=	1
S6	270	1	<=	1
S7	270	1	<=	1

Figura 2.2: Parámetros y Restricciones con respecto a los tanques de almacenamiento

Fuente: Autor

De la misma manera, se colocaron las restricciones de las sustancias, que corresponden a la capacidad de almacenamiento mínimo que se requiere, en las columnas de acuerdo con cada sustancia detallada, como se puede apreciar en la Figura 2.3.

Tanque/ Sustancia	Xileno	Metanol	Etanol	Tolueno	Propanol	NPA	Acetato de Etilo
Volumen total x sustancia (m3)	70	56	34	37	182	185	182
RESTRICCIÓN	>=	>=	>=	>=	>=	>=	>=
Capacidad mínima x	69	38	32	34	148	159	178

Figura 2.3: Restricciones de almacenamiento por sustancia

Fuente: Autor

Posteriormente, se incorporó la restricción del número máximo de cambios en los cubetos que la empresa está dispuesta a realizar. Después, la función objetivo fue formulada con la suma producto de la capacidad de almacenamiento de cada tanque y las variables de decisión correspondientes a la sustancia Soda.

Después de colocar y formular los parámetros, variables y restricciones en la hoja de cálculo de Microsoft Excel, se procedió a definir el modelo en OpenSolver, donde se especificó la celda objetivo, que es la celda en donde se calculó la función objetivo,

mencionada anteriormente, y se seleccionó la opción de maximizar dicha función. Se escogieron las variables de decisión y se añadieron las restricciones con respecto a los tanques y sustancias, además de incluir que dichas variables de decisión son variables binarias.

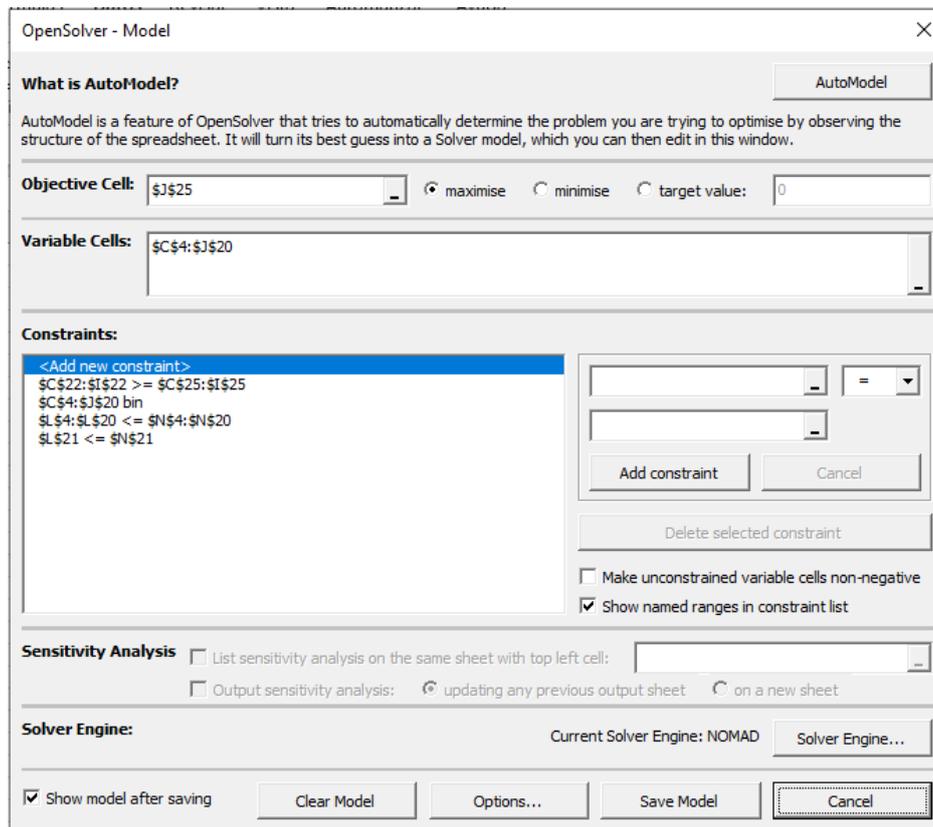


Figura 2.4: Resolución de Modelo en OpenSolver

Fuente: Autor

Luego de resolver el modelo matemático mediante OpenSolver, se encontró una que brinda un espacio de almacenamiento para soda de 1734 m^3 . La nueva distribución se presenta en la Tabla 5.

