

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA



TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

“DISEÑO DE UN TANQUE DISOLVEDOR DE 25 TONELADAS POR HORA (t/h) PARA REDUCIR EL TIEMPO DE ELABORACION DE SOLUCION OXIDANTE”

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO MECANICO

ELABORADO POR:

MARTIN ERACLIO ALDAVE PALACIOS

 0009-0000-6814-0163

ASESOR:

Mg. Ing. ROBERTO PINEDA LEÓN

 0000-0002-4314-0893

LIMA – PERÚ

2023

Dedicat6ria

A mis padres por haberme dado la formaci6n para ser la persona que soy en la actualidad y la oportunidad para alcanzar mis anhelos.

A mi esposa por su constante apoyo, compresi6n y confianza para la culminaci6n de este trabajo.

RESUMEN

El presente trabajo de investigación de tipo cuantitativo, tuvo como objetivo el diseño de un tanque disolvedor de 25 t/h para reducir el tiempo de elaboración de solución oxidante (SO).

En el desarrollo de la investigación se señalaron los fenómenos que se producen en la elaboración de la SO, así como las variables y correlaciones consideradas en el diseño de un tanque disolvedor de SO.

La SO es una sustancia elaborada en las plantas de fabricación de explosivos de uso civil, como proceso previo para la producción de emulsiones, ya sean estas sensibilizadas o como agente oxidante, ambos productos de amplia utilización en el sector minero. Esta SO, se elabora a partir de la disolución del nitrato de amonio en agua; debido a que durante este proceso hay una reacción endotérmica (descenso de la temperatura) por el contacto de la sal de nitrato de amonio con el agua, es que se requiere el suministro de calor para mantener el control de la temperatura y solubilidad durante el proceso de disolución y cumplir con los parámetros de control de calidad de la SO.

La elaboración de esta sustancia (SO) se realizan en equipos denominados tanques disolvedores, elemento que por diversos factores condiciona la productividad de la planta.

Mediante esta investigación se determinaron los factores o variables que influyen en el tiempo de elaboración de la SO, por lo que se concluyó que estos factores o variables interrelacionados son importantes para realizar modificaciones o un nuevo diseño de un tanque disolvedor de SO.

ABSTRACT

The objective of this quantitative research work was to design a 25 t/h dissolving tank to reduce the oxidizing solution (SO) preparation time.

In the development of the investigation, the phenomena that occur in the production of SO were pointed out, as well as the variables and correlations considered in the design of an SO dissolver tank.

SO is a substance produced in explosives manufacturing plants for civil use, as a preliminary process for the production of emulsions, whether these are sensitized or as an oxidizing agent, both products widely used in the mining sector. This SO is made from the solution of ammonium nitrate in water; Due to the fact that during this process there is an endothermic reaction (temperature drop) due to the contact of the ammonium nitrate salt with water, the supply of heat is required to maintain temperature control and solubility during the process. dissolution and comply with the quality control parameters of the SO.

The preparation of this substance (SO) is carried out in equipment called dissolver tanks, an element that, due to various factors, determines the productivity of the plant.

Through this investigation, the factors or variables that influence the SO production time were determined, so it was concluded that these interrelated factors or variables are important to make modifications or a new design of an SO dissolver tank.

ÍNDICE

RESUMEN	iii
ABSTRACT	iv
PRÓLOGO	1
CAPÍTULO I	4
1.1 Generalidades	4
1.2 Descripción del problema de investigación	5
1.3 Objetivo del estudio	10
1.3.1 Objetivo general	10
1.4 Antecedentes investigativos	10
1.4.1 Investigaciones internacionales	10
1.4.2 Investigaciones nacionales	21
CAPÍTULO II	25
2.1 Marco teórico	25
2.2 Marco conceptual	36
CAPÍTULO III	38
3.1 Hipótesis general	38
3.2 Operacionalización de variables	38
CAPÍTULO IV	39
4.1 Tipo de la investigación	39
4.2 Diseño de la investigación	40
4.3 Unidad de análisis	41
4.4 Matriz de consistencia	42
CAPÍTULO V	43
5.1 Proceso de elaboración de solución oxidante (SO)	43
5.2 Diseño del actual tanque disolvedor TQ-03	51
5.3 Recolección de datos	55
5.4 Procesamiento de la información	57
5.5 Tanque disolvedor de 25 t/h para elaboración de SO	62
5.5.1 Funciones principales	64
5.5.2 Requerimientos para el diseño	64

5.5.3	Selección de las soluciones	66
5.5.4	Cálculo geométrico del tanque.....	76
5.5.5	Cálculos para el sistema de agitación.....	103
5.5.6	Diseño térmico para el intercambiador de calor tipo serpentín (ICS)	131
CAPÍTULO VI.....		170
6.1	Análisis del intercambiador de calor tipo serpentín (ICS)	170
6.2	Análisis del sistema de agitación	170
6.3	Análisis del tanque disolvedor.....	171
6.4	Contrastación con la hipótesis planteada	171
CONCLUSIONES		172
RECOMENDACIONES.....		173
ANEXOS.....		176

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N°1.1 Proceso productivo en mina.....	5
Figura N°1.2 Clasificación de los explosivos industriales.....	6
Figura N°1.3 Diagrama de proceso para fabricación de emulsión a granel ...	7
Figura N°1.4 Tanque disolvedor para preparación de SO.....	8
Figura N°1.5 Temperaturas extremas alcanzadas en las reacciones de disolución versus concentraciones de solución	20
Figura N°2.1 Flujo de calor a través de una pared.....	26
Figura N°2.2 Tipos de agitadores.....	30
Figura N°4.1 Ubicación de planta Orica, Congata, Arequipa, Perú.....	41
Figura N°5.1 Proceso de disolución del nitrato de amonio en agua.....	45
Figura N°5.2 Temperatura alcanzada versus concentraciones en la disolución de NH_4NO_3	46
Figura N°5.3 Variación de la entalpia versus concentraciones en la disolución de NH_4NO_3	47
Figura N°5.4 Proceso de elaboración de SO en un tanque disolvedor.....	48
Figura N°5.5 Tanque de disolución TQ03 – Partes principales.....	51
Figura N°5.6 Tanque de disolución TQ03 – Ingreso de vapor y control de temperatura.....	54
Figura N°5.7 Variación de la temperatura en la elaboración de 20 toneladas de SO.....	57
Figura N°5.8 Definición de soluciones saturadas	59
Figura N°5.9 Variación de la presión de vapor en la elaboración SO	60

Figura N°5.10 Variables geométricas de un tanque de la elaboración de solución oxidante (SO).....	78
Figura N°5.11 Tipo de impelente en función del volumen y la viscosidad del líquido a agitar.....	104
Figura N°5.12 Tipo de impelente en función de la viscosidad del líquido a Agitar.....	105
Figura N°5.13 Impelente tipo turbina con aspas inclinadas.....	107
Figura N°5.14 Patrón de flujo generado por un impelente tipo turbina con aspas inclinadas.....	108
Figura N°5.15 Número de potencia Np en función del número de Reynolds Re para turbinas e impulsores de alta eficiencia	112
Figura N°5.16 Número de potencia Np en función del número de Reynolds Re para hélices marinas y cintas helicoidales.....	112
Figura N°5.17 Variables geométricas de un tanque agitador estándar.....	113
Figura N°5.18 Potencia requerida para la suspensión completa de arena en agua en tanques agitados utilizando turbinas de palas inclinadas.....	119
Figura N°5.19 Aspecto físico de los granos de nitrato de amonio.....	121
Figura N°5.20 Curvas para selección de bombas	134
Figura N°5.21 Conductividad térmica del agua a diferentes temperaturas	151
Figura N°5.22 Dimensiones generales de un tanque disolvedor de 25 t/h de capacidad para elaboración de SO.....	169

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N°1.1 Solubilidad de KNO_3 en 100 gramos de H_2O	12
Tabla N°1.2 Modelos obtenidos para tanques calentados con ICS y diversos tipos de agitadores.....	18
Tabla N°1.3 Datos registrados de los equipos térmicos antes de la mejora del sistema de condensado.....	24
Tabla N°1.4 Datos registrados de los equipos térmicos posterior a la mejora del sistema de condensado.....	24
Tabla N°3.1 Operacionalización de variables.....	38
Tabla N°4.1: Matriz de consistencia.....	42
Tabla N°5.1 Clases de peligro de la disolución de nitrato de amonio (NH_4NO_3) en agua.....	49
Tabla N°5.2 Registro de temperatura y presión de vapor durante la elaboración de 20 toneladas de SO.....	56
Tabla N°5.3 Solubilidad del nitrato de amonio (NH_4NO_3) en agua a diferentes temperaturas.....	58
Tabla N°5.4 Temperatura de fusión del nitrato de amonio (NH_4NO_3).....	61
Tabla N°5.5 Temperatura de descomposición de la solución de nitrato de amonio (NH_4NO_3) en agua.....	61
Tabla N°5.6 Propiedades físicas y químicas de la SO y del nitrato de amonio (NH_4NO_3).....	63
Tabla N°5.7 Presión de vapor utilizado en el sistema de calentamiento.....	63
Tabla N°5.8 Carta morfológica – alternativas de diseño.....	65
Tabla N°5.9 Valoración de importancia – almacenamiento.....	66
Tabla N°5.10 Valoración de “pesos” de los criterios – almacenamiento.....	67
Tabla N°5.11 Valoración de desempeño – almacenamiento.....	67

PRÓLOGO

El presente trabajo de investigación titulado “DISEÑO DE UN TANQUE DISOLVEDOR DE 25 TONELADAS POR HORA (t/h) PARA REDUCIR EL TIEMPO DE ELABORACION DE SOLUCION OXIDANTE”, consta de seis capítulos los cuales se describen a continuación:

Capítulo I, describe las generalidades mencionando el sector económico y de consumo para el cual se produce el explosivo, siendo la SO un componente importante de este último. También se menciona la importancia de buscar mejoras en el diseño de tanques disolvedores para elaboración de SO y así tener competitividad del explosivo en calidad y precio para su consumo por el cliente final.

Debido a que la SO es un producto que se elabora previamente para la producción de explosivos de uso civil, la problemática de los tanques disolvedores para su elaboración se presenta mostrando inicialmente y de forma resumida los tipos de explosivos utilizados por el cliente final, así como la descripción del proceso de elaboración de SO, para así tener un mejor entendimiento del impacto que generan los tanques disolvedores en la cadena productiva y de consumo.

En este capítulo también se propone el objetivo del trabajo de suficiencia, así como se presentan los antecedentes internacionales y nacionales relacionados con el tema de investigación.

Capítulo II, se describe el marco teórico que comprende los diversos conceptos o investigaciones referidos a la transferencia de calor, procesos de agitación y mezclado, así como el análisis térmico en intercambiadores de calor.

También se describe el marco conceptual en el que se especifica y definen la interpretación particular de algunos términos utilizados para este trabajo.

Capítulo III, se presenta la hipótesis de la investigación, las variables dependiente e independiente y los indicadores que serán considerados en este trabajo.

Capítulo IV, se desarrolla la metodología de la investigación presentando el tipo y diseño de investigación, así como una descripción de la unidad de análisis donde se presenta la problemática. También se presenta la matriz de consistencia en la que se indican los elementos considerados en la investigación de manera concreta.

Capítulo V, se desarrolla el trabajo de investigación, iniciando con la descripción del fenómeno físico químico que se presenta en la disolución del nitrato de amonio en agua, así como, la descripción del proceso de elaboración de SO y las características técnicas del actual tanque disolvedor. También se realiza en este capítulo un análisis de la problemática que se presenta y que justifica el desarrollo de la presente investigación, para lo cual

se recopiló información de las variables de control relacionada a la operación y velocidad de producción del actual tanque disolvedor.

Finalmente, en este capítulo, también se realizó el diseño de un tanque disolvedor considerando los requerimientos de productividad (25 t/h), fabricación, operación y mantenimiento referenciando bases teóricas de la literatura especializada, así como investigaciones respecto a este tipo de equipos en donde se desarrollan procesos de disolución con calentamiento.

Capítulo VI, se efectúa el análisis y la discusión de los resultados acerca de la investigación desarrollada en el capítulo V, y se procesa la validación y contrastación de la hipótesis mediante la comparación de los valores de las variables y sistemas del actual tanque disolvedor con el tanque que se propone en el trabajo de investigación.

Finalmente se realiza un análisis de los resultados, se mencionan las conclusiones y se proponen recomendaciones para su aplicación en nuevos tanques disolvedores o en modificaciones de tanques disolvedores existentes. También se propone otro tema de investigación con el desarrollo de diseño de equipos que obtengan el mismo tipo de producto, pero basado en una producción continua.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Generalidades

La explotación de los yacimientos mineros es una de las principales actividades económicas en el contexto internacional con una participación de aproximadamente el 45% de la economía mundial según el portal de internet “Minería Sostenible de Galicia” (junio 2022). En el Perú el sector minero también es una de las principales actividades económicas; dentro de este sector uno de los minerales más representativos es la explotación del cobre, donde el Perú, en el 2022 ocupó el segundo lugar a nivel mundial con una producción de 2,2 millones de toneladas, superado por Chile que tuvo una producción de 5,2 millones de toneladas, según el portal de internet “Statista” (junio 2023), seguidos por países como China, Estados Unidos y Australia; según el portal de internet “World Energy Travel” (mayo del 2021) se prevee que la producción de cobre en el Perú, pase de 2,2 millones de toneladas del 2020 a 3,1 millones de toneladas para el 2024.

De lo antes mencionado, para el crecimiento o continuidad de las actividades mineras, sea para la explotación del cobre u otros minerales, el suministro de explosivos de uso civil, en específico, de emulsiones a granel tiene un rol muy importante para este sector. Tanto en el Perú como en el mundo las plantas de fabricación de estas emulsiones optimizan continuamente sus procesos de tal manera de que sus productos sean competitivos en el mercado minero. Uno de los procesos en una planta de fabricación de emulsión a granel, es la

elaboración de solución oxidante (SO), la que se realiza típicamente en tanques reactores denominados tanques disolvedores; esta SO tiene variantes particulares de formulación, propias de cada fabricante, principalmente en las proporciones del nitrato de amonio y agua presentes, así como en la temperatura final.

Por lo tanto analizar los factores que afectan a un tanque disolvedor considerando, investigaciones, expresiones así como correlaciones que consideren las variables químicas y físicas de intercambiadores de calor con vapor, procesos de disolución, mezcla y agitación para una capacidad de producción determinada, permitirá afrontar la problemática en este tipo de equipos.

1.2 Descripción del problema de investigación

Una de las principales actividades económicas del Perú es la minería, en donde se utiliza explosivos industriales para la perforación y voladura como parte del proceso productivo de una mina como el que se muestra en la figura N°1.1.

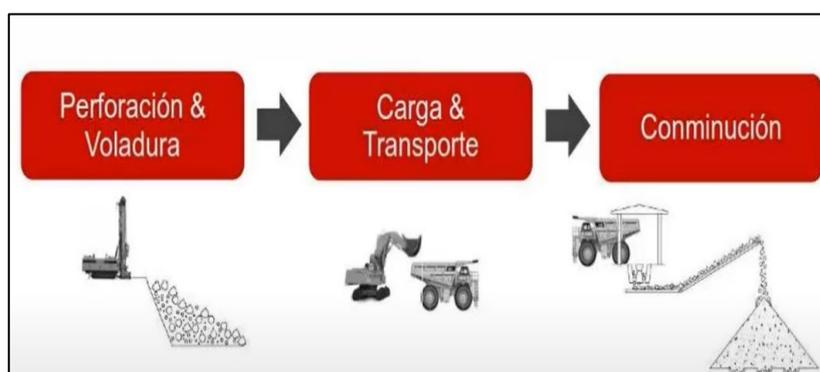


Figura N°1.1 Proceso productivo en mina

Fuente: Presentación de la emulsión gasificada SAN-G APU / FAMESA (2018)

En la figura N°1.2 se muestra una clasificación de los principales tipos de explosivos industriales utilizados en la minería



Figura N°1.2 Clasificación de los explosivos Industriales

Fuente: Manual práctico de voladura - EXSA S.A. (2009)

Uno de los productos de mayor demanda en las minas, es la emulsión a granel que se produce en plantas de fabricación de explosivos, como el que se muestra en la figura N°1.3. Entre los principales equipos de una planta de este tipo se mencionan los siguientes: tanques disolvedores para la elaboración de SO, tanques de preparación de solución combustible (SC), estación de filtrado para la SO y SC, tanque pulmón para la SO, bombas dosificadoras para la SO y la SC, flujómetros masicos, emulsificadores, enfriadores y silos de almacenamiento para la emulsión a granel.