Tabla 5
Propuesta de nueva distribución de tanques

TANQUE#	CAPACIDAD [m ³]	SUSTANCIA
1	38	XILENO
6	56	METANOL
7	32	XILENO
8	37	TOLUENO
10	34	ETANOL
15	185	NPA
16	182	PROPANOL
17	182	ACETATO DE ETILO
18	101	SODA
19	233	SODA
20	133	SODA
21	133	SODA
S1	250	SODA
S2	145	SODA
S3	198	SODA
S6	270	SODA
S7	270	SODA

Fuente: Autor

2.7 Validación con el cliente

Se verificó la nueva distribución con el departamento de Seguridad Industrial y Mantenimiento de la empresa para verificar el plan de implementación de la propuesta obtenida de acuerdo con la compatibilidad de sustancias. Los solventes y la soda no pueden ser almacenados cerca los unos de los otros, por lo que, si existen tanques que se proponen cambiar a almacenar soda y tienen una ubicación en el mismo cubeto que otros tanques de solventes, sería necesario realizar ya sean movimientos de tanques con grúas o construcción y modificación de cubetos que implican trabajos civiles, dichos trabajos requieren de una gran inversión económica, lo cual puede resultar no tan atractivo para la empresa.

En este caso, la solución que se obtuvo no requiere de trabajo civil o que implique movimientos con grúa, sino que, requeriría cambios y adaptaciones en las líneas de recepción, líneas de despacho, válvulas y accesorios. Estos trabajos son más simples y la inversión económica sería mucho menor.

En la Tabla 6, se presenta la distribución de sustancias con la que se manejaba la empresa y la distribución que se propone en el presente proyecto. Como se puede observar, en la nueva distribución que se propone, cuatro tanques de almacenamiento que antes almacenaban solventes (tanques 18, 19, 20 y 21), pasarían a almacenar soda. Como se va a realizar un cambio de familia de sustancias (solventes a base), es necesario realizar ciertas adecuaciones en dichos tanques y en líneas de tuberías. Si bien es cierto que también existen cambios de sustancia en los demás tanques, el cambio se da entre sustancias pertenecientes a la misma familia (solventes) por lo que no se requiere realizar ningún tipo de adecuación en dichos tanques, únicamente en los cuatro mencionados anteriormente, donde sí hay un cambio de familia de sustancia.

Tabla 6
Distribución anterior vs Distribución propuesta

TANQUE#	CAPACIDAD [m ³]	ASIGNACIÓN ANTERIOR	ASIGNACIÓN PROPUESTA
1	38	XILENO	XILENO
6	56	METANOL	METANOL
7	32	ETANOL	XILENO
8	37	ETANOL	TOLUENO
10	34	TOLUENO	ETANOL
15	185	PROPANOL	NPA
16	182	NPA	PROPANOL
17	182	PROPANOL	ACETATO DE ETILO
18	101	XILENO	SODA
19	233	ACETATO DE ETILO	SODA
20	133	NPA	SODA
21	133	ACETATO DE ETILO	SODA
S1	250	SODA	SODA
S2	145	SODA	SODA
S3	198	SODA	SODA
S6	270	SODA	SODA
S7	270	SODA	SODA

Fuente: Autor

Se revisaron las actividades y materiales necesarios para las adecuaciones de los cuatro tanques de almacenamiento con el departamento de Mantenimiento. Estos serán considerados para determinar un presupuesto para la implementación del proyecto. Cabe recalcar que las adecuaciones de los tanques se realizarían paulatinamente, primero se adecuarían dos tanques, una vez que se encuentren operativos se adecuarían los dos siguientes. Las actividades y materiales que se revisaron incluyen:

- Mangueras inoxidables
- Trabajos de soldaduras
- Adaptaciones en tramos de tubería
- Bridas de acero inoxidable
- Reducciones de campana
- Instalación de válvulas
- Anclaje de soportes para tuberías
- Acoples de acero inoxidable
- Adición de líneas de tuberías
- Pintura e identificación de líneas de tubería

Finalmente, se presentó la propuesta obtenida ante la gerencia general y las gerencias de operaciones y logística, donde se obtuvo una respuesta positiva y se otorgó la aprobación para asignar un presupuesto a la implementación de la solución.

CAPÍTULO 3

3. EVALUACIÓN DE RESULTADOS

3.1. Análisis de Sensibilidad

Se realizó un análisis de sensibilidad con el objetivo de estudiar el comportamiento de la solución obtenida frente a cambios en ciertas restricciones, en las cuales se incluyen cambios en la demanda de ciertas sustancias y en el número de cambios permitidos. Se estudiaron ocho escenarios, en cada escenario se modificó el valor de una restricción, mientras el resto permanecía igual. También se analizó el número de cambios en los cubetos que se requerirían en cada escenario, ya que dicho valor influye en qué tanto se tenga que invertir monetariamente en implementar la distribución. Los resultados del análisis de sensibilidad se detallan en la Tabla 7.

Tabla 7
Análisis de Sensibilidad

Escenario	Capacidad almacenamiento soda [m^3]	Número de cambios en cubetos
Base	1734	0
Aumento Demanda Acetato de Etilo 30%	1686	2
Disminución Demanda Acetato de Etilo 30%	1786	2
Aumento Demanda Etanol 30%	1685	2
Disminución Demanda Etanol 30%	1734	0
Aumento Demanda Xileno 30%	1734	0
Disminución Demanda Xileno 30%	1734	0
Cambios permitidos disminuyen a cero	1734	0
Cambios permitidos se duplican a 4	1734	0

Fuente: Autor

En primer lugar, se varió la demanda de ciertas sustancias. Esto resulta importante, puesto que la demanda de los productos depende del mercado, el cual, a su vez depende de varios factores externos que no pueden ser controlados por la empresa. Se seleccionaron tres sustancias en las que se variaría su demanda en un 30%. Se seleccionó la sustancia que más demanda requeriría después de la Soda, la cual es Acetato de etilo; la sustancia con menor requerimiento de almacenamiento, Etanol; y una sustancia con una demanda de requerimiento intermedia, Xileno.

Para los cambios de demanda del Acetato de Etilo, se puede observar que, si la demanda aumenta, la solución de la función objetivo disminuye con respecto al escenario base. Esto se debe a que, al aumentar el requerimiento del Acetato de Etilo, sería necesario utilizar más tanques de almacenamiento, lo cual resta espacio de almacenamiento para la Soda. Por otra parte, si la demanda del Acetato de Etilo disminuye en un 30%, la capacidad de almacenamiento de Soda aumenta, puesto que se ubicaría al Acetato de Etilo en un tanque con menor capacidad, y en consecuencia liberaría un tanque de mayor volumen (que le fue asignado en el escenario base), para almacenar Soda. Además, para ambos escenarios (aumento y disminución de

demanda) se deben realizar dos modificaciones estructurales en los cubetos de los tanques, lo que implica que la implementación de la distribución sea más costosa que la implementación en el escenario base.

En cuanto a los cambios de demanda de Etanol, para el caso en que la demanda aumente, se observa un comportamiento similar al escenario de cambio de demanda del Acetato de Etilo, en donde la capacidad de almacenamiento de Soda disminuye y se requieren dos cambios en los cubetos. En cambio, en el escenario que la demanda del Etanol disminuya se observa un comportamiento diferente. La solución, y el número de cambios se mantiene con respecto al escenario base, en lugar de aumentar. Esto se da, debido a que al ser la sustancia que posee menor demanda, el hecho de disminuir más la necesidad no afecta en gran medida la distribución de las demás sustancias.

En cuanto a los cambios de la demanda de Xileno, se puede observar que no existe variación en la capacidad de almacenamiento de Soda resultante, en comparación al escenario base. Es decir, que los cambios en el requerimiento de almacenamiento de esta sustancia con demanda intermedia, no afecta en gran medida la distribución de las demás sustancias. Asimismo, el número de cambios estructurales necesarios en los cubetos se mantiene igual al del escenario base.