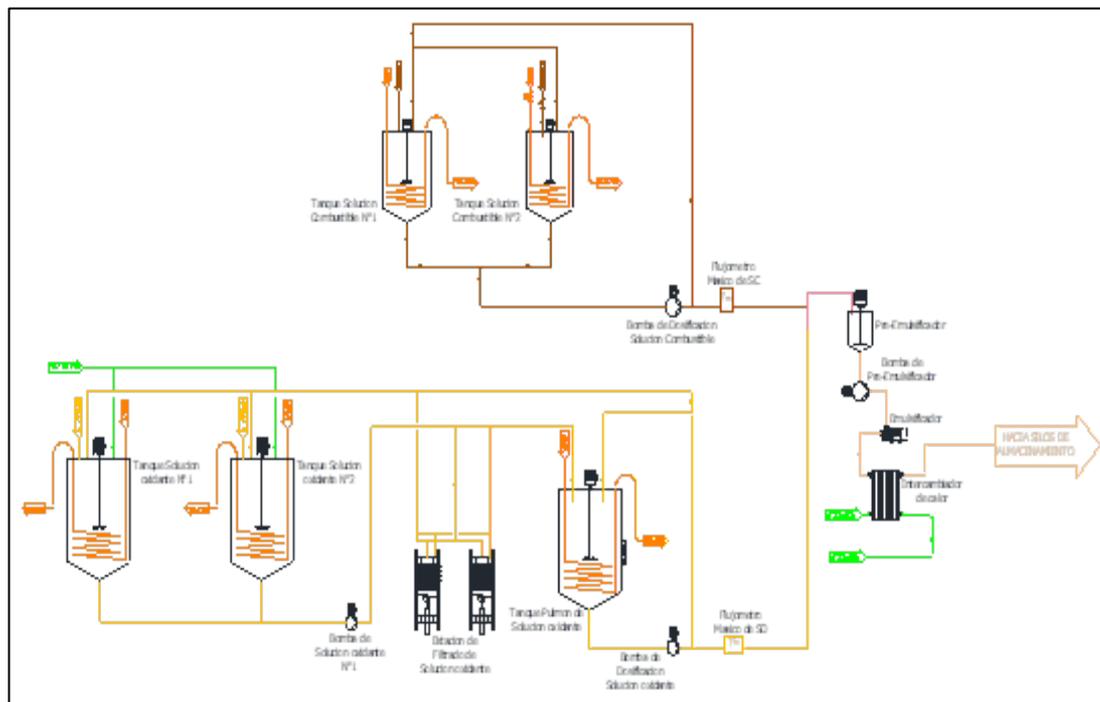


Figura N°1.3 Diagrama de proceso para fabricación de emulsión a granel
Fuente: Archivo EXSA – 2012

Respecto a los tanques disolvedores para elaboración de SO, estos son equipos reactores en donde se prepara la disolución a base de nitrato de amonio (soluto) y agua (solvente). En la figura N°1.4 se muestra un tanque disolvedor típico fabricado en acero inoxidable con aislamiento térmico exterior, un IC tipo serpentín (ICS) que utiliza vapor saturado y un agitador.

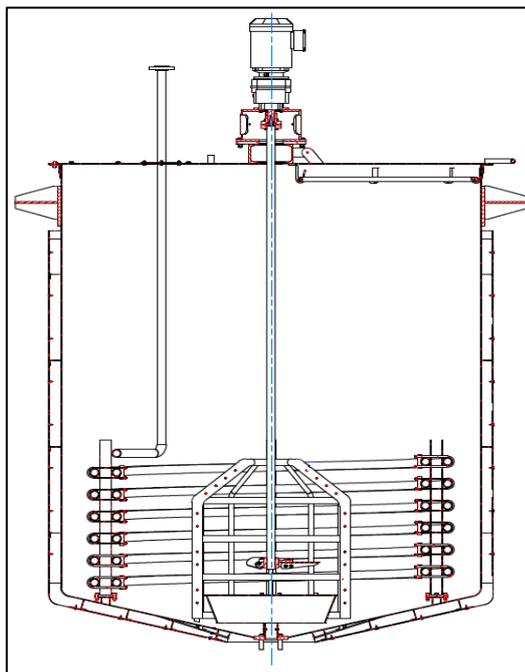


Figura N°1.4 Tanque disolvedor para preparación de SO
Fuente: Archivo EXSA S.A. – 2011

La preparación de la SO se inicia con el llenado del agua al tanque disolvedor según volumen previamente establecido por la formulación, una vez terminado este proceso se inicia el calentamiento del agua por medio del ICS y se pone en marcha el agitador para mejorar la transferencia de calor. Posteriormente al calentamiento del agua, se suministra al tanque disolvedor en forma dosificada, el nitrato de amonio a granel que es diluido en el agua caliente por medio del agitador.

En este proceso de dilución, la temperatura es uno de los principales parámetros a controlar, debido que, al contacto de los granos del nitrato de amonio con el agua se produce una reacción de tipo endotérmica (enfriamiento), por lo que debe controlarse la temperatura durante este

proceso, considerando que al final de la elaboración de la SO, esta alcance una temperatura de 80°C aproximadamente.

Para el control de temperatura los tanques disolvedores están equipados normalmente con sensores y controladores que regulan el ingreso o corte del vapor, pero estos accesorios no evitan los problemas que se presentan durante la elaboración de SO y que afectan la productividad, como son:

- Insuficiente potencia de calentamiento del ICS, lo cual ocasiona disminución de la temperatura (proceso endotérmico) por debajo del punto de saturación que afecta la solubilidad del nitrato de amonio en agua durante el proceso de elaboración de la SO.
- Inadecuado tipo o subdimensionamiento del sistema colector y de evacuación de condensado, lo que también afecta la potencia de calentamiento debido a que, los condensados al presentar dificultades en la evacuación inundan parte del serpentín de calentamiento reduciendo el área de transferencia de calor.
- Inadecuado tipo y velocidad de rotación del agitador instalado, lo que afecta al proceso de disolución y la transferencia de calor del ICS hacia la SO.

Por lo que se plantea la siguiente interrogante:

¿De qué manera el diseño de un tanque disolvedor de 25 t/h influye en la reducción del tiempo de elaboración de solución oxidante?

1.3 Objetivo del estudio

1.3.1 Objetivo general

Diseñar un tanque disolvedor de 25 t/h para reducir el tiempo de elaboración de solución oxidante.

1.4 Antecedentes investigativos

1.4.1 Investigaciones internacionales

Pérez E. et al (2019) "DISEÑO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR DE SERPENTÍN PARA EL ENFRIAMIENTO DE ACETONA"

En este trabajo se realizó el diseño de un intercambiador de calor de serpentín (ICS) para enfriar un flujo de 300 kg/h de acetona líquida de 70°C a 30°C, utilizando como fluido de enfriamiento agua a 2°C con el objetivo de:

- Determinar la caída de presión de ambos fluidos (acetona, agua) y compararlos con el límite máximo establecido para el proceso (en este caso en particular 0,5 Pa para la acetona y 18 kPa para el agua de enfriamiento).
- Determinar la influencia del incremento del caudal másico de alimentación y temperatura de entrada de la acetona (fluido caliente), sobre cuatro parámetros de diseño del ICS:

- U: Coeficiente global de transferencia de calor
- A: Área de transferencia de calor
- n: Número real de vueltas del serpentín
- H: Altura del intercambiador de calor

Para los requerimientos del diseño, se determinó que la caída de presión, tanto para el fluido caliente (acetona) como para el fluido frío (agua) es aceptable para los valores calculados para las especificaciones del ICS. También se determinó que U, A, n y H del ICS se incrementan a medida que el flujo y la temperatura de entrada de la acetona aumenta.

Castillo V. (2013) "DISEÑO Y CÁLCULO DE UN AGITADOR DE FLUIDOS"

El autor realizó el análisis teórico de los modelos de flujo, tipos de agitadores y su aplicación en la industria con el objetivo de diseñar un agitador para mezclar agua y soda caustica.

Según los cálculos realizados, verificó los valores del diseño para el correcto funcionamiento del mecanismo y el rango dentro de los cuales funcione el agitador calculado (velocidad crítica de rotación). El autor concluye que los agitadores, que se diseñen y fabriquen localmente también logran con el objetivo en su aplicación industrial a bajo costo con respecto a fabricantes especializados en agitadores.

Quintana A. et al (2019) “DETERMINACIÓN DE CALORES DE DISOLUCIÓN Y CRISTALIZACIÓN PARA SOLUCIONES SATURADAS DE NITRATO DE POTASIO EN AGUA”

En este trabajo se determinaron experimentalmente los calores de disolución y cristalización del Nitrato de Potasio (KNO_3) en agua considerando en este estudio distintas concentraciones de saturación para un intervalo de temperatura de $10^\circ C$ a $40^\circ C$, con el objetivo de comparar los valores experimentales con los calculados teóricamente.

Para la determinación teórica del calor de disolución utilizaron información de solubilidad del KNO_3 en agua a diferentes temperaturas como la que se muestra en la tabla 1.1.

T ($^\circ C$)	Solubilidad ($\frac{gKNO_3}{100gH_2O}$)
0	13,3
10	20,9
20	31,6
30	45,8
40	63,9
50	85,5
60	110
70	138
80	169
90	202
100	246

Tabla N°1.1 Solubilidad de KNO_3 en 100 gramos de H_2O

Fuente: Perry, R. H, (2019, Edición 09) “Manual del Ingeniero Químico”

También utilizaron la expresión de Van't Hoff, considerando a la disolución KNO_3 -agua como una solución ideal para relacionar la solubilidad con el calor de disolución.

$$\ln c^* = -\frac{\Delta H_d}{R_G T} + \frac{\Delta S_d}{R_G} \quad (1.1)$$

Donde:

R_G : Constante universal de los gases (8,314477 J/(mol * °K))

T : Temperatura de la disolución (°K).

C^* : Fracción molar del soluto en la solución.

ΔH_d : Entalpia de disolución (J/mol).

ΔS_d : Entropía de disolución (J/mol).

Para determinar el calor de disolución de manera experimental, los investigadores utilizaron la ecuación 1.2 correspondiente al balance de energía del sistema:

$$-\Delta H_d = m_{KNO_3} C_{p_{KNO_3}} \Delta T + m_{H_2O} C_{p_{H_2O}} \Delta T \quad (1.2)$$

Donde:

ΔH_d : Entalpia o calor de disolución (J)

m_{KNO_3} : Masa de nitrato de potasio (g)

m_{H_2O} : Masa de agua (g)

C_p : Capacidad calorífica de cada especie (J/(g · °C))

ΔT : Cambio de temperatura que se produce al disolver los cristales de KNO_3 en el agua (°C).

Finalmente, los autores llegaron a la conclusión de que el calor de disolución del KNO_3 en agua puede calcularse con la ecuación de Van't Hoff con un error de 3,4 % dentro del intervalo corto de estudio, donde $\ln C^*$ versus $1/T$ muestra linealidad.

En cuanto al análisis del calor de cristalización, para la determinación experimental, prepararon soluciones saturadas de KNO_3 a 15, 20, 25, 30 y 35 °C las cuales fueron agitadas y enfriadas en un equipo cristizador de donde se registraban las temperaturas cada 10 segundos hasta cuando la temperatura dejaba de disminuir lo cual indicaba el inicio de la cristalización. También utilizaron las siguientes ecuaciones:

$$Cp_{sol} = \sum x_i Cp_i \quad (1.3)$$

Donde:

Cp_{sol} : Calor específico promedio de la solución (J/(g · °C))

Cp_i : Calor específico de cada componente de la solución (J/(g · °C))

x_i : Fracción másica de cada componente (varía según la temperatura de saturación a la cual fue preparada cada solución)

En la ecuación 1.4 se muestra el balance de energía en la zona donde aparecen los cristales.

$$Q_{\text{producido}} = \dot{Q}_{sol} \Delta t + m_{sol} Cp_{sol} \Delta T \quad (1.4)$$

Donde:

$Q_{\text{producido}}$: Calor generado durante la cristalización (J)

\dot{Q}_{sol} : Flujo de calor removido (J/s)

Cp_{sol} : Calor específico promedio de la solución (J/(g · °C))

m_{sol} : Masa de la solución (g)

Δt : Tiempo en que la temperatura de la solución no disminuye a pesar del flujo de calor a través de la chaqueta (s).

ΔT : Cambio de temperatura que se produce al aparecer los cristales de KNO_3 en la solución ($^{\circ}\text{C}$).

El valor del calor de cristalización ΔH_c es calculado al dividir el $Q_{\text{producido}}$ entre las moles de cristales de KNO_3 producidas.

La cuantificación de la masa de cristales formados lo obtuvieron por medio de mediciones de densidad y temperatura de la solución en línea, utilizando la Ecuación 1.5 desarrollada por Muñiz-Ovalle (Quintana-Hernández et al. 2019).

$$\text{Concentración} \left(\frac{\text{g KNO}_3}{\text{g H}_2\text{O}} \right) = -2.528 + 2.343\rho + 1.33 \cdot 10^{-4}T + 0.099\rho^2 + 2.71 \cdot 10^{-5}T^2 \quad (1.5)$$

Obtenido experimentalmente el calor de cristalización, el valor promedio fue de $-18831,87 \text{ J/mol}$, pero según Mersmann (1995) el valor del calor de cristalización para el KNO_3 es de -20000 J/mol . Al comparar estos valores observaron una diferencia menor a $5,9 \%$.

Respecto a los experimentos para calcular el calor de cristalización, los investigadores registraron que la variabilidad en la masa de cristales formados es grande, por lo que recomendaron hacer una revisión en el procedimiento de cuantificación de la masa de cristales para que de esa manera se disminuya esa variabilidad.

Miranda B. (2013) “DETERMINACIÓN DE UNA CORRELACIÓN PARA ESTIMAR EL COEFICIENTE DE PELÍCULA EXTERNO PARA SERPENTINES EN TANQUES AGITADOS”

En este trabajo, la investigadora determinó experimentalmente, los parámetros α , p , q , r y n del modelo matemático:

$$Nu = \alpha \cdot (Re)^p \cdot (Pr)^q \cdot (\Phi)^r \cdot (S)^n \quad (1.6)$$

Este modelo matemático (1.6) fue desarrollado por análisis dimensional para transferencia de calor en tanques equipados con agitadores.

Donde:

Nu: Número de Nusselt

Re: Número de Reynolds

Pr: Número de Prandtl

Φ : Factor adimensional que relaciona la viscosidad a la temperatura promedio del fluido con la viscosidad del fluido a la temperatura de la superficie de transferencia de calor (Sieder & Tate, 1936).

S: Factores de forma

α , p , q , r y n : Coeficientes

Desarrollando cada uno de los números adimensionales de la ecuación 1.6, la expresión queda de la siguiente forma:

$$\frac{h_o D_o}{k} = \alpha \left(\frac{n D_a^2 \rho}{\mu} \right)^p \left(\frac{C_p \mu}{k} \right)^q \left(\frac{\mu}{u_w} \right)^r \left(\frac{D_a}{D_T} \right)^n \quad (1.7)$$

Donde:

h_o : Coeficiente de película externo de transferencia de calor

D_H : Diámetro exterior del tubo del serpentín

k, ρ, μ, C_p : Conductividad térmica, densidad, viscosidad dinámica y capacidad calorífica del fluido, respectivamente

n : Velocidad de agitación

D_a : Diámetro del impulsor

D_T : Diámetro del tanque

Las variables y parámetros analizados en la fase experimental de esta investigación son los siguientes:

- Variables experimentales: tipo de fluido, tipo de agitador, diámetro de agitador y velocidad de agitación.
- Variables fijas: dimensiones mecánicas del tanque y los serpentines, cambio de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) del fluido a calentar, presión y temperatura del fluido térmico.
- Variables de respuesta: volumen de condensado, tiempo de operación y coeficiente de película (variable de respuesta indirecta).
- Parámetros: temperatura y presión ambiente.

En la fase de experimentación y con los datos obtenidos, la autora calculó los coeficientes de película y determinó la correlación del modelo

considerando los exponentes para Re y μ/μ_w en $2/3$ y $0,14$, respectivamente, según también lo había ya determinado Dickey & Hicks (1976).

En la tabla N°1.2 se muestran las correlaciones o modelos obtenidos para tanques calentados con ICS y diversos tipos de agitadores.

Tipo de agitador	Modelo	R ²	% error
Turbina 4 aspas rectas	$Nu = 0,0448Re^{2/3}Pr^{0,71}\phi^{0,14}S^{0,97}$	0,94	3 %
Turbina 4 aspas inclinadas	$Nu = 0,0204Re^{2/3}Pr^{0,69}\phi^{0,14}S^{-2,10}$	0,90	4 %
Turbina 6 aspas rectas	$Nu = 0,139Re^{2/3}Pr^{0,75}\phi^{0,14}S^{-0,10}$	0,90	9 %
Turbina 6 aspas inclinadas	$Nu = 0,196Re^{2/3}Pr^{0,84}\phi^{0,14}S^{-1,58}$	0,90	10 %
Turbina de disco 6 aspas rectas	$Nu = 0,104Re^{2/3}Pr^{0,67}\phi^{0,14}S^{-0,73}$	0,91	5 %
Hélice plana	$Nu = 0,00336Re^{2/3}Pr^{0,89}\phi^{0,14}S^{-1,04}$	0,90	7 %
Hélice floreada	$Nu = 0,00139Re^{2/3}Pr^{0,76}\phi^{0,14}S^{-2,12}$	0,88	7 %

Tabla N°1.2 Modelos obtenidos para tanques calentados con ICS y diversos tipos de agitadores

Fuente: B. Miranda - Determinación de una correlación para estimar el coeficiente de película externo para serpentines en tanques agitados (2013)

La utilización de los modelos obtenidos por B. Miranda debe restringirse a fluidos newtonianos con las siguientes consideraciones:

$$1700 < Re < 6 \times 10^5$$

$$2,0 < Pr < 149$$

$$0,28 < D_a/D_T < 0,38$$

Bespalko S. et al (2019) “ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL EFECTO TÉRMICO DE LA REACCION EN LA DISOLUCIÓN DE ALGUNOS ÁLCALIS Y SALES CON MEZCLA NATURAL Y AGITACIÓN FORZADA”

Este trabajo de investigación se enfoca en estudiar las reacciones de disoluciones de sustancias químicas en agua que produzcan una liberación o absorción de calor significativa con el objetivo de estudiar:

- 1) La influencia de la concentración de la disolución en la temperatura y los cambios de entalpía.
- 2) La influencia de la agitación forzada y sin agitación en el efecto térmico de las reacciones de disolución.

La aplicabilidad de esta investigación esta direccionada principalmente en encontrar sustancias de trabajo, así como sus concentraciones, para sistemas termoquímicos de almacenamiento de calor y generación de frío. Las sustancias químicas seleccionadas para reacciones con absorción de calor (reacción endotérmica) fueron el nitrato de potasio KNO_3 , nitrato de amonio NH_4NO_3 , y para las reacciones con emisión de calor se seleccionaron el hidróxido de potasio KOH e hidróxido de sodio NaOH .

En la figura N°1.5 se presentan los resultados experimentales y aproximados de la variación de la temperatura respecto a la variación de las concentraciones de las sustancias químicas utilizadas en la investigación.