De lo analizado en los cambios de demanda en las tres sustancias, se puede inferir que las sustancias que influyen en mayor medida en la solución del modelo son las sustancias que mayor demanda poseen. Los cambios en dichas sustancias pueden provocar cambios en las asignaciones de los tanques con mayor volumen, lo que afecta directamente a la capacidad de almacenamiento disponible para soda, y a los cambios necesarios en los cubetos, por lo que también los costos de la implementación se ven proyectados. Las sustancias de menor demanda impactan en la solución cuando su demanda incrementa, puesto que provoca una disminución en el espacio libre para almacenar Soda. En consecuencia, las sustancias con demanda intermedia no afectan de gran manera a la distribución de los tanques para soda, ya que dichas sustancias se distribuyen en los tanques de almacenamiento de menor volumen. Como la función objetivo es maximizar el almacenamiento de Soda, la solución tiende a asignar la Soda a los tanques con mayor capacidad, por lo que la solución no se ve afectada si la distribución cambia en los tanques con menor volumen.

Finalmente, también se analizó el comportamiento de la solución en caso de que no se permita ningún cambio estructural en los cubetos, o que se aumente el número de cambios permitidos. En ambos escenarios, la capacidad de almacenamiento de Soda se mantiene. La solución del modelo tiende a escoger los tanques de mayor volumen para almacenamiento de Soda, puesto que el objetivo es maximizar la capacidad de almacenamiento de dicha sustancia. Actualmente en la planta, los tanques de almacenamiento de mayor tamaño se ubican en los mismos cubetos, por lo que, aunque se aumente el número de cambios permitidos, la capacidad de almacenamiento no cambiará ya que la Soda se seguirá asignando a los tanques del mismo cubeto; a menos que exista un cambio en la demanda de otra sustancia química.

3.2. Verificación del cumplimiento de la meta

Se realizó la comparación de la capacidad del almacenamiento de Soda actual vs la capacidad final con la nueva distribución para determinar el éxito del proyecto. En la Tabla 8 se presenta dicha comparación, evidenciando que se cumplió con la meta propuesta, y se obtuvo una capacidad de almacenamiento mayor a la propuesta por 52 TN.

Tabla 8
Verificación del cumplimiento de la meta

Meta Esperada	Incrementar la capacidad de almacenamiento de Soda líquida en un 50%	860 TN
Resultado alcanzado	Incremento de capacidad de almacenamiento de Soda líquida en un 53.02%	912 TN
Diferencia		52 TN

Fuente: Autor

3.3. Impacto Financiero

Antes de evaluar el impacto financiero del proyecto, es importante describir las actividades o procesos en los que se tiene que incurrir para llevar a cabo la ejecución del proyecto, para poder determinar los costos y gastos asociados a la ejecución del proyecto. Como se mencionó anteriormente, es necesario realizar la adecuación de cuatro tanques de almacenamiento, puesto que van a pasar de almacenar solventes a almacenar soda. Se tiene previsto realizar las adecuaciones progresivamente; es decir, primero se adecuarían dos tanques, y una vez que se culminen los trabajos en dichos tanques, se procedería a trabajar en los dos siguientes.

También es importante tener en cuenta el proceso de adquisición, almacenamiento y venta de la Soda líquida para determinar el impacto económico del proyecto. Como se mencionó en el Capítulo 1, la Soda es el producto estrella de la Planta Solventes, dicha sustancia se importa vía marítima cada dos meses, se almacena en la planta y en un almacén externo alquilado. Hay que considerar que el aumento de capacidad de almacenamiento de Soda en la planta no va a eliminar el almacenamiento externo, sin embargo, sí lo disminuiría, lo que implica ahorro en costos de almacenamiento. Además, el problema que se desea resolver con el aumento en capacidad de almacenamiento es la pérdida en ventas por quiebres de inventario. La mayor capacidad de almacenamiento permitiría aumentar el stock que se importa de soda líquida, lo que a su vez implica costos de importación por el stock extra que se adquiriría, pero también un aumento de ventas, ya que la empresa ya no sufriría de quiebres de inventario y sería capaz de satisfacer nuevas ventas que se proyectan a futuro.

Teniendo en cuenta los procesos y consideraciones mencionadas, se procedió a evaluar el impacto financiero de la nueva distribución propuesta, mediante la elaboración de un flujo de caja con un periodo de estudio de 12 meses (comprendiendo desde julio 2024 a julio 2025), como se puede observar en la Figura 3.1.

	Julio 0	Agosto 1	Sep 2	Oct 3	Nov 4	Dic 5	Ener 6	Feb 7	Marzo 8	Abrill 9	Mayo 10	Junio 11	Julio 12
Ingresos por ahorro en almacenamiento			\$ 4,800.00		\$10,800.00			\$ 10,800.00			\$ 10,800.00		
Ingresos por nuevas ventas								\$ 120,000.00	\$120,000.00	\$120,000.00	\$ 120,000.00	\$120,000.00	\$120,000.00
Ingresos obtenidos	\$ -	\$ 4,800.00	\$ 4,800.00	\$ -	\$10,800.00	\$ -	\$ -	\$ 130,800.00	\$120,000.00	\$120,000.00	\$ 130,800.00	\$120,000.00	\$120,000.00
Costo incremental por aumento importación								\$ 250,000.00			\$ 250,000.00		
(=) Utilidad bruta	\$ -	\$ 4,800.00	\$ 4,800.00	\$ -	\$10,800.00	\$ -	\$ -	\$ -119,200.00	\$120,000.00	\$120,000.00	\$ -119,200.00	\$120,000.00	\$120,000.00
(-) Gastos operacionales	\$ 4,560.00	\$ 2,130.00	\$ 1,850.00	\$ 1,460.00									
(=) Utilidad operativa	\$ -2,130.00	\$ 2,950.00	\$ 2,950.00	\$ -1,460.00	\$10,800.00	\$ -	\$ -	\$ -119,200.00	\$120,000.00	\$120,000.00	\$ -119,200.00	\$120,000.00	\$120,000.00
(=) Utilidad antes PT e IR	\$ -2,130.00	\$ 2,950.00	\$ 2,950.00	\$ -1,460.00	\$10,800.00	\$ -	\$ -	\$ -119,200.00	\$120,000.00	\$120,000.00	\$ -119,200.00	\$120,000.00	\$120,000.00
(-) 15% Part. Trabajad.	\$ -319.50	\$ 442.50	\$ 442.50	\$ -219.00	\$ 1,620.00	\$ -	\$ -	\$ -17,880.00	\$ 18,000.00	\$ 18,000.00	\$ -17,880.00	\$ 18,000.00	\$ 18,000.00
(=) Utilidad antes de IR	\$ -1,810.50	\$ 2,507.50	\$ 2,507.50	\$ -1,241.00	\$ 9,180.00	\$ -	\$ -	\$ -101,320.00	\$102,000.00	\$102,000.00	\$ -101,320.00	\$102,000.00	\$102,000.00
(-) 25% Impto. A la Renta	\$ -452.63	\$ 626.88	\$ 626.88	\$ -310.25	\$ 2,295.00	\$ -	\$ -	\$ -25,330.00	\$ 25,500.00	\$ 25,500.00	\$ -25,330.00	\$ 25,500.00	\$ 25,500.00
(=) Utilidad Neta	\$ -1,357.88	\$ 1,880.63	\$ 1,880.63	\$ -930.75	\$ 6,885.00	\$ -	\$ -	\$ -75,990.00	\$ 76,500.00	\$ 76,500.00	\$ -75,990.00	\$ 76,500.00	\$ 76,500.00
(-) Flujo de caja	\$ -4,560.00	\$ -1,357.88	\$ 1,880.63	\$ -930.75	\$ 6,885.00	\$ -	\$ -	\$ -75,990.00	\$ 76,500.00	\$ 76,500.00	\$ -75,990.00	\$ 76,500.00	\$ 76,500.00

Figura 3.1: Flujo de caja de nueva distribución para el aumento de almacenamiento de soda en la empresa

Fuente: Autor

Es importante considerar los ingresos incrementales percibidos en este flujo de caja corresponden a dos rubros. En primer lugar, ingresos por ahorro de almacenamiento externo, que se dan porque la empresa alquila almacenamiento en cada importación de Soda líquida. Entonces, al aumentar la capacidad de almacenamiento en planta, implica un ahorro en costos de almacenamiento. El segundo rubro sería los ingresos por nuevas ventas, en la que están comprendidas las ventas que se cubren al ya no haber quiebres de inventario, y las ventas que se estimen que ocurran por el crecimiento de mercado que se ha visto en los últimos años. Cabe recalcar que los valores de estos rubros que se están considerando son incrementales, es decir, que parten de la implementación directa del proyecto.