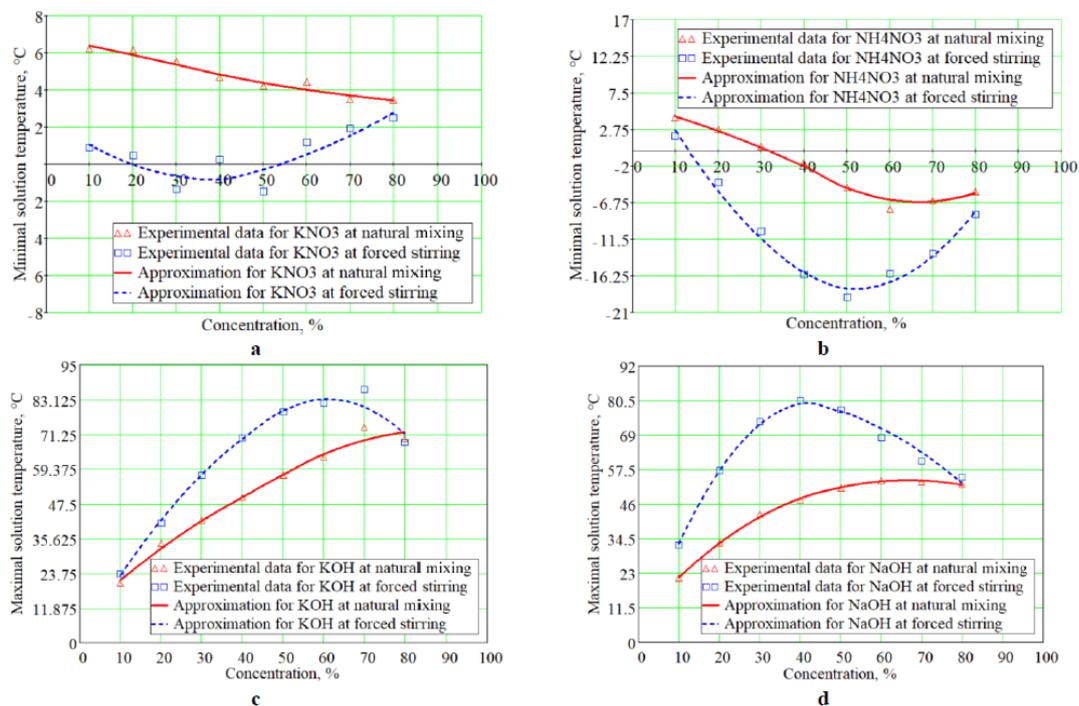


Figura N°1.5 Temperaturas extremas alcanzadas en las reacciones de disolución versus concentraciones de solución.

a) Disolución de KNO₃, b) Disolución de NH₄NO₃, c) Disolución de KOH, d) Disolución de NaOH.

Fuente: Estudio experimental del efecto térmico de la reacción en la disolución de algunos álcalis y sales con mezcla natural y agitación forzada, Universidad Tecnológica Estatal Cherkasy. Departamento de tecnologías energéticas / Ucrania – 2019

Los resultados muestran que, para mezcla natural (sin agitación), NH₄NO₃ y KOH son las sustancias de trabajo más apropiadas para enfriamiento y generación de calor respectivamente, mientras que, para disoluciones con agitación forzada, el NH₄NO₃ también muestra un buen desempeño para enfriamiento. En lo referente a generación de calor con agitación forzada el NaOH muestran un mejor desempeño que el KOH.

En esta investigación también se definen las concentraciones óptimas de las soluciones líquidas para lograr temperaturas extremas y cambios de entalpía máximos. Además, se encuentran correlaciones entre el cambio

de entalpía total del sistema calorimétrico y la concentración de la solución, para las soluciones líquidas más adecuadas.

1.4.2 Investigaciones nacionales

Velasco J. (2020) “DISEÑO, IMPLEMENTACIÓN Y ANÁLISIS TÉCNICO ECONÓMICO DE TANQUES REACTORES, SISTEMA DE AGITACIÓN Y CALENTAMIENTO PARA LA ELABORACIÓN DE ARTÍCULOS DE LIMPIEZA EN LA EMPRESA CORVELS S.R.L.”

El autor desarrolla un análisis técnico económico para el diseño de un tanque reactor o de mezclado para la fabricación de artículos de limpieza con el objetivo de estandarizar y mejorar la calidad de dichos productos.

Para la evaluación técnica y económica de las alternativas de diseño se basa en la norma VDI2225, desarrollando una matriz morfológica con los requerimientos o listado de exigencias para el diseño del tanque agitador.

También realiza un análisis de las principales variables físicas que intervienen en el proceso de mezclado, así como el cálculo de la energía necesaria para el funcionamiento del equipo.

Finalmente, el autor determina los costos del proyecto y la evaluación de indicadores económicos ($TIR = 61,67\% > TMAR = 15\%$) determinando la viabilidad de la ejecución del proyecto.

Huerto H. (2013) “ESTUDIO DEL FLUJO EN UN TANQUE AGITADOR VERTICAL DE IMPULSOR PTB CON SUPERFICIE LIBRE MEDIANTE EL PROGRAMA ANSYS CFX V.14.0”

El autor desarrolla un procedimiento para utilizar el programa Ansys CFX V.14.0 con el objetivo de modelar el comportamiento del flujo dentro de un tanque con agitador vertical e impulsor PBT ((Pitchet Blade Turbine - Turbina de paleta inclinada) para su comparación con resultados experimentales.

El autor explica generalidades técnicas, tales como tipos de agitadores, proporción geométrica de las dimensiones recomendadas en tanques agitadores, números adimensionales, ecuaciones matemáticas que gobiernan el comportamiento de los fluidos, estadísticas de mallado, así como la descripción de los principales modelos de turbulencia en CFD (Dinámica de Fluidos Computacional).

El análisis del modelamiento del flujo se realiza mediante modelos de turbulencia denominados k-Epsilon, k-Omega y Shear Stress Transport (SST) presentes en el programa Ansys V.14.0, los resultados del análisis del modelamiento fueron comparados con resultados experimentales de la curva de potencia (Re vs Np) del fabricante de agitadores Chemineer, para agitadores con impulsor PBT.

El autor determinó que el análisis realizado con el modelo de turbulencia SST es el que más se ajusta para modelar el comportamiento del flujo que se produce en un tanque agitador vertical de impulsor PBT con superficie libre y régimen estacionario, al presentar un error menor al 8% en la comparación con las curvas de potencia experimentales; con lo cual, concluye que la utilización del software Ansys versión 14.0 es válido para

simular comportamiento de flujo según las consideraciones indicadas por el autor.

Saenz P. (2016) “MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE CONDENSADO PARA REDUCIR PÉRDIDAS DE VAPOR EN EL ÁREA DE LAVANDERIA DEL HOSPITAL NACIONAL ESSALUD HUANCAYO”

El autor realiza una investigación en el sistema de condensado de los equipos que utilizan vapor en el área de lavandería del Hospital Nacional ESSALUD Huancayo, con el objetivo de reducir las pérdidas de vapor teniendo como hipótesis que la selección inadecuada de las trampas de vapor instaladas son la principal causa de las pérdidas de vapor en el área de lavandería.

Este trabajo inicialmente describe la problemática, define el alcance de la instalación que se analizará, también se describe instalaciones y conceptos técnicos típicos de una instalación que utiliza el vapor como fluido de calentamiento.

En el desarrollo de la investigación realiza un registro del estado situacional de las instalaciones y equipos, también realiza un registro de datos como tipos de trampa de condensado instalados, presiones, temperaturas, flujos de condensado. Con la información recopilada, mediante cálculos y tablas referenciales confirmó y calculó las pérdidas de vapor que se producían por las trampas de vapor del sistema de condensado.

La metodología establecida, es una investigación tecnológicamente experimental que considera la verificación de la reducción de las pérdidas de vapor con el registro de la información posterior a la implementación de las mejoras del sistema de condensado.

Como resultado de todo el análisis previo, determinó que la trampa de vapor de BALDE INVERTIDO es el adecuado, lo que verificó con la reducción de las pérdidas de vapor de 151,80 Kg/h a 20,70 kg/h.

En las tablas N°1.3 y N°1.4 se muestran el registro de los resultados antes y después de las mejoras implementadas respectivamente en los equipos térmicos del sistema de condensado.

NOMBRE DEL EQUIPO	DIFERENCIA DE TEMPERATURA ENTRE LA ENTRADA Y SALIDA DE LA TRAMPA (°C)	PRESION DE TRABAJO(psi)	PRESION DE DESCARGA (psi)	FLUJO DE CONDENSADO QUE DEBERIA SALIR A LA SALIDA DE LA TRAMPA EN Kg/h	FLUJO DE CONDENSADO REAL DESPUES DE LA TRAMPA EN Kg/h	PÉRDIDA DE VAPOR (kg/h) SIN MEJORA DEL SISTEMA DE CONDENSADO	% DE PÉRDIDA DE FLUJO
SECADORA N° 1	32	54	20	134.55	113.022	21.528	16
SECADORA N° 3	32	54	20	135.55	115.2175	20.3325	15
SECADORA N° 4	32	54	20	136.55	113.3365	23.2135	17
CALANDRIA N° 1	46	87	20	281.2	238.4576	42.7424	15.2
PRENSA PLANCHA N° 1	37	55	18	92.7	76.941	15.759	17
PRENSA PLANCHA N° 2	37	55	18	93.7	80.582	13.118	14
PRENSA PLANCHA N° 5	37	55	18	94.7	79.548	15.152	16

Tabla N°1.3 Datos registrados de los equipos térmicos antes de la mejora del sistema de condensado.

Fuente: Saenz, P. (2016) "MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE CONDENSADO PARA REDUCIR PÉRDIDAS DE VAPOR EN EL ÁREA DE LAVANDERIA DEL HOSPITAL NACIONAL ESSALUD HUANCAYO"

NOMBRE DEL EQUIPO	DIFERENCIA DE TEMPERATURA ENTRE LA ENTRADA Y SALIDA DE LA TRAMPA (°C)	PRESION DE TRABAJO(psi)	PRESION DE DESCARGA (psi)	FLUJO DE CONDENSADO QUE DEBERIA SALIR A LA SALIDA DE LA TRAMPA EN Kg/h	FLUJO DE CONDENSADO REAL DESPUES DE LA TRAMPA EN Kg/h	PÉRDIDA DE VAPOR (kg/h) SIN MEJORA DEL SISTEMA DE CONDENSADO	% DE PÉRDIDA DE FLUJO DE VAPOR
SECADORA N° 1	32	54	19	125.6	123.088	2.512	2
SECADORA N° 3	32	54	19	123.4	120.315	3.085	2.5
SECADORA N° 4	32	54	19	127.3	124.754	2.546	2
CALANDRIA N° 1	46	87	20	281.2	274.4512	6.7488	2.4
PRENSA PLANCHA N° 1	37	55	17	84.28	82.51012	1.76988	2.1
PRENSA PLANCHA N° 2	37	55	17	85.28	83.148	2.132	2.5
PRENSA PLANCHA N° 5	37	55	17	83.28	81.28128	1.99872	2.4

Tabla N°1.4 Datos registrados de los equipos térmicos posterior a la mejora del sistema de condensado.

Fuente: Saenz, P. (2016) "MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE CONDENSADO PARA REDUCIR PÉRDIDAS DE VAPOR EN EL ÁREA DE LAVANDERIA DEL HOSPITAL NACIONAL ESSALUD HUANCAYO"

CAPÍTULO II

MARCOS TEÓRICO Y CONCEPTUAL

2.1 Marco teórico

2.1.1. Transferencia de calor

Según Kern D. (1999 Ed.31) "*Procesos de Transferencia de Calor*", la ciencia de la transferencia de calor está relacionada con la razón de intercambio de calor entre cuerpos calientes y fríos llamados fuente y receptor respectivamente. Este enfoque realza la importancia de las diferencias de temperatura entre la fuente y el receptor, lo que es, después de todo, el potencial por el cual la transferencia de calor se lleva a efecto.

El autor, explica que existen tres formas o mecanismos en las que el calor puede pasar de la fuente al receptor, aun cuando muchas de las aplicaciones en la ingeniería son combinaciones de dos o tres de estos mecanismos. Estas son, conducción, convección y radiación.

- **Conducción:** es la transferencia de calor a través de un material fijo, en la figura 2.1 se muestra una pared estacionaria donde se observa que la dirección del flujo de calor es perpendicular a la pared, considerando que las superficies de las paredes son isotérmicas y el cuerpo es homogéneo e isotrópico.

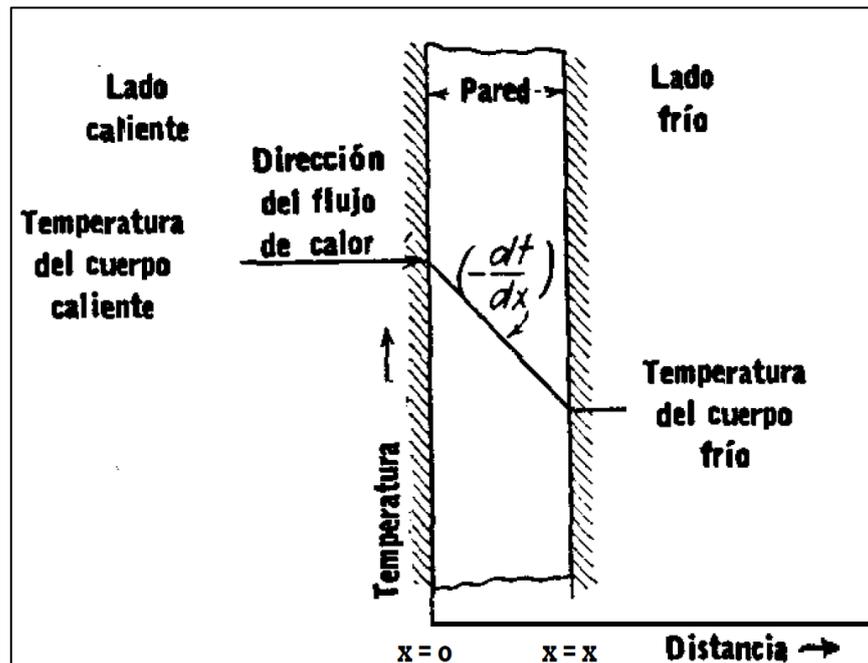


Figura N°2.1 Flujo de calor a través de una pared

Fuente: Kern D. (1999 Ed.31) "Procesos de Transferencia de Calor"

$$dQ = kA \left(- \frac{dt}{dx} \right) \quad (2.1)$$

dQ : Cantidad de flujo de calor

k : Conductividad térmica

A : Área de la pared

$(-dt/dx)$: Gradiente de temperatura

- **Convección:** es la transferencia de calor por medio de la mezcla entre partes calientes y frías de un fluido. Existen dos tipos de transferencia de calor por convección:
 - Convección natural o convección libre, es cuando el mezclado para la transferencia de calor del fluido se da sin intervención de algún mecanismo externo.

- Convección forzada, es cuando se utiliza algún mecanismo externo (por ejemplo, un agitador) para el mezclado para la transferencia de calor.

$$dQ = hA dt \quad (2.2)$$

dQ : Cantidad de flujo de calor

h : Coeficiente de convección

A : Área del cuerpo en contacto con el fluido

dt : Gradiente de temperatura

- **Radiación:** es la transferencia de energía radiante (radiación de tipo electromagnética) desde una fuente a un receptor. Cuando la radiación se emite desde una fuente a un receptor, parte de la energía absorbe el receptor y parte es reflejada por él. Basándose en la segunda ley de la termodinámica, Boltzmann estableció que la velocidad a la cual una fuente da calor es

$$dQ = \sigma \epsilon dA T^4 \quad (2.3)$$

dQ : Cantidad de flujo de calor

σ : Constante de Boltzmann ($k = 1,380649 \times 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{K}$)

ϵ : Emisividad del cuerpo radiante

dA : Área del cuerpo radiante

T : Temperatura absoluta del cuerpo radiante

2.1.2. Intercambiador de calor

Según Carrizales R. (2011) *“Guía para la selección de Intercambiadores de calor”*, un intercambiador de calor (IC) es un dispositivo en el que se realiza un intercambio de calor entre dos fluidos que están separados por una pared metálica, esta pared representa la superficie de transferencia de calor y puede tener diversas geometrías.

En la industria, se utilizan intercambiadores de calor de diferentes tipos, por lo tanto, elegir el equipo de transferencia de calor más adecuado es una gran labor que se tiene que realizar teniendo en consideración las condiciones de operación del proceso como son: fluidos, flujos, temperaturas, presiones de operación, peligrosidad y agresividad química de los fluidos, entre otras variables. Con esto se puede dimensionar el IC y estimar el costo aproximado de las distintas alternativas posibles.

A continuación, se presentan varios tipos de intercambiadores de calor de acuerdo a su tamaño (superficie de transferencia) y aplicación.

- IC de tubo en espiral.
- IC de doble tubo o tubos concéntricos.
- IC compactos:
 - En espiral.
 - De placa y armazón.
- IC de carcasa y placas.
- IC de carcasa y tubos.

- IC enfriado por aire.
- IC de contacto directo.

2.1.3. Agitadores

Martínez Y. (2011) en su guía experimental “Laboratorio de Ingeniería de Alimentos” menciona que la agitación se puede definir como el movimiento inducido a un fluido dentro de un contenedor (principalmente de forma cilíndrica) para generar vórtices e incrementar la transferencia de calor o preparar una mezcla. En el caso de que la agitación sea para una mezcla, una de las fases debe ser un fluido mientras que la otra puede ser sólido en forma granular, líquidos o gases, como ocurre en los casos siguientes:

- Disolución de partículas sólidas
- Mezclado de líquidos
- Dispersión de un gas en un líquido en forma de pequeñas burbujas.
- Dispersión de un segundo líquido, inmiscible con el primero, para formar una emulsión o suspensión de gotas diminutas.
- Incrementar la transmisión de calor entre líquidos y un serpentín o camisa.

En aplicaciones industriales el diseño de la agitación considera dos factores:

- Grado de homogeneidad deseado.
- Tiempo de agitación.

Según se muestra en la figura 2.2 entre los principales tipos de agitadores tenemos agitadores de paleta, hélice y turbina. Con los cuales se puede resolver la mayoría de casos de agitación de líquidos

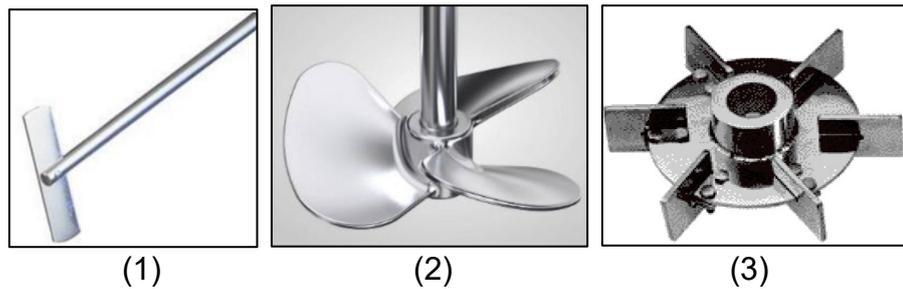


Figura N°2.2 Tipos de agitadores (1) Agitador de paleta, (2) Agitador de hélice, (3) Agitador de turbina.

Fuente: Heras M. (2016) "Diseño de un tanque de agitación" / UDLAP

2.1.4. Intercambiadores de calor de tubo en espiral

Ardila J. et al (2012) en su artículo "Intercambiadores de calor (IC) de tubo en espiral" menciona la creciente utilización de este tipo de dispositivos en la industria, debido a que tienen una significativa mejor tasa de transferencia y volumen compacto en comparación a intercambiadores de calor de tubos rectos con la misma área de transferencia de calor. Según investigaciones la mejor eficiencia de un IC de tubo en espiral es debido

a la formación de flujos secundarios al interior de los tubos que generan turbulencia (Dean, 1928) mejorando así la transferencia de calor, pero por otro lado también se generan incrementos en las caídas de presión.

Para el estudio de este tipo de intercambiadores de calor, el autor menciona que se han desarrollado una serie de correlaciones en paquetes computacionales comerciales de dinámica de fluidos (CFD, Computational Fluid Dynamics) las cuales fueron contrastadas con datos experimentales y que permiten predecir los coeficientes de convección y factores de fricción para su utilización en los cálculos de ingeniería.

En este artículo, el autor presenta la siguiente clasificación para este tipo de intercambiadores de calor (IC):

- IC de coraza y tubo en espiral plano o espiral helicoidal.
- IC de tubo en espiral para tanques o reservorios.
- IC de (a) tubo torsionado, (b) membrana helicoidal y (c) hélice rectangular.

Para el diseño de intercambiadores de calor de tubo en espiral el autor del presente trabajo menciona que todo diseño implica su dimensionamiento para la satisfacción de los requerimientos energéticos de cada situación particular. La particularización de cada diseño se cuantifica mediante correlaciones o ecuaciones que consideran las variables físicas o

químicas presentes en el proceso de calentamiento o enfriamiento en estos tipos de intercambiadores de calor. A continuación, el autor presenta algunas correlaciones utilizadas en el diseño.

La ecuación (2.4) permite conocer el área de transferencia (A) asociada a un flujo de calor (Q) referido al cambio de temperatura media (ΔT_m) apropiado y a un coeficiente global de transferencia de calor (U).

$$Q = UA\Delta T_m \quad (2.4)$$

En la ecuación (2.5) se muestra este flujo de calor en función del flujo másico del fluido (\dot{m}) de su calor específico (C_p) a presión constante y de la variación de la temperatura del fluido, considerando que no existe cambio de fase en los fluidos.

$$Q = \dot{m}c_p\Delta T_f \quad (2.5)$$

La temperatura media (ΔT_m) depende de los cambios de temperatura de los fluidos (ΔT_f) a enfriar o calentar, según lo requerido para satisfacer las condiciones de diseño. Para el cálculo de la temperatura media, comúnmente se utiliza la expresión (2.6) denominada “cambio de temperatura medio logarítmico” que está en función de los incrementos de temperatura de entrada y salida de los fluidos.

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} \quad (2.6)$$

En la ecuación (2.7) se muestra el coeficiente global de transferencia de calor (U) para intercambiadores de calor de tubo en espiral, los subíndices i , o se refieren a las superficies interna y externa del tubo.

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln(D_o/D_i)}{2\pi k L} + \frac{1}{h_o A_o} \quad (2.7)$$

Donde:

h_i : coeficiente convectivo interior de transferencia de calor

h_o : coeficiente convectivo exterior de transferencia de calor

A_i : área de la superficie interior del tubo

A_o : área de la superficie exterior del tubo

D_i : diámetro interior del tubo

D_o : diámetro exterior del tubo

L : longitud del tubo

k : conductividad térmica del material del tubo

El principal problema para los cálculos en el diseño de este tipo de IC está en determinar los coeficientes convectivos de transferencia de calor (h_i , h_o) que resulten adecuados para la configuración de tubos en espiral. En la expresión (2.8) se muestra una correlación empírica para el cálculo de h en tubos curvados.

$$Nu = \frac{h D}{k_f} = f(De, Pr) \quad (2.8)$$

Donde:

D : Diámetro del tubo en espiral

h : Coeficiente convectivo

k_f : Conductividad térmica del fluido

De : Número de Dean

Pr : Numero de Prandtl

El desarrollo del número de Dean, Prandtl y Reynold se muestran en las expresiones (2.9), (2.10) y (2.11).

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k_f} \quad (2.9)$$

$$De = Re \sqrt{\frac{r}{R}} \quad (2.10)$$

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (2.11)$$

Donde:

μ : Viscosidad del fluido

ρ : Densidad

V : Velocidad media del flujo

r : Radio del tubo

R : Radio de curvatura de la espira

En las ecuaciones (2.12) y (2.13) se muestran otras correlaciones propuestas por Srinivasan e Ito respectivamente, para el cálculo del número de Reynolds crítico en tubos curvados.

$$Re_c = 2100 \left(1 + 12 \sqrt{\frac{r}{R}} \right) \quad (2.12)$$

$$Re_c = 2000 \left(1 + 13,2 \left(\frac{r}{R} \right)^{0,6} \right) \quad (2.13)$$

Donde:

r : Radio del tubo

R : Radio de curvatura de la espira

Para el cálculo de la caída de presión a través del IC el autor presenta a la ecuación (2.14).

$$\Delta p = f \frac{\rho V^2 L}{2 D} \quad (2.14)$$

Donde:

f : Factor de fricción (Darcy –Weisbach)

D : Diámetro del tubo en espiral

ρ : Densidad

V : Velocidad media del flujo

L : Longitud del tubo

2.2 Marco conceptual

A continuación, se detallan el marco conceptual de los términos empleados en el presente trabajo:

2.2.1 Agitación

Se refiere a forzar un fluido por medios mecánicos para que adquiera un movimiento generalmente circulatorio en el interior de un recipiente.

2.2.2 Agitador

Elemento mecánico que se encuentra en contacto con los fluidos para generar corrientes de agitación o mezclado. También denominado impelente.

2.2.3 Aislamiento

Recubrimiento con material de baja conductividad térmica, de una superficie que separa ambientes a distintas temperaturas para disminuir el flujo de calor del ambiente de mayor temperatura hacia el de menor temperatura.

2.2.4 Chaqueta

Intercambiador de calor (para enfriar o calentar) instalado externamente al recipiente donde está contenido el material que se requiere calentar o enfriar.

2.2.5 Disolución

Se denomina disolución a la solución oxidante (SO) en fase líquida como resultado de la mezcla homogénea a nivel iónico o molecular del nitrato de amonio (solute) disuelto en agua (solvente o disolvente).

2.2.6 Serpentin

Intercambiador de calor que es construido a partir de tubos metálicos que se doblan en forma helicoidal plana o cilíndrica y que se sumerge en el fluido a enfriar o calentar. Este dispositivo se utiliza conjuntamente con tanques y puede operar por convección natural o forzada.

2.2.7 Solubilidad

Capacidad de disolverse para una sustancia denominada soluto en un determinado medio denominado solvente; el cual mide la máxima cantidad de soluto disuelto en una cantidad de solvente a una determinada presión y temperatura fija, en cuyo caso se denomina que la solución está saturada.

2.2.8 Cristalización

Método para separar los componentes sólidos de alguna disolución o mezcla homogénea. Los cristales del componente sólido se obtienen al enfriar una disolución saturada en caliente.

CAPÍTULO III

HIPÓTESIS Y OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

3.1 Hipótesis general

El diseño de un tanque disolvedor de 25 t/h permitirá conocer los factores que influyen en la reducción del tiempo de elaboración de la solución oxidante.

3.2 Operacionalización de variables

En la tabla 3.1. se muestra la operacionalización de variables del presente trabajo.

VARIABLES	INDICADORES
<p>Variable dependiente:</p> <p>Tiempo de elaboración de solución oxidante (h).</p>	<p>- Temperaturas (°C), tiempos de calentamiento (h, min), flujo (kg/h) y presión de vapor saturado (bar, psi), área de transferencia de calor del serpentín de calentamiento (m²), velocidad de rotación del agitador (RPM), flujo masico de alimentación de nitrato de amonio (kg/min).</p>
<p>Variable independiente:</p> <p>Tanque disolvedor de 25 t/h</p>	<p>- Tiempo (h, min), volumen de preparación de solución oxidante (m³), volumen del tanque (m³).</p>

Tabla N°3.1 Operacionalización de variables

Fuente: Elaboración propia - 2022

CAPÍTULO IV

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

4.1 Tipo de la investigación

El tipo de investigación realizado según su enfoque, se define según las características epistemológicas siguientes:

- **Percepción de la realidad:** el trabajo será **objetivo** debido a que se estudiará y comprenderá una realidad específica a través de la recopilación de datos físicos y características de las instalaciones para la preparación de SO.
- **Razonamiento:** el trabajo será **deductivo** por que se analizará las variables que influyen en el proceso de preparación de SO basados en teorías de referencia específicas y que luego se contrastará con la hipótesis.
- **Finalidad:** se **comprobará** los resultados para las condiciones particulares de este trabajo mediante la investigación empírica.
- **Orientada:** el trabajo está orientado al **resultado**, porque el objetivo es reducir el tiempo de preparación de SO.
- **Principio de verdad:** los resultados o conclusiones serán aplicables a sistemas de preparación de SO **similares**, o con las mismas condiciones **particulares**.

- **Perspectiva del investigador:** el trabajo será de tipo **cuantitativo** porque se analizará el proceso de preparación de SO con los datos o información recolectada.
- **Causalidad:** el trabajo será **cuantitativo** porque se analizará la interacción de factores que influyen en el tiempo de preparación de la SO.

Se determina que es una investigación de tipo **cuantitativo** debido a que, de las 7 características epistemológicas de la investigación, 5 son del tipo cuantitativo (percepción de la realidad, razonamiento, finalidad, orientación, principio de verdad) y 2 de tipo cualitativo (perspectiva del investigador, causalidad).

El alcance de esta investigación es correlacional o explicativa, porque analizará las variables del proceso de preparación de SO para el diseño de un tanque disolvedor de 25 t/h.

4.2 Diseño de la investigación

La investigación será de tipo no experimental, porque se desarrollará el diseño del tanque disolvedor de 25 t/h, basado en investigaciones y literatura especializada, así como de la información recopilada para comprobar la hipótesis planteada.

4.3 Unidad de análisis

El presente trabajo de investigación utiliza como unidad de análisis el tanque disolvedor para elaboración de solución oxidante TQ-03, de la planta de producción de emulsión a granel de la empresa ORICA S.A., como se muestra en la figura N°4.1 esta planta se encuentra ubicada en el distrito de Congata, provincia y departamento de Arequipa a una altitud de 1973 m s.n.m..

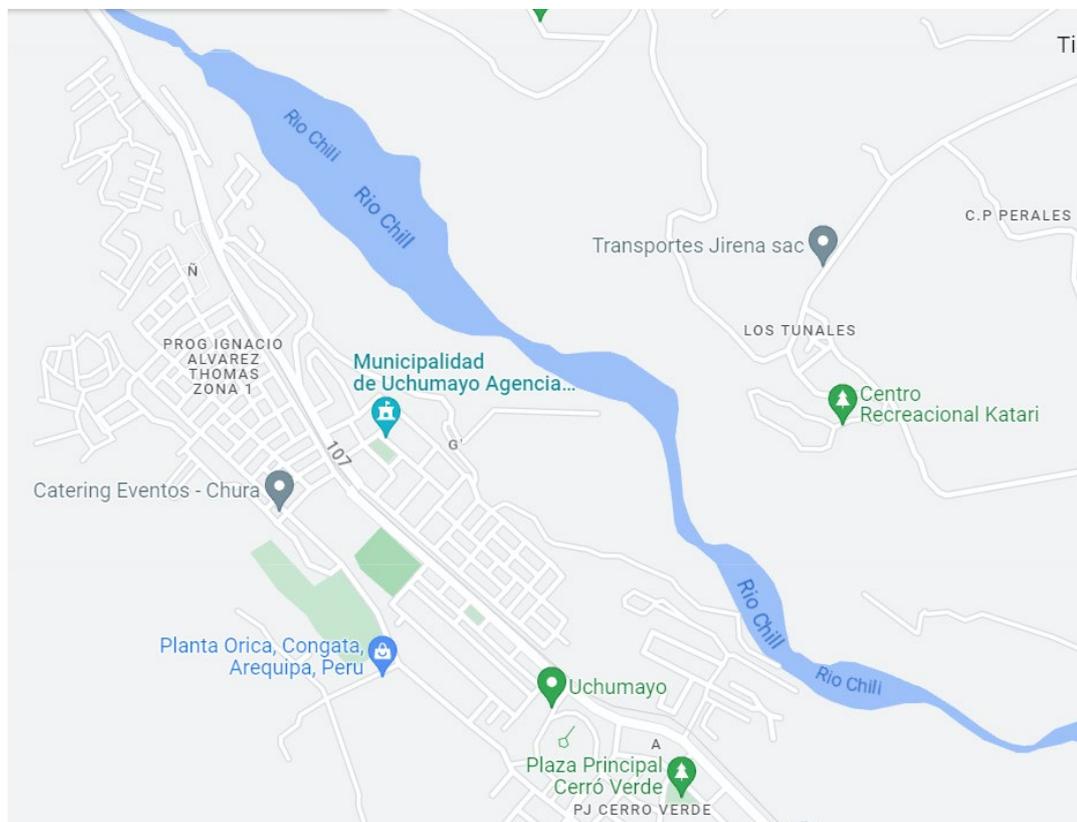


Figura N°4.1 Ubicación de planta Orica, Congata, Arequipa, Perú

Fuente: Google maps (2023)

El tanque disolvedor TQ-03 para elaboración de SO es un equipo fabricado en acero inoxidable equipado para el calentamiento y disolución con un ICS y un agitador de turbina de paletas inclinadas.

4.4 Matriz de consistencia

Tabla N°4.1: Matriz de consistencia

DISEÑO DE UN TANQUE DISOLVEDOR DE 25 t/h PARA REDUCIR EL TIEMPO DE ELABORACIÓN DE SOLUCIÓN OXIDANTE

PROBLEMA	OBJETIVO	HIPÓTESIS	VARIABLES		INDICADORES	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCION DE DATOS
			DEPENDIENTE	INDEPENDIENTE		
¿De qué manera el diseño de un tanque disolvedor de 25 toneladas por hora influye en la reducción del tiempo de elaboración de solución oxidante?	Diseñar un tanque disolvedor de 25 toneladas por hora (t/h) para reducir el tiempo de elaboración de solución oxidante.	El diseño de un tanque disolvedor de 25 t/h permitirá conocer los factores que influyen en la reducción del tiempo de elaboración de la solución oxidante.	Tiempo de elaboración de solución oxidante (h).	Tanque disolvedor de 25 t/h.	-Temperaturas (°C), tiempos de calentamiento (h, min), flujo (kg/h) y presión de vapor saturado (bar, psi), área de transferencia de calor del serpentín de calentamiento (m ²), velocidad de rotación del agitador (RPM), flujo masico de alimentación de nitrato de amonio (kg/min). -Tiempo (hr, min), volumen de preparación de solución oxidante (m ³), volumen del tanque (m ³).	Registro de la medición de temperatura, presión y tiempos mediante termómetros, manómetros y cronómetros.

Fuente: Elaboración Propia (2022)

CAPÍTULO V

DESARROLLO DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

5.1 Proceso de elaboración de solución oxidante (SO)

La empresa ORICA en sus instalaciones ubicada en distrito de Congata-Arequipa, produce aproximadamente 9 000 t/mes de emulsión a granel con un flujo masico promedio de producción de 220 kg/min, teniendo como perspectiva para el 2022 el aumento del flujo de producción a 375 kg/min para lograr una producción aproximada de 15 000 t/mes. Este aumento en el flujo de producción es impulsado principalmente por un aumento en la demanda de emulsión a granel por parte de la minera Cerro Verde quienes se proyectan “elevar para el 2022 su producción cuprífera y llegar a las 400 000 t/día, es decir, a los volúmenes prepandemia que registró en el 2019” según publicación de febrero del 2022 del portal de internet del Instituto de ingenieros de minas del Perú.

El incremento del flujo de producción requiere de un aumento de la capacidad de suministro de servicios y materias primas, así como del aumento del flujo de producción de semielaborados como son principalmente:

- Solución Oxidante (SO)
- Solución combustible (SC)

Considerando la limitación en la capacidad de producción, la problemática con los actuales tanques disolvedores para elaboración de SO y frente a la necesidad del aumento del flujo de producción de la PEG de 200 kg/min a 375 kg/min, es que la presente investigación se enfoca en el diseño de un tanque disolvedor de mayor capacidad de producción (25 t/h) que reduzca el tiempo de elaboración de SO respecto al tanque disolvedor TQ-03, considerando las variables de operación que influyen en este tipo de equipos y procesos.

La SO es una disolución química a nivel iónico del Nitrato de Amonio NH_4NO_3 en agua. El NH_4NO_3 (solute) es una sal incolora e higroscópica, altamente soluble en agua (solvente), formada por iones nitrato NO_3^- y amonio NH_4^+ , que interaccionan fuertemente con las moléculas del agua al disolverse.

Como se muestra en la figura N°5.1, termodinámicamente, este proceso de disolución del nitrato de amonio, consiste en 2 etapas:

- Etapa 1: ruptura de las atracciones soluto-solute. En esta etapa se produce la descomposición del nitrato de amonio por la disociación de los iones nitrato NO_3^- y amonio NH_4^+ , en cuyo proceso se absorbe calor, también denominado energía reticular o de red (U) para el caso de las sales. Siendo por tanto esta etapa 1, un proceso endotérmico.

- Etapa 2: formación de atracciones solvente-soluto. En esta etapa se produce la hidratación con el agua (H_2O) de los iones nitrato NO_3^- y amonio NH_4^+ , en esta parte del proceso se emite calor, también denominado energía de solvatación o hidratación. Por lo tanto la etapa 2 es un proceso exotérmico.

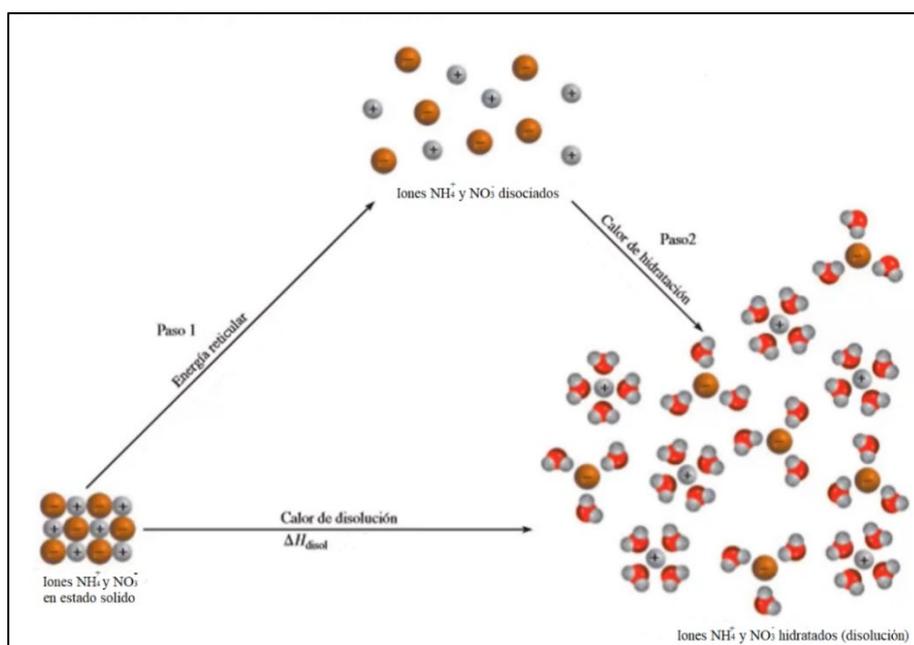


Figura N°5.1 Proceso de disolución del nitrato de amonio en agua
Fuente: Elaboración propia (2022)

El valor del cambio de entalpía global o energía para la disolución es la suma de los cambios de entalpía individuales de cada etapa.

$$\Delta H_{\text{disol}} = U + \text{Calor de hidratación}$$

Al disolver nitrato de amonio en agua, se observa que, de forma global, la temperatura en el proceso de disolución desciende, por lo tanto, considerando las 2 etapas de la disolución resulta un proceso endotérmico. Esto se debe a

que el calor de hidratación no compensa el gasto de energía aplicada para romper la estructura cristalina. El proceso de disolución del nitrato de amonio (NH_4NO_3) en agua se representa químicamente por la siguiente expresión:



En la figura N° 5.2 y figura N°5.3. se muestra la variación de la temperatura y entalpia de la disolución para diferentes concentraciones de nitrato de amonio en agua.

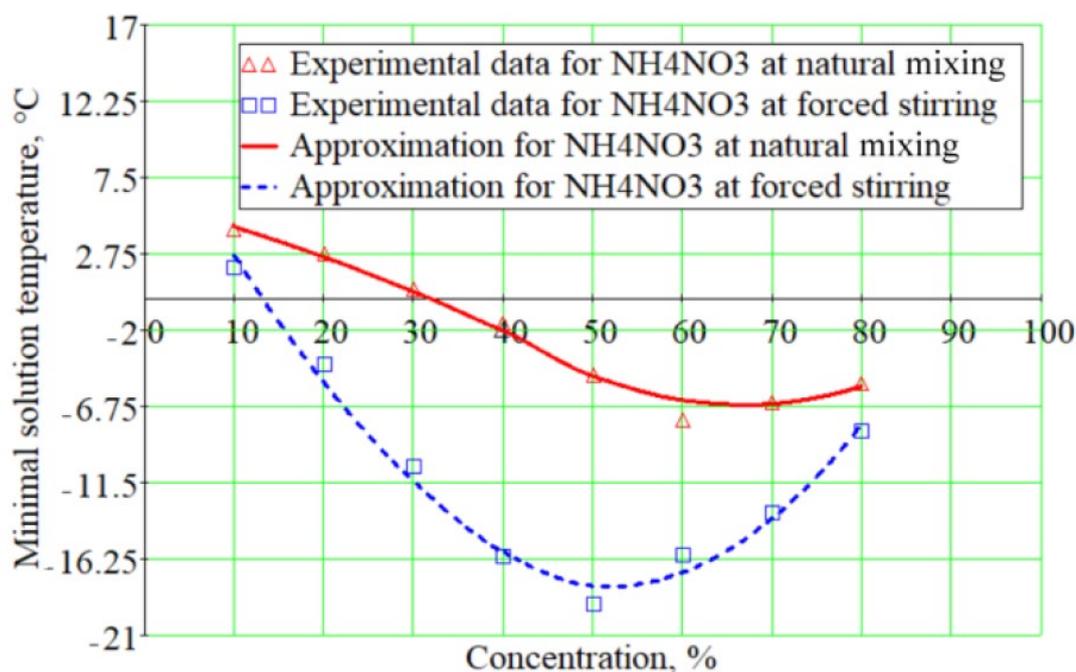


Figura N°5.2 Temperatura alcanzada versus concentraciones en la disolución de NH_4NO_3

Fuente: Estudio experimental del efecto térmico de la disolución reacción de algunos álcalis y sales con mezcla natural y agitación forzada, Universidad Tecnológica Estatal Cherkasy. Departamento de tecnologías energéticas / Ucrania – 2019

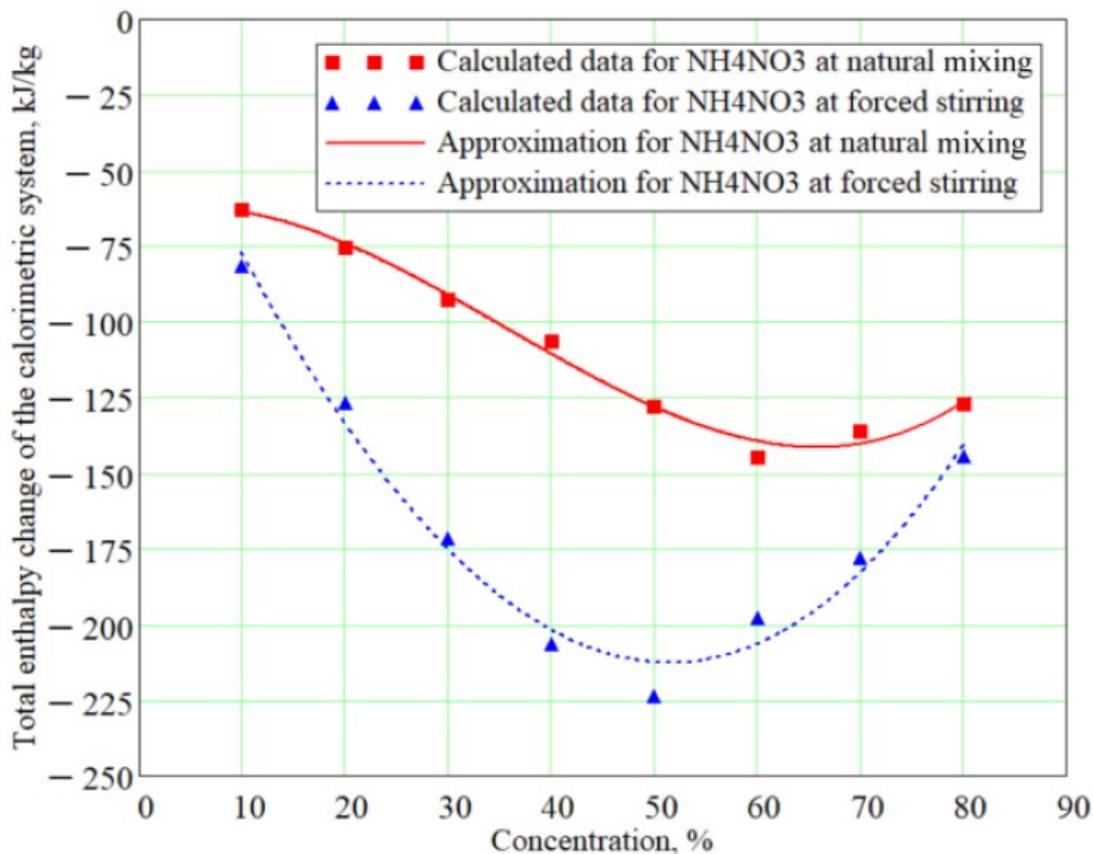


Figura N°5.3 Variación de la entalpia versus concentraciones en la disolución de NH₄NO₃

Fuente: Estudio experimental del efecto térmico de la disolución reacción de algunos álcalis y sales con mezcla natural y agitación forzada, Universidad Tecnológica Estatal Cherkasy. Departamento de tecnologías energéticas / Ucrania – 2019

De manera descriptiva los pasos para elaboración de SO son los siguientes:

1. Llenado de agua al tanque disolvedor. El volumen o masa total de agua en el tanque disolvedor está determinado por la proporción calculada en la formulación según las toneladas de SO a elaborar.
2. Arranque de agitador del tanque disolvedor.
3. Suministro de vapor saturado a 4 barg (60 psig) al ICS para calentamiento del agua.
4. Suministro de nitrato de amonio en forma dosificada al tanque disolvedor. El peso total de nitrato de amonio en el tanque disolvedor

está determinado por la proporción calculada en la formulación, según las toneladas de SO a elaborar.

5. Agitar y calentar hasta la completar disolución del nitrato de amonio en el agua llegando a una temperatura final aproximada de 80 °C.

En la figura N° 5.4 se muestran los pasos para el proceso de elaboración de SO en un tanque disolvedor:

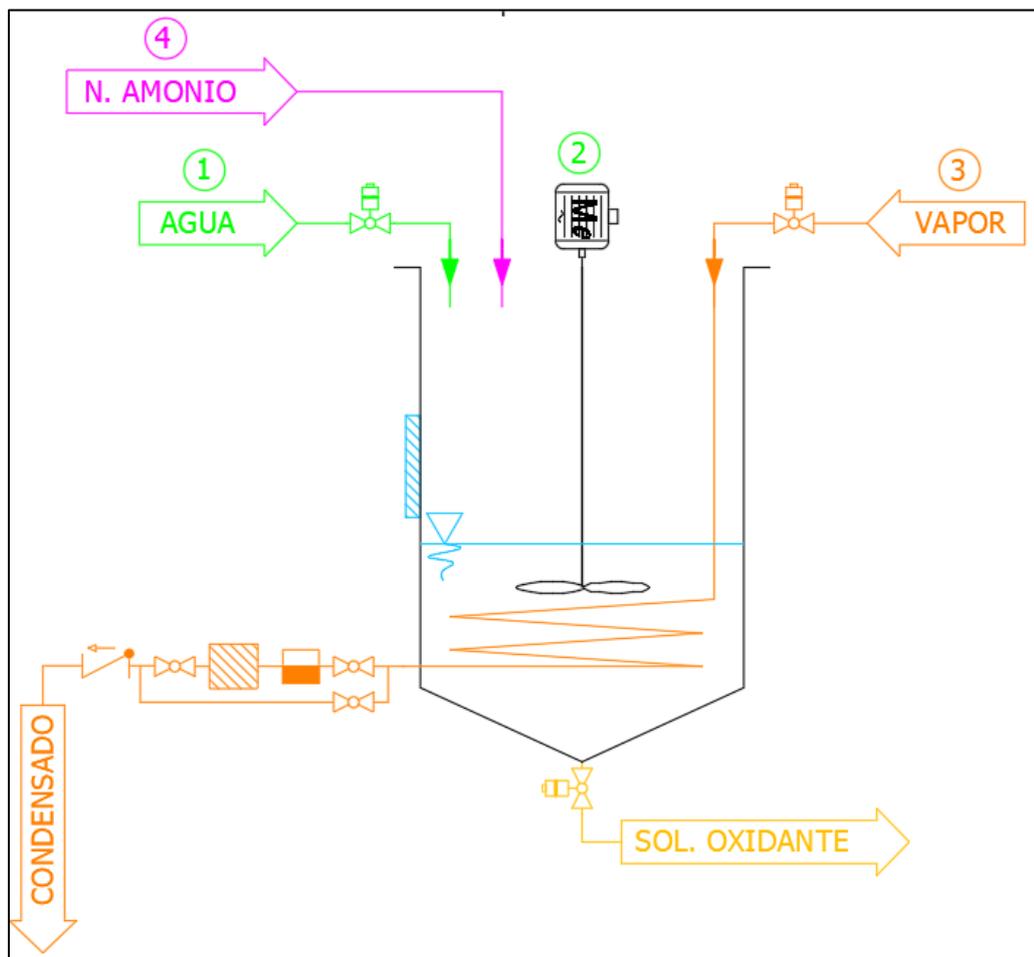


Figura N°5.4 Proceso de elaboración de SO en un tanque disolvedor
Fuente: Elaboración Propia. (2022)

Respecto a la seguridad, la elaboración de la SO representa peligros tanto para las instalaciones fabriles como para el personal que participa en el proceso, en la tabla N°5.1 se muestran los principales peligros identificados.

Toxicidad aguda 5 (oral)	Toxicidad aguda (oral), Categoría 5
Irritante ocular 2A	Lesiones oculares/irritación ocular graves, Categoría 2A
Líquido oxidante 3	Líquidos oxidantes, Categoría 3
Sólido oxidante 3	Sólidos oxidantes, Categoría 3
H272	Puede intensificar el fuego; oxidante
H303	Puede resultar nocivo en caso de ingestión
H319	Provoca irritación ocular grave

Tabla N°5.1 Clases de peligro de la disolución de nitrato de amonio (NH_4NO_3) en agua

Fuente: Hoja de datos de seguridad de solución de nitrato de amonio, solución de sal de amonio en ácido nítrico – ORICA - México (2015)

Según los peligros identificados para el personal, el equipo de protección personal (EPP) debe estar compuesto por:

- Protección para la piel y para el cuerpo: ropa protectora ignífuga o de combustión lenta, fabricado en materiales y telas químicamente resistentes.
- Protección para las manos: guantes protectores.
- Protección ocular y facial: lentes de seguridad contra productos químicos.
- Protección respiratoria: Si se exceden los límites de exposición o experimenta irritación, se debe utilizar protección respiratoria aprobada. Esta protección respiratoria también debe aplicarse en caso de ventilación inadecuada, atmósfera deficiente en oxígeno, o donde no se conocen los niveles de exposición.

Así mismo en las instalaciones de elaboración de SO también se deberá contar con controles de ingeniería apropiados, como:

- Fuentes de emergencia para enjuagarse los ojos y duchas de seguridad disponibles en la cercanía inmediata de cualquier exposición potencial.
- Ventilación adecuada, especialmente en áreas reducidas.

Además de lo mencionado se debe asegurar de cumplir con todas las regulaciones nacionales y locales. Dependiendo del tipo de instalación, se deben utilizar detectores de gas cuando exista la posibilidad de liberación de gases o vapores inflamables, así como seguir los procedimientos de conexión a tierra para evitar la electricidad estática.

En el proceso se debe tener las siguientes precauciones:

- Evitar calentar el nitrato de amonio de grado técnico (nitrato utilizado en la elaboración de SO) en un espacio confinado por encima de los 170 °C (338 °F). Los procesos que involucren este tipo de nitrato deberán estar diseñados para evitar esta posibilidad.
- Evitar el calentamiento localizado (trabajos en caliente) del nitrato de amonio grado técnico, que potencialmente lleve al desarrollo de áreas de alta temperatura.
- Evitar la introducción de gases en soluciones de nitrato de amonio de alta concentración y calientes.
- Mantener el nitrato de amonio (no es combustible por sí mismo) separado de materiales combustibles. El nitrato de amonio al ser

un oxidante aumentará significativamente la tasa de combustión de los materiales combustibles.

- El nitrato de amonio confinado y en presencia de una fuente detonante, puede explotar cuando está sujeto a una presión repentina de choque, o altas temperaturas.

5.2 Diseño del actual tanque disolvedor TQ-03

En esta etapa de la investigación, se registró información referente a las características constructivas y operativas del actual tanque disolvedor de SO denominado TQ-03, el cual se probó para una capacidad de producción 20 t de SO resultando con un tiempo de 3,5 h.

En la figura N°5.5 se muestra las partes principales del TQ-03

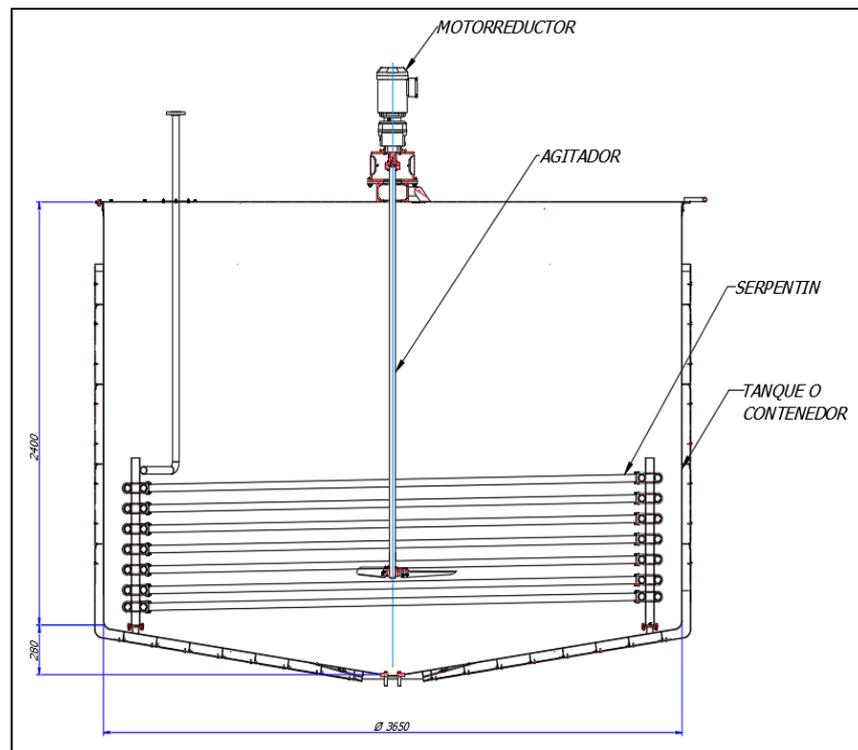


Figura N°5.5 Tanque de disolución TQ-03 – partes principales
Fuente: Elaboración Propia. (2022)

A continuación, se describen cada una de las partes principales que componen el actual tanque disolvedor TQ-03.

- **Tanque (cuerpo principal)**

El tanque o cuerpo principal está construido en acero inoxidable 304, es de forma cilíndrica, fondo cónico y techo o tapa plana con aislamiento exterior de fibra de vidrio en la parte cilíndrica y en el fondo. Las superficies con aislamiento también están recubiertas con lamina de acero inoxidable. Las especificaciones registradas son las siguientes:

- Diámetro = 3,65 m
- Altura del cilindro = 2,4 m
- Altura fondo cónico = 0,28 m
- Espesor de plancha = 3 mm
- Espesor del aislamiento = 50 mm
- Espesor de cobertura metálica del aislamiento = 0,5 mm
- Volumen total = 26,1 m³

- **Serpentín**

El IC del tanque disolvedor es de tipo serpentín, el cual opera con vapor saturado a una presión de 4 barg, está construido con tubería de acero

inoxidable 304 con conexiones de ingreso y salida de vapor por la parte superior del tanque. Las especificaciones registradas son las siguientes:

- Área de transferencia de calor = 20,4 m² (220 pies²)
- Serpentin: DN1.1/2" Sch 40, Inox. 304 sin costura (SC)
- Conexión del serpentín: Brida 1.1/2" ANSI 150 lbs

- **Agitador**

El tanque disolvedor está equipado con un agitador fabricado en acero inoxidable 304, con un impelente tipo turbina con resalte y un motorreductor SEW montado exteriormente en el techo del tanque sobre 2 vigas tipo C de 4"x2" que se acopla al eje del agitador mediante una brida. Las especificaciones registradas son las siguientes:

- Motorreductor eléctrico: SEW 2.2 kW, 1762/70 RPM
230/460 V, 60 Hz 3φ IP55.
- Eje del agitador: DN 2.1/2" Sch 40, Inoxidable 304 SC,
Longitud 2 m.
- Impelente: Diámetro 0,8 m, 3 aspas, espesor de aspas 3/8",
Inoxidable 304.

- **Sistema de control de ingreso de vapor, control de temperatura y descarga de condensado**

El calor utilizado para la elaboración de la SO proviene del vapor saturado que ingresa al serpentín del tanque. Para generar vapor se utiliza una caldera de 175 BHP que entrega vapor saturado a 7 barg que es transportado a través de una tubería de acero al carbono de DN 4" Sch 40 hasta el TQ-03. Previo al ingreso del vapor al serpentín del tanque, la presión del vapor es regulado de 7 barg a 4 barg. Como se muestra en la figura N°5.6 el calentamiento y control de la temperatura en el tanque de elaboración de SO está conformado por:

- Sistema de ingreso de vapor y control de temperatura
- Sistema de descarga de condensado

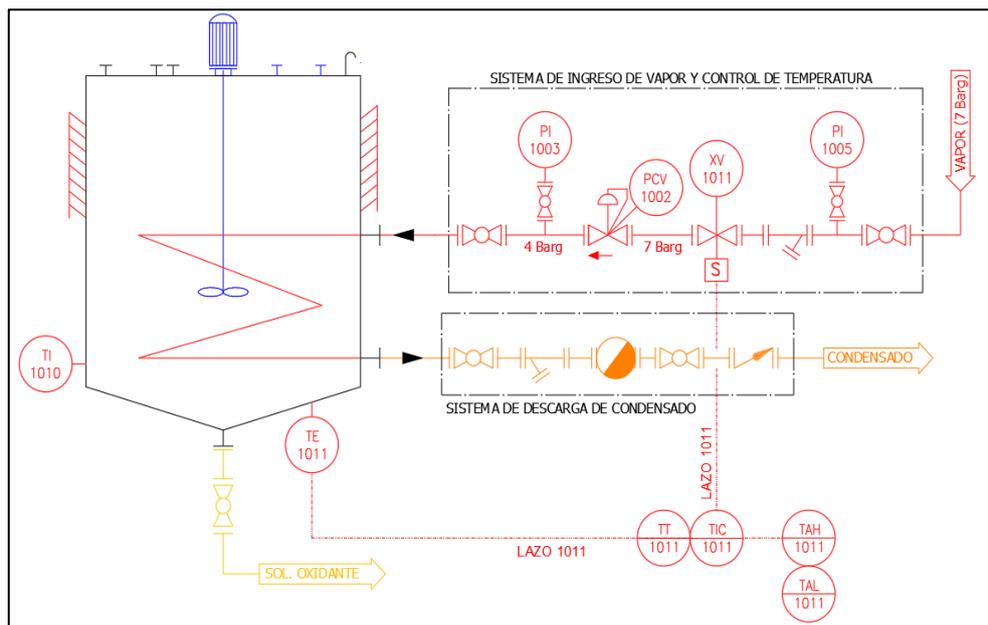


Figura N°5.6 Tanque de disolución TQ03 – Ingreso de vapor y control de temperatura
Fuente: Elaboración Propia. (2022)

El control de temperatura de la SO se realiza mediante un sensor de temperatura tipo PT100 (TE 1011) ubicado en la parte baja del tanque el cual envía una señal al controlador (TIC 1011) que controla una válvula (XV 1011) de apertura y cierre mediante un actuador tipo solenoide para el suministro o corte de vapor y así mantener la temperatura en el valor establecido para la operación.

5.3 Recolección de datos

En la tabla N°5.2 se muestra el registro de las lecturas de los instrumentos de medición TI1010, PI1005 y PI1003 instalados en el tanque TQ-03 (ver figura N°5.6), durante la elaboración de 20 t de SO.

- TI1010: Termómetro con indicador local, diámetro de dial 4", caja en acero inoxidable 316L, rango 0 °C – 120 °C.
- PI1003: Manómetro con indicador local, diámetro de visor de 4", caja en acero inoxidable 316L, doble rango de lectura de 0 bar - 10 Bar y 0 psi - 150 psi.
- PI1005: Manómetro con indicador local, diámetro de dial 4", caja en acero inoxidable 316, doble rango 0 bar-10 bar y 0 psi - 150 psi.

Proceso : Elaboración de 20 T de SO de nitrato de amonio en agua
 Proporción: 71 % nitrato de amonio / 29% agua
 Fecha de registro : 12/04/2022
 Inicio de agitación : 9:17 a. m.
 Inicio de calentamiento : 9:22 a. m.
 Peso de cada carga de N. Amonio : 1300 Kg

N° Carga N. Amonio	Hora de Lectura	(*) T _{sol. Oxidante} (°C)	N. Amonio (kg)	N. Amonio Acumulado (kg)	P _{antes de Valv. Reduc.} (barg)	P _{despues de Valv. Reduc.} (barg)	Comentarios
---	09:30	25	---	0	7	3.7	En proceso agitación y calentamiento
1, 2, 3	09:33	14.6	3900	3900	7	3	Se ingresaron las cargas de N. Amonio N°s 1, 2 y 3
4, 5, 6	09:48	7	3900	7800	6.8	1.6	Se ingresaron las cargas de N. Amonio N°s 4, 5 y 6
7	09:53	6.9	1300	9100	6.5	1.4	Se ingresó la carga de N. Amonio N° 7
8	10:00	6.5	1300	10400	6	1.4	Se ingresó la carga de N. Amonio N° 8
---	10:09	27	---	---	5.4	0.5	En proceso agitación y calentamiento
9	10:23	38.1	1300	11700	5	1	Se ingresó la carga de N. Amonio N° 9
---	10:40	58.7	---	---	4	0.6	En proceso agitación y calentamiento
10	10:57	69	1300	13000	4.4	0.9	Se ingresó la carga de N. Amonio N° 10
---	11:02	72.7	---	---	4.4	1.2	En proceso agitación y calentamiento
---	11:10	75.5	---	---	4.4	1.2	En proceso agitación y calentamiento
---	11:15	79.1	---	---	5	0	Cierre automatico de valvula de control de vapor
---	11:18	81.6	---	---	6.8	0	Valvula de control de vapor cerrada
---	11:20	82.7	---	---	7	0	Valvula de control de vapor cerrada
---	11:25	83.7	---	---	7	0	Valvula de control de vapor cerrada
---	11:33	84.5	---	---	7	0	Valvula de control de vapor cerrada
11	11:35	83.9	1300	14300	7	0	Se ingresó la carga de N. Amonio N° 11
---	12:21	77.5	---	---	6.8	0	Valvula de control de vapor cerrada
---	12:32	77.7	---	---	6.5	0	Valvula de control de vapor cerrada
---	12:35	76.0	---	---	6.5	2.7	Apertura automatica de valvula de control de vapor
---	12:40	79.1	---	---	5.5	0	Cierre automatico de valvula de control de vapor
---	12:43	82.1	---	---	7	0	Valvula de control de vapor cerrada
---	12:55	84.5	---	---	7	0	Valvula de control de vapor cerrada

Tiempo de elaboración de la SO 03:25 Hrs

(*) Las temperaturas fueron registradas al finalizar el proceso de cada carga del nitrato de amonio

Tabla N°5.2 Registro de temperatura y presión de vapor durante la elaboración de 20 toneladas de SO.

Fuente: Elaboración propia (2022)

5.4 Procesamiento de la información

La planta actual tiene un flujo de producción de 220 kg/min la cual se abastece de SO desde dos tanques TQ-01 y TQ-02 de capacidades de 20 t y 15 t respectivamente. Para aumentar el flujo de producción en 175 kg/min se requiere que el TQ-03 tenga una producción de SO de 25 t/h, pero según los datos registrados en la tabla N° 5.1 el tiempo que necesitó para elaborar 20 t de SO fue de 3 horas 25 minutos.

En la figura N°5.7 se muestra la variación de la temperatura en el proceso de elaboración de 20 t de SO en el tanque TQ-03.

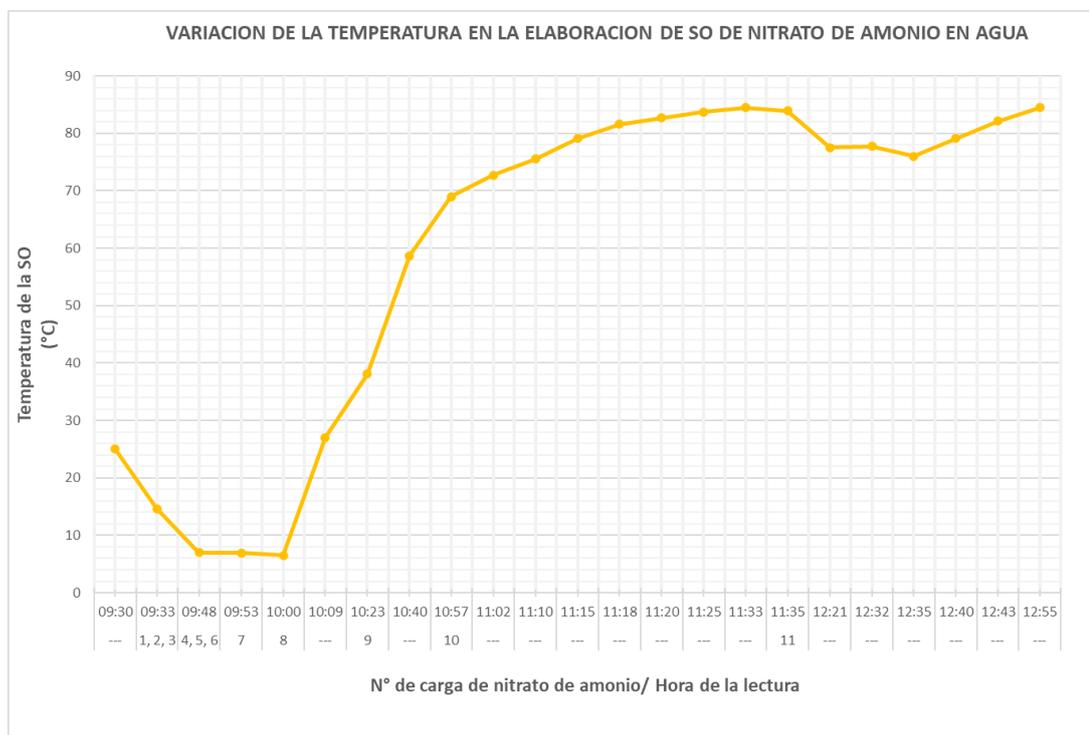


Figura N°5.7 Variación de la temperatura en la elaboración de 20 toneladas de SO
Fuente: Elaboración propia (2022)

La SO elaborado tenía como proporciones en peso de 71% de N. Amonio (soluto) en 29% de agua (solvente).

Peso de SO preparada = 20 000 kg

Peso de nitrato de amonio en la SO = 14 300 kg

Peso de agua en la SO = 5 700 kg

Realizando los cálculos respectivos la concentración final para la SO elaborado es de:

Concentración final de la SO = 250.8 g N. Amonio / 100 g H₂O

En la tabla N°5.3 se muestra el máximo peso de nitrato de amonio que se disuelve en 100 g de agua a diferentes temperaturas para alcanzar el punto de saturación en la disolución.

T (°C)	Solub (g _{soluto} /100 g _{dis})
0	118
10	151
20	192
30	242
40	297
50	352
60	421
70	499
80	580
90	712
100	871

Tabla N°5.3 Solubilidad del nitrato de amonio (NH₄NO₃) en agua a diferentes temperaturas.

Fuente: Anteproyecto de una planta de Nitrato de Amonio para fertilizante / Tesis de Ing. Química Industrial – Ernesto Gonzales Vidales (1963)

Como se muestra también en la figura N° 5.8, una solución saturada es cuando se tiene una máxima concentración de soluto en el solvente para una determinada temperatura, por encima del cual, el soluto no se disolverá y se precipitará en la solución en forma de cristales.

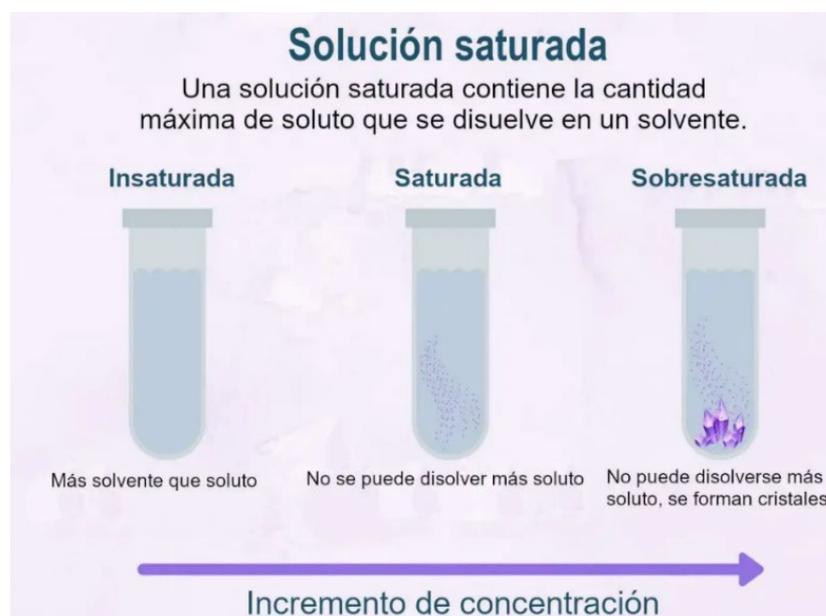


Figura N°5.8 Definición de soluciones saturadas

Fuente: Sitio web "El gen curioso" / Capítulo de Química (2021)

En la figura N° 5.7, durante la elaboración de la SO se observa que la temperatura desciende a 6,5 °C con el ingreso de los primeros 10 400 kg de nitrato de amonio, con ese peso de nitrato de amonio en la SO en elaboración se tiene una concentración de 182 g NH_4O_3 /100 g H_2O para el cual, según la tabla N°5.2, y haciendo la interpolación respectiva le corresponde una temperatura de 17,5 °C para disolver completamente el nitrato de amonio hasta ese momento suministrado al TQ-03. De lo mencionado se determina que la disolución esta sobresaturada para la temperatura de 6,5 °C, por lo que el nitrato de amonio permanecerá sin disolver, hasta que la temperatura de la

SO se eleve por efecto del calentamiento del serpentín, hasta superar la temperatura de saturación para la concentración de nitrato de amonio suministrado al proceso de disolución. A continuación, se menciona las conclusiones del análisis efectuado con la información registrada:

- La potencia de calentamiento del serpentín del TQ-03 no compensa el consumo de calor por la reacción endotérmica que se produce en la elaboración de la SO.
- El flujo masico en el ingreso del nitrato de amonio no corresponde a la potencia de calentamiento disponible del serpentín.

En la figura N°5.9 se muestra la variación de la presión de vapor saturado antes y después de la válvula reguladora de presión PCV-1002 (ver figura N°5.6) previo a su ingreso al serpentín, en el proceso de elaboración de 20 t de SO en el tanque TQ-03.

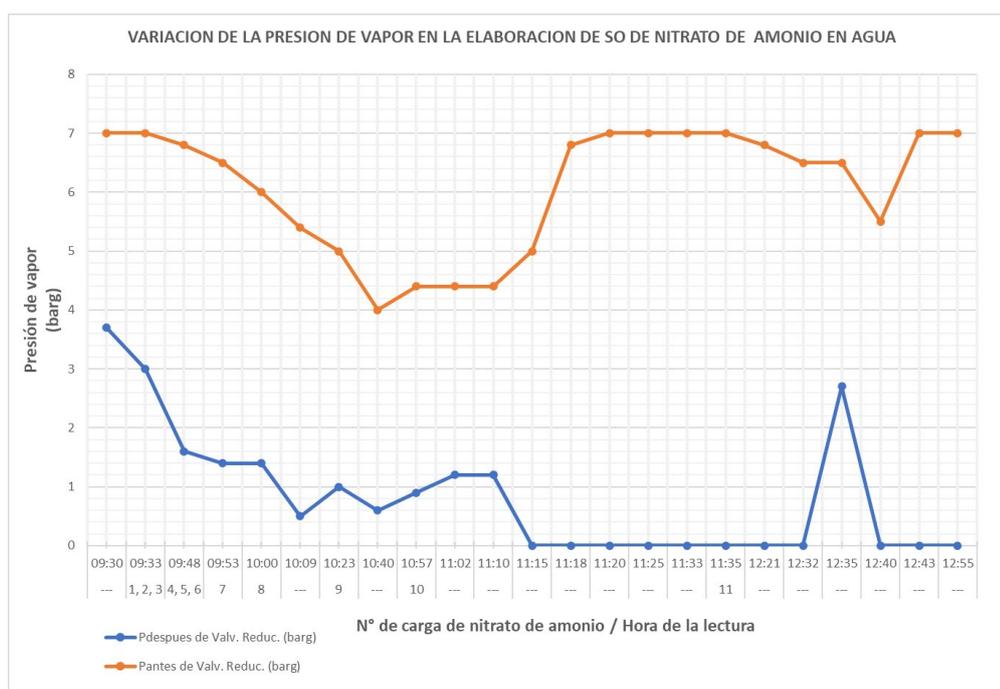


Figura N°5.9 Variación de la presión de vapor en la elaboración de SO
Fuente: Elaboración propia (2022)

La presión de vapor para el sistema de calentamiento es de 7 barg antes de la válvula de regulación y 4 barg después de la válvula de regulación. La presión de vapor que ingresa al serpentín, por temas de seguridad es regulada a 4 barg para su utilización en el IC del tanque TQ-03, ya que a esa presión le corresponde una temperatura de 151 °C y según se muestra en las tablas N° 5.4 y N°5.5 la temperatura del vapor a 4 barg está aproximadamente 20 °C por debajo de la temperatura de fusión del nitrato de amonio granular y de descomposición de la SO.

9. Propiedades físicas y químicas	
Información básica de propiedades físicas y químicas	
Apariencia:	
Forma:	Sólido.
Color:	Gránulos blancos.
Olor:	Ligero olor a amoníaco.
pH en solución al 10%:	En solución 4-6
Punto de fusión:	155°C – 169.4°C (311°F – 337°F)

Tabla N°5.4 Temperatura de fusión del nitrato de amonio (NH₄NO₃)

Fuente: Austin Powder, Hoja de datos de seguridad del nitrato de amonio (2020)

Solución de nitrato de amonio	
Planilla de datos de seguridad	
Clasificada de acuerdo con UN-GHS como es adoptada en la Norma de Comunicación de Riesgos de los Estados Unidos (HCS 2012), los Reglamentos de Productos Peligrosos de Canadá (WHMIS 2015) y la Norma NOM-018-STPS-2000 de México.	
Temperatura de ignición espontánea	: No se aplica
Temperatura de descomposición	: (comienza a) ≥ 338 °F (≥ 170 °C)
Inflamabilidad (sólido, gas)	: No inflamable
Límite inferior de inflamabilidad	: No inflamable
Límite superior de inflamabilidad	: No inflamable

Tabla N°5.5 Temperatura de descomposición de la solución de nitrato de amonio (NH₄NO₃) en agua

Fuente: CFindustries, Planilla de datos de seguridad del nitrato de amonio (2016)

Como se observa en la figura N°5.9 la presión de vapor saturado para el serpentín disminuye hasta una presión de 1,4 barg con el ingreso de los

primeros 10 400 Kg de nitrato de amonio, esto impacta en la diferencial de presión que necesita la trampa de vapor para la evacuación de condensados lo cual resultó en la inundación del serpentín, disminuyendo así el área de transferencia de calor. Otra consecuencia es la disminución de la diferencial de temperatura entre el serpentín y la SO ya que para una presión de vapor de 4 barg le corresponde una temperatura de 151 °C y a 1,4 barg le corresponde una temperatura de 126 °C, es decir se tiene 25 °C menos de diferencia de temperatura entre el serpentín y la SO en elaboración. Por lo tanto, ambas consecuencias debido a la caída de la presión de vapor impactan también en la potencia de calentamiento.

Finalmente se concluye con el análisis efectuado y con la información registrada de la presión de vapor que el área de transferencia de calor del serpentín no corresponde al flujo máximo de vapor disponible, lo cual despresuriza todo el sistema de suministro de vapor desde la caldera, afectando la transferencia de calor, así como la evacuación de condensados del sistema de trampas de vapor del TQ-03.

5.5 Tanque disolvedor de 25 t/h para elaboración de SO

Para desarrollar la presente investigación se determinaron las variables de operación que afectan el tiempo de elaboración de la SO en un tanque disolvedor. Del análisis del capítulo 5.3 (Procesamiento de la información) se tienen las siguientes variables.

- Flujo masico de vapor saturado
- Presión de vapor saturado
- Velocidad de vapor saturado en el serpentín
- Área de transferencia de calor del serpentín
- Flujo masico de alimentación del nitrato de amonio
- Temperatura de calentamiento según la concentración del soluto en el solvente (punto de saturación).

Las propiedades físicas y químicas consideradas para la SO en este trabajo se muestran en la tabla N° 5.6.

Item	Parámetro	Valor
1	Concentración en peso de la SO	70 % de nitrato de amonio (NH ₄ NO ₃) 30 % de agua (H ₂ O)
2	Densidad de la SO	1 320 – 1 360 kg/m ³

Tabla N°5.6 Propiedades físicas y químicas de la SO y del nitrato de amonio (NH₄NO₃)
Fuentes: Archivo ORICA (2022)

Otros valores de los parámetros que se consideraron para el diseño del tanque se muestran en la tabla N°5.7.

Item	Parámetro	Valor
1	Presión de vapor saturado suministrado por la caldera	7 barg
2	Presión de vapor saturado regulado para ingreso al serpentín	4 barg

Tabla N°5.7 Presión de vapor utilizado en el sistema de calentamiento
Fuente: Archivo ORICA (2022)

5.5.1 Funciones principales

Almacenamiento

Contener las materias primas como el agua y nitrato de amonio para la elaboración de la SO como producto final.

Agitación

Mezclar para disolver el nitrato de amonio en agua y aumentar la velocidad de transferencia de calor.

Calentamiento

Suministrar el calor necesario para mantener la temperatura durante la reacción endotérmica que se produce cuando el nitrato de amonio se disuelve en el agua y calentar la SO hasta llegar a la temperatura objetivo.

5.5.2 Requerimientos para el diseño

El diseño final para el tanque deberá cumplir los siguientes requerimientos:

- Capacidad nominal de preparación y almacenamiento de SO: 25 t.
- Tiempo de preparación de 25 t de SO: 1 hora.
- Temperatura máxima de preparación y almacenamiento de productos: 90 °C.
- Vida útil: 15 años
- Salida de producto por su parte inferior

- Material resistente a la corrosión y al ataque químico del nitrato de amonio.
- Materiales existentes en el mercado local.

A continuación, se presentan las selecciones y cálculos respectivos realizados para el diseño de un tanque disolvedor para elaboración de SO.

En la tabla N°5.8 se muestra la carta morfológica donde se presentan todas las alternativas de diseño para cada función del tanque disolvedor.

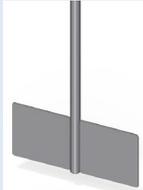
Función	Alternativa N°1	Alternativa N°2	Alternativa N°3
Almacenamiento	 <p data-bbox="566 1209 774 1265">Tanque cilíndrico vertical</p>	 <p data-bbox="861 1209 1061 1265">Tanque cilíndrico horizontal</p>	 <p data-bbox="1157 1209 1364 1265">Tanque prismático cuadrangular</p>
Agitación	 <p data-bbox="550 1478 790 1512">Agitador tipo turbina</p>	 <p data-bbox="845 1478 1077 1512">Agitador tipo hélice</p>	 <p data-bbox="1141 1478 1380 1512">Agitador tipo paleta</p>
Calentamiento	 <p data-bbox="550 1904 790 1937">Serpentín helicoidal</p>	 <p data-bbox="901 1892 1013 1926">Chaqueta</p>	 <p data-bbox="1125 1892 1396 1926">De tubo tipo bayoneta</p>

Tabla N°5.8 Carta morfológica – alternativas de diseño

Fuente: Elaboración propia (2022)

5.5.3 Selección de las soluciones

Almacenamiento

Para la selección de la forma del cuerpo se consideraron los siguientes criterios:

- Facilidad para la fabricación (construcción)
- Eficiencia en la agitación (mezclado)
- Facilidad para el mantenimiento (mantenimiento)
- Simplicidad en el diseño (diseño)
- Estética del tanque (estética)

En la tabla N°5.9 se muestran las valoraciones de importancia que se consideró para el cálculo de los “pesos” de cada uno de los criterios:

Importancia	Valor
Igual	1
Doble	2
Triple	3

Tabla N°5.9 Valoración de importancia - almacenamiento
Fuente: Elaboración propia (2022)

En la tabla N°5.10 se muestra los valores del “peso” de cada criterio como resultado de la comparación de los valores de importancia para cumplir con los requerimientos del diseño respecto a la forma geométrica del cuerpo de almacenamiento del tanque.

Criterio a evaluar	Mezclado	Mantenimiento	Diseño	Construcción	Estética	Peso
Mezclado	1	2	3	2	3	0,37
Mantenimiento	1/2	1	2	2	3	0,26
Diseño	1/3	1/2	1	1	1	0,12
Construcción	1/2	1/2	1	1	2	0,16
Estética	1/3	1/3	1	1/2	1	0,1
Sumatoria de Pesos						1

Tabla N°5.10 Valoración de “pesos” de los criterios - almacenamiento
Fuente: Elaboración propia (2022)

Para la evaluación de cada alternativa de almacenamiento según los criterios de la tabla N°5.10 se asignaron valores al desempeño como se muestra la tabla N°5.11.

Desempeño	Valor
Malo	1
Regular	2
Bueno	3
Muy bueno	4

Tabla N°5.11 Valoración de desempeño - almacenamiento
Fuente: Elaboración propia (2022)

En la tabla N°5.12 se muestra la ponderación de los valores de “peso” de los criterios con respecto al desempeño, de esta tabla se seleccionó la alternativa de almacenamiento con una mayor puntuación.

Criterios	Peso	Alternativas					
		Cilíndrico vertical		Cilíndrico horizontal		Prismático cuadrangular	
Mezclado	0,37	3,00	1,10	2,00	0,73	2,00	0,73
Mantenimiento	0,26	3,00	0,77	2,00	0,51	2,00	0,51
Diseño	0,12	4,00	0,50	3,00	0,37	3,00	0,37
Construcción	0,16	4,00	0,62	4,00	0,62	2,00	0,31
Estética	0,10	3,00	0,30	3,00	0,30	3,00	0,30
TOTAL		3,28		2,54		2,22	

Tabla N°5.12 Valoración de alternativas - almacenamiento
Fuente: Elaboración propia (2022)

De la tabla N°5.12 se observa que la alternativa con mayor puntuación para las funciones previstas para el almacenamiento es la que tiene la forma geométrica cilíndrico vertical. Considerando también que uno de los criterios requeridos para la función de almacenamiento es la agitación, cabe hacer mención a lo publicado por Warren L. et al en su trabajo “**Operaciones Unitarias en Ingeniería Química**” (2007, 7ma edición) donde indica que “Los líquidos se agitan con más frecuencia en algún tipo de tanque o recipiente, por lo general de forma cilíndrica y provisto de un eje vertical”. Por lo tanto, la geometría cilíndrico vertical fue seleccionado para la función de almacenamiento del tanque.

Agitación

Para la selección del tipo de agitador de la tabla N°5.8, se consideraron los siguientes criterios:

- Facilidad para la fabricación (construcción)
- Eficiencia en la agitación (mezclado)
- Utilización según la viscosidad del fluido (aplicabilidad)

- Facilidad para el mantenimiento (mantenimiento)
- Simplicidad en el diseño (diseño)

En la tabla N°5.13 se muestran las valoraciones de importancia que se consideró para el cálculo de los “pesos” de cada uno de los criterios:

Importancia	Valor
Igual	1
Doble	2
Triple	3

Tabla N°5.13 Valoración de importancia - agitación
Fuente: Elaboración propia (2022)

En la tabla N°5.14 se muestra los valores del “peso” de cada criterio como resultado de la comparación de los valores de importancia para cumplir con los requerimientos del diseño para la agitación.

Criterio a evaluar	Mezclado	Aplicabilidad	Mantenimiento	Diseño	Construcción	Peso
Mezclado	1,00	2,00	2,00	3,00	3,00	0,36
Aplicabilidad	0,50	1,00	2,00	2,00	3,00	0,25
Mantenimiento	0,50	0,50	1,00	2,00	3,00	0,19
Diseño	0,33	0,50	0,50	1,00	1,00	0,11
Construcción	0,33	0,33	0,33	1,00	1,00	0,09
Sumatoria de pesos						1

Tabla N°5.14 Valoración de “pesos” de los criterios - agitación
Fuente: Elaboración propia (2022)

Para la evaluación de cada alternativa de agitación según los criterios de la tabla N°5.14 se asignaron valores al desempeño como se muestra la tabla N°5.15.

Desempeño	Valor
Malo	1
Regular	2
Bueno	3
Muy bueno	4

Tabla N°5.15 Valoración de desempeño - agitación
Fuente: Elaboración propia (2022)

En la tabla N°5.16 se muestra la ponderación de los valores de “peso” de los criterios con respecto al desempeño, de esta tabla se seleccionó la alternativa de almacenamiento con mayor una puntuación.

Criterios	Peso	Alternativas					
		Agitador tipo turbina		Agitador tipo helice		Agitador tipo paleta	
Mezclado	0,36	3,00	1,08	3,00	1,08	1,00	0,36
Aplicabilidad	0,25	3,00	0,75	3,00	0,75	1,00	0,25
Mantenimiento	0,19	4,00	0,76	3,00	0,57	4,00	0,76
Diseño	0,11	4,00	0,43	3,00	0,32	4,00	0,43
Construcción	0,09	3,00	0,27	2,00	0,18	3,00	0,27
TOTAL		3,30		2,91		2,07	

Tabla N°5.16 Valoración de alternativas - agitación
Fuente: Elaboración propia (2022)

De la tabla N°5.16 se observa que la alternativa con mayor puntuación es el agitador tipo turbina, por lo tanto, esta alternativa fue la seleccionada.

Sistema de calentamiento

De la tabla N°5.8, para la selección del tipo de intercambiador de calor del sistema de calentamiento a vapor, se consideraron los siguientes criterios:

- Interferencia con el proceso de mezcla (Interferencia)
- Eficiencia en la transferencia de calor (eficiencia)
- Facilidad de mantenimiento (mantenimiento)
- Simplicidad del diseño (diseño)
- Facilidad de construcción (construcción)

En la tabla N°5.17 se muestran las valoraciones de importancia que se consideró para el cálculo de los “pesos” de cada uno de los criterios:

Importancia	Valor
Igual	1
Doble	2
Triple	3

Tabla N°5.17 Valoración de importancia – sistema de calentamiento
Fuente: Elaboración propia (2022)

En la tabla N°5.18 se muestra los valores del “peso” de cada criterio como resultado de la comparación de los valores de importancia para cumplir con los requerimientos del diseño para el IC del sistema de calentamiento.

Criterio a evaluar	Interferencia	Eficiencia	Mantenimiento	Diseño	Construcción	Peso
Interferencia	1,00	1,00	2,00	3,00	3,00	0,32
Eficiencia	1,00	1,00	2,00	2,00	3,00	0,29
Mantenimiento	0,50	0,50	1,00	2,00	3,00	0,19
Diseño	0,33	0,50	0,50	1,00	1,00	0,11
Construcción	0,33	0,33	0,33	1,00	1,00	0,09
Sumatoria de pesos						1

Tabla N°5.18 Valoración de “pesos” de los criterios – sistema de calentamiento
Fuente: Elaboración propia (2022)

Para la evaluación de cada alternativa del sistema de calentamiento según los criterios de la tabla N°5.18 se asignaron valores al desempeño como se muestra la tabla N°5.19.

Desempeño	Valor
Malo	1
Regular	2
Bueno	3
Muy bueno	4

Tabla N°5.19 Valoración de desempeño - sistema de calentamiento
Fuente: Elaboración propia (2022)

En la tabla N°5.20 se muestra la ponderación de los valores de “peso” de los criterios con respecto al desempeño, de esta tabla se seleccionó la alternativa del IC del sistema de calentamiento con mayor una puntuación.

Criterios	Peso	Alternativas					
		IC tipo serpentín		IC tipo chaqueta		IC de tubo tipo bayoneta	
Interferencia	0,32	3,00	0,95	4,00	1,27	1,00	0,32
Eficiencia	0,29	4,00	1,17	1,00	0,29	2,00	0,58
Mantenimiento	0,19	3,00	0,58	2,00	0,38	2,00	0,38
Diseño	0,11	3,00	0,32	2,00	0,22	2,00	0,22
Construcción	0,09	3,00	0,28	2,00	0,18	2,00	0,18
TOTAL		3,29		2,34		1,68	

Tabla N°5.20 Valoración de alternativas – sistema de calentamiento
Fuente: Elaboración propia (2022)

De la tabla N°5.20 se observa que la alternativa con mayor puntuación es el IC tipo serpentín para el sistema de calentamiento, por lo tanto, esta alternativa fue la seleccionada.

Selección del material a utilizar en el tanque disolvedor

Los tanques disolvedores para elaboración de SO de nitrato de amonio en agua deben ser fabricados en materiales resistentes a la temperatura y a la corrosión generada por el nitrato de amonio y la SO que se obtiene como producto final. Según el especialista en la fabricación de equipos y sistemas para la industria química **Veolia** (Water Technologies & Solutions) “La solución de urea y nitrato de amonio (UAN) es sumamente corrosiva para los equipos de uso agrícola, y sin un tratamiento adecuado, pueden aumentar los costos de mantenimiento y causar daños imprevistos en los equipos de almacenamiento o trasiego de productos”. Por lo tanto, el material a utilizar en la fabricación del tanque

316 por su compatibilidad para su utilización con el nitrato de amonio y su disponibilidad comercial en el Perú para la fabricación de equipos industriales.

Los otros materiales como el Carpenter 20 y el Titanio no fueron tomados en consideración debido a que si bien es cierto tienen muy buena resistencia a la corrosión, no están disponibles comercialmente en el país, además de que su utilización está dirigida a fabricaciones especiales como se describe a continuación:

- Carpenter 20: fue desarrollado para máxima resistencia al ataque de los ácidos, específicamente al ácido sulfúrico. Esta superaleación tiene una excelente resistencia a la corrosión en químicos que contengan cloruros, ácido sulfúrico, fosfórico y nítrico.
- Titanio: el titanio es un elemento químico cuyo número atómico es 22. Las aleaciones de titanio se utilizan en aviones, helicópteros, blindajes, buques de guerra, naves espaciales, misiles, IC en las plantas de desalinización, instrumentos quirúrgicos, implantes dentales reemplazos articulares para los seres humanos.

Por lo tanto, según lo mencionado, el acero inoxidable es el material seleccionado para su utilización en la fabricación de todas las partes metálicas del tanque disolvedor para elaboración de SO de nitrato de amonio en agua.

Resumen de selección de soluciones

En base a la carta morfológica y a las tablas desarrolladas para la selección de la solución más adecuada para cada función se tiene lo siguiente:

- Almacenamiento: Tanque cilíndrico vertical.
- Sistema de agitación: Agitador tipo turbina.
- Sistema de calentamiento: IC tipo serpentín helicoidal.
- Material: Acero inoxidable 316

5.5.4 Cálculo geométrico del tanque

5.4.4.1 Dimensiones del tanque

Para el cálculo de las dimensiones del tanque se consideró la forma geométrica cilíndrico vertical seleccionada en el capítulo anterior y las recomendaciones publicadas por Warren L. et al en su trabajo “Operaciones Unitarias en Ingeniería Química – Tanques agitados” (2007, 7ma edición), donde menciona que para este tipo de tanques de proceso “la profundidad (o altura) del líquido es aproximadamente igual al diámetro del tanque”.

Para el fondo del tanque se determinó que sea de tipo cónico, considerando que el proceso requiere que la descarga de la SO y la evacuación de los lodos residuales (producto de la elaboración de la SO), sea por la parte inferior.

El fondo cónico para tanques, se utilizan generalmente en tanques donde se presentan acumulación de sólidos, y no hay límites en cuanto a sus dimensiones de fabricación, siendo su única limitación que el ángulo de vértice sea menor de 180°.

Las variables geométricas consideradas para el dimensionado del tanque fueron las siguientes:

- h_{wcil} : Altura de nivel de trabajo - virola
- h_{wcon} : Altura de nivel de trabajo – fondo cónico
- h_{wtotal} : Altura de nivel trabajo total

$$h_{wtotal} = h_{wcil} + h_{wcon}$$

- $h_{sobre\ llonado}$: Altura de nivel de sobre llenado o protección de sobre llenado.

$$h_{sobre\ llonado} = 10\% h_{wtotal}$$

- $h_{diseño}$: Altura de nivel de diseño

$$h_{diseño} = h_{wtotal} + h_{sobre\ llonado}$$

- D_i : Diámetro interior del tanque
- D_{ma} : Diámetro interior mayor del cono

$$D_{ma} = D_i$$

- D_{me} : Diámetro menor del fondo cónico

Este diámetro corresponde a la descarga del tanque y para el cual se consideró una medida igual al diámetro exterior de tubo inoxidable de diámetro nominal de 4", por lo tanto:

$$D_{me} = 0,114 \text{ m}$$

- α : mitad del ángulo del vértice del fondo cónico

Para este ángulo se consideró un valor igual a los actualmente utilizados en los fondos cónicos de los tanques de elaboración de SO de planta.

$$\alpha = 70^\circ$$

En la figura N°5.10 se muestra la ubicación de las variables geométricas consideradas para el cálculo de las dimensiones del tanque.

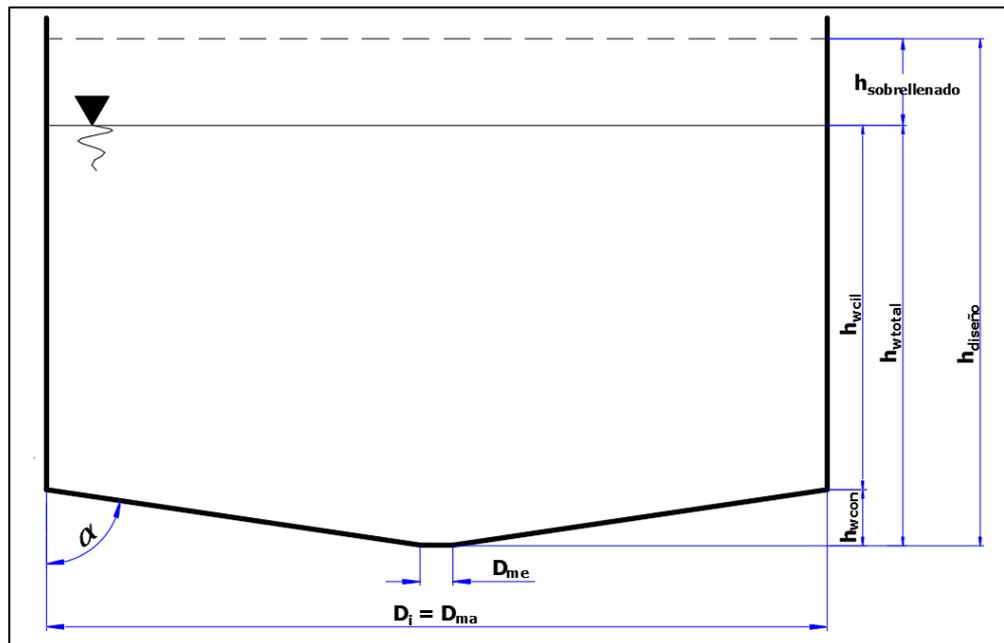


Figura N°5.10 Variables geométricas de un tanque de la elaboración de SO
Fuente: Elaboración propia (2022)

Según requerimiento de diseño, la capacidad nominal de trabajo del tanque disolvedor es de 25 t/h, es decir que, en una producción discontinua (producción por lote), se consideró que el recipiente del tanque tenga una capacidad de almacenamiento de 25 toneladas de SO por lote de producción.

A continuación, se presentan las variables, propiedades físicas de la SO y los cálculos para determinar el volumen nominal de trabajo (V_{trabajo}).

- W_{trabajo} : Capacidad nominal en peso del tanque de elaboración de SO.

$$W_{\text{trabajo}} = 25\,000 \text{ kgf} = 25\,000 \times 9,81 \text{ N}$$

$$W_{\text{trabajo}} = 245\,250 \text{ N}$$

- ρ : Densidad de la SO

De la tabla N° 5.5 se tiene:

$$1\,320 \text{ kg/m}^3 - 1\,375 \text{ kg/m}^3$$

Para efectos del cálculo geométrico se consideró el valor más crítico. Por lo tanto:

$$\rho = 1\,320 \text{ kg/m}^3$$

- g: gravedad terrestre a una altitud de 1973 m s.n.m.

$$g = 9,82 \text{ m/s}^2$$

- γ : Peso específico de la SO

$$\gamma = \rho \times g$$

$$\gamma = 1\,320 \text{ kg/m}^3 \times 9,82 \text{ m/s}^2 = 12\,962,4 \text{ N/m}^3$$

- V_{trabajo} : Volumen nominal de trabajo del tanque de elaboración de SO.

$$V_{\text{trabajo}} = W_{\text{trabajo}} / \gamma$$

$$V_{\text{trabajo}} = \frac{245\,250 \text{ N}}{12\,962,4 \frac{\text{N}}{\text{m}^3}} = 18,92 \text{ m}^3$$

Geoméricamente el V_{trabajo} del tanque de elaboración de SO también es la suma de los volúmenes de trabajo de la parte cilíndrica y de la parte cónica del fondo. Por lo tanto, se presenta la siguiente expresión:

$$V_{\text{trabajo}} = \frac{\pi}{4} \times D_i^2 \times h_{\text{wcil}} + \frac{\pi \times h_{\text{wcon}}}{3} \times \left(\frac{D_{\text{ma}}^2}{4} + \frac{D_{\text{me}}^2}{4} + \frac{D_{\text{ma}}}{2} \times \frac{D_{\text{me}}}{2} \right)$$

$$V_{\text{trabajo}} = \frac{\pi}{4} \times D_i^2 \times (h_{\text{wtotal}} - h_{\text{wcon}}) + \frac{\pi \times h_{\text{wcon}}}{3} \times \left(\frac{D_i^2}{4} + \frac{D_{\text{me}}^2}{4} + \frac{D_i}{2} \times \frac{D_{\text{me}}}{2} \right) \quad (5.1)$$

De la figura N° 5.10 y de lo expuesto respecto a tanques con agitación se obtuvieron las siguientes relaciones:

$$h_{wtotal} = D_i$$

$$h_{wcon} = \frac{D_i - D_{me}}{2 \times \tan \alpha}$$

Reemplazando h_{wtotal} y h_{wcon} en la ecuación (5.1) se obtuvo la siguiente expresión:

$$V_{trabajo} = \frac{\pi}{4} \times D_i^2 \times \left(D_i - \frac{D_i - D_{me}}{2 \times \tan \alpha} \right) + \frac{\pi \times \frac{(D_i - D_{me})}{2 \times \tan \alpha}}{3} \times \left(\frac{D_i^2}{4} + \frac{D_{me}^2}{4} + \frac{D_i}{2} \times \frac{D_{me}}{2} \right)$$

$$V_{trabajo} = 0,785 D_i^2 \times \left(D_i - \frac{D_i - 0,114}{5,494} \right) + \frac{0,572 \times (D_i - 0,114)}{3} \times \left(\frac{D_i^2}{4} + 0,003 + 0,028 D_i \right)$$

$$18,92 = 0,690 D_i^3 + 0,016 D_i^2 - 0,000016 D_i - 0,00006$$

$$0,690 D_i^3 + 0,016 D_i^2 - 0,00016 D_i - 18,95006 = 0$$

Resolviendo la ecuación polinómica se obtuvo el valor del diámetro interior del tanque:

$$D_i = 3,0 \text{ m}$$

Por lo tanto, a continuación, se presentan los valores de las alturas halladas para el tanque disolvedor:

$$h_{wcon} = 0,525 \text{ m}$$

$$h_{wcil} = 2,475 \text{ m}$$

$$h_{wtotal} = 3,0 \text{ m}$$

$$h_{diseño} = 3,30 \text{ m}$$

5.4.4.2 Espesores de plancha del tanque

Para el cálculo de los espesores se utilizó la norma ASME sección VIII Div. I referido a Recipientes a presión; donde se define como Recipiente a Presión, “cualquier contenedor cerrado capaz de almacenar un fluido a presión manométrica, sea esta interna o externa. Según menciona ASME sección VIII Div. I , esta presión puede ser obtenida desde una fuente interna o externa, o por la aplicación de calor desde una fuente directa o indirecta, o cualquier combinación de ellas”.

La norma ASME en su sección VIII Div I, menciona que su alcance comprende lo siguiente, aunque no está limitado a:

- 1.- Recipientes que contengan agua bajo presión incluyendo aquellos que contengan aire comprimido que sirva únicamente como amortiguador o que excedan:
 - Una presión de diseño mayor a 300 psi.
 - Una temperatura de diseño mayor a 210 ° F.
- 2.- Tanques de agua caliente calentados por vapor u otros medios indirectos que excedan:

- Una entrada de calor de 200,000 BTU / h
 - Una temperatura del agua de 210°F.
 - Una capacidad nominal de 120 galones.
- 3.- Recipientes que tengan un diámetro interior, ancho, altura o sección transversal mayor a 6" sin limitación en longitud o presión.
- 4.- Recipientes que tengan una presión de operación interna o externa mayor a 15 psi sin limitación en medidas.
- 5.- Recipientes que tengan una presión de diseño que no exceda los 3 000 psi.

Se excluyen del alcance de la norma ASME sección VIII Div I:

- 1.- Depósitos estacionarios que tengan elementos principales móviles, ya sean rotatorios o reciprocantes, tales como bombas, compresores, turbinas y cualquier equipo que tenga elementos principales móviles.
- 2.- Calentadores tubulares sujetos a la acción directa del fuego.
- 3.- Recipientes a presión que son parte integral de componentes de sistemas de tuberías.
- 4.- Sistemas de tuberías y sus componentes.
- 5.- Recipientes con capacidad menor a 454,3 litros (120 galones) de agua, que utilizan aire como elemento originador de presión.

Según lo presentado, se consideró al tanque disolvedor como un tanque calentador con las siguientes características:

- Potencia calorífica del tanque disolvedor > 200 000 BTU/h
- Temperatura de operación máxima entre 85 °C – 95 °C
- Volumen de trabajo 18,92 m³

Por lo tanto, según las características consideradas para el tanque disolvedor y lo indicado en el alcance de la norma ASME sección VIII Div I, es que se utilizó esta norma para el cálculo de los espesores de la plancha metálica inoxidable 316 para el diseño del tanque.

A continuación, se definieron algunos conceptos previos al cálculo de espesores:

Presión de operación (P_o)

Es la presión manométrica de trabajo a la cual estará sometido el equipo en condiciones de operación normal.

Presión interna de diseño (P_d)

Esta presión es la que se utiliza en los cálculos de los espesores y es siempre superior a la de operación. El código ASME no presenta un valor específico para el cálculo de la presión interna de diseño, pero se recomienda que exceda en 30 psi o 10% P_o (lo que sea mayor),

adicionalmente también se debe considerar la presión del fluido ($P_{\text{columna fluido}}$) o cualquier otro contenido del recipiente. Según lo expuesto para la presión de diseño se tiene la siguiente expresión:

$$P_d = P_o + (10\%P_o \text{ o } 30 \text{ psi}) + P_{\text{columna fluido}}$$

Temperatura de operación.

Es la temperatura de trabajo del recipiente a la cual estará sometido el equipo en condiciones de operación normal.

Temperatura máxima de diseño.

Es la temperatura que será siempre igual o superior a la temperatura del metal del recipiente en condiciones de operación.

Esfuerzo máximo permitido de un material en diseño

Es el valor del esfuerzo máximo al que podemos someter un material que forma parte de un recipiente a presión. En condiciones normales de operación, su valor es aproximadamente el 25% del esfuerzo último a la tensión del material en cuestión. En la tabla N° 5.22 se muestran los valores del esfuerzo máximo del acero inoxidable 316 en función de la temperatura, según el código ASME sección II apartado D, subparte 1.

PROPIEDADES DE LOS MATERIALES - ACERO INOXIDABLE																				
P-No. 8 Grupo No. 1																				
TABLA 1							TABLA 3													
COMPOSICION NOMINAL, 18 Cr - 8 Ni Cedencia min. 30 000 lb/pulg ² Tension min. 75 000 lb/pulg ²	Producto	No. de Espec.	Grado	Notas		COMPOSICION NOMINAL, 16 Cr - 12 Ni - 2Mo. Cedencia min. 30 000 lb/pulg ² Tension min. 75 000 lb/pulg ²	Producto	No. de Espec.	Grado	Notas		COMPOSICION NOMINAL, 16 Cr - 12 Ni - 2Mo. Cedencia min. 30 000 lb/pulg ² Tension min. 75 000 lb/pulg ²	Producto	No. de Espec.	Grado	Notas				
	Placa	SA-240	304	2 3				Placa	SA-240	316	2 3				Placa	SA-240	317	2 3		
	Tubo s/c	SA-213	TP304	2				Tubo s/c	SA-213	TP316	2				Tubo s/c	SA-213	TP316H	—		
	Tubo s/c	SA-213	TP304H	—				Tubo s/c	SA-213	TP316	—				Tubo s/c	SA-213	TP316H	—		
	Tubo /sc	SA-312	TP304	2				Tubo