Por otra parte, también se tienen costos incrementales de importación, puesto que se tiene planificado aumentar la cantidad de stock importado, una vez que se realicen las adecuaciones correspondientes en los tanques. Y finalmente se tienen los gastos operaciones que comprende materiales y mano de obra de las adecuaciones de los tanques de almacenamiento.

Además, para este flujo de caja, se considera que se van a realizar importaciones en el mes de septiembre, noviembre, febrero y mayo; y se tiene previsto aumentar la cantidad de Soda importada para cubrir el stock por quiebres de inventario y aumento en ventas, en las importaciones de febrero y mayo.

Ahora bien, para la implementación de la nueva distribución, la empresa debió llevar a cabo la adecuación de cuatro, de los nueve tanques para incrementar la capacidad de almacenamiento de Soda. En julio (mes 0) se adaptaron los primeros dos tanques, generando gastos operacionales, dichos gastos provienen de los materiales y actividades necesarias para la adecuación de los tanques. Desde agosto (mes 1), al estar habilitados los dos primeros tanques, se podría comenzar a observar un ahorro en costos de almacenamiento debido a la disminución del uso de almacenamiento externo, sin embargo, en este mes no se realizó ninguna importación, por lo que este ahorro no se evidencia aún. Asimismo, se presentan gastos operacionales por la adaptación de los dos tanques siguientes. En septiembre (mes 2), se realiza una importación por lo que se pueden observar los primeros ahorros en costos de almacenamiento. Es importante recalcar que aún no se incrementa la importación de producto (puesto que la cantidad importada aumentará cuando ya se tengan operativos todos los tanques), por lo que la cantidad de soda importada es la misma que se ha realizado anteriormente. En este mes se continúan con trabajos de adecuaciones por lo que se evidencian gastos operacionales. En el mes de octubre (mes 3) también se incurren en gastos operaciones y se logra terminar de adecuar los dos tanques faltantes.

En noviembre (mes 4), con los cuatro tanques listos, el ahorro en costos de almacenamiento es mayor gracias al espacio adicional, sin que esto implique un aumento inmediato en las importaciones. A partir de febrero (mes 7), se planea incrementar la cantidad de producto importado, lo que aumentará los costos de importación, pero también generará mayores ingresos por ventas, al cubrir quiebres de inventario previos. Se estima que las ventas adicionales alcancen 200 toneladas mensuales. Las importaciones que se realizaron en septiembre y noviembre reflejaron ahorros por almacenamiento, mientras que se prevé que la importación de febrero cubra el stock hasta abril, teniendo ahorros en costos de almacenamiento y aumento de ingresos por ventas. De la misma manera se tiene planificado recibir una nueva importación en mayo (mes 10), donde se cubra el stock de ventas de dos meses, como en la importación anterior.

Se calcularon el VAN y TIR del proyecto, como se puede observar en la Figura 3.2. Se obtuvo un VAN positivo, lo que significa que se recuperará la inversión inicial, la cual se

estaría recuperando en el cuarto mes, y se tendrá una holgura financiera de \$141,764.80. Esto quiere decir que el proyecto es factible y rentable para la empresa.

VAN (Valor actual neto)	\$ 141,764.80
TIR	38%

Figura 3.2: VAN y TIR de proyecto

Fuente: Autor

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- Se determinó una nueva propuesta de distribución para asignar sustancias químicas en los diversos tanques de almacenamiento disponibles en la planta de Solventes, mediante la aplicación de un modelo de optimización, para aumentar la capacidad de almacenamiento de Soda líquida. Con la distribución propuesta se puede obtener un incremento de la capacidad de almacenamiento de Soda líquida en un 53.02%.
- Se definieron variables, parámetros y restricciones para ser capaces de describir el proceso de almacenamiento de sustancias químicas en la planta de Solventes. Para esto se recolectó información obtenida mediante datos históricos, registros, fichas técnicas y demandas proporcionadas por el departamento Comercial. Las restricciones se determinaron a partir de las demandas de los productos, la naturaleza de las sustancias, e indicaciones de la empresa.
- Se diseñó un modelo matemático de asignación para la determinación de una nueva distribución de almacenamiento de sustancias químicas. El modelo obtenido fue resuelto mediante la aplicación del complemento OpenSolver en Microsoft Excel. Se encontró una solución que brinda un espacio de almacenamiento para soda de $1734 m^3$, que son 2632 TN.
- Se realizó un análisis de sensibilidad del modelo desarrollado, en donde se estudiaron diversos escenarios en los que cambiaban la demanda de ciertas sustancias y los números de cambios estructurales que la empresa está dispuesta a realizar. De lo analizado en cuanto a cambios de demanda se refiere, se determinó que las sustancias con mayor demanda son las que mayor influencia tienen sobre la resolución del modelo, mientras que las sustancias con menor demanda impactan solo cuando su demanda incrementa; y las sustancias con demanda intermedia no afectan en gran medida al distribuirse en los tanques de almacenamiento de menor volumen. Por otra parte, al realizar cambios en los números de cambios permitidos, no se observó cambio en la solución, puesto que la Soda se seguirá asignando a los tanques de mayor volumen, los cuales se encuentran dentro del mismo cubeto; a menos que exista un cambio en la demanda de otra sustancia química.
- Se comparó la capacidad de almacenamiento actual vs la final con la nueva distribución propuesta para la evaluación del éxito del proyecto. Teniendo en cuenta que se tenía como meta obtener un incremento de al menos el 50%, se superó dicha meta planteada con un excedente de 52 TN, pasando de una capacidad de almacenamiento de 1720 TN a 2632 TN.

4.2 Recomendaciones

- Se recomienda revisar y actualizar los requerimientos de almacenamiento de las sustancias químicas en conjunto con el departamento Comercial, anualmente, con la finalidad de actualizar el modelo.

- Asimismo, se sugiere actualizar los datos de los tanques, ya que pueden existir cambios en el futuro, como la construcción, eliminación o modificación de tanques de almacenamiento, así como su distribución en los cubetos.
- Se recomienda considerar para proyectos posteriores, ampliar el objeto de estudio del modelo matemático, para incluir el almacenamiento externo. De esta manera se podrían incluir en el análisis un mayor número de tanques y también se podrían agregar nuevas restricciones que describan el costo de almacenamiento, en caso de que el objetivo de la empresa cambie y desee revisar los costos generados.
- Se sugiere analizar más escenarios con cambios en la demanda, para poder determinar un rango en la demanda por cada sustancia, en donde no se necesiten realizar cambios en los cubetos por incompatibilidad de sustancias. Dicha información puede ser compartida con gerencia para que en caso de que las demandas no se encuentren en dichos rangos, se revise si se procede con los cambios estructurales o se revisan otras alternativas.
- Se recomienda proponer capacitaciones a los jefes de las otras plantas, sobre el uso del modelo optimización y sus beneficios, para ser capaces de implementar la misma metodología en el almacenamiento de las demás plantas, teniendo en cuenta sus requerimientos particulares. De esta manera, se podría mejorar el porcentaje de utilización de los tanques de almacenamiento de toda la empresa.

BIBLIOGRAFÍA

Epstein, R., Neely, A., Weintraub, A., Valenzuela, F., Hurtado, S., Gonzalez, G., . . . Yung, D. (2012). A Strategic Empty Container Logistics Optimization in a Major Shipping Company. *Interfaces*, 5 - 16.

Krumke, S. O., & Thielen, C. (2013). The generalized assignment problem with minimum quantities. *Elsevier*, 46 - 55. doi:10.1016/j.ejor.2013.01.027

Linares, P., Ramos, A., Sánchez, P., Sarabia, Á., & Vitoriano, B. (Octubre de 2001). *Modelos Matemáticos de Optimización*. Madrid: Universidad Pontificia Comillas. Obtenido de Universidad Pontificia Comillas Madrid.

Öncan, T. (2007). A Survey of the Generalized Assignment Problem and Its Applications. *INFOR: Information Systems and Operational Research*, 123-141.

Pérez Peña, R. (2019). *Introducción a los Modelos de Optimización*. Bogotá: Sello Editorial UniPiloto.

Sánchez Álvarez, I., & López Ares, S. (1998). Optimización con Solver. *VI Jornadas Santiago-ASEPUMA*, (págs. 1-10). Obtenido de VI Jornadas Santiago-ASEPUMA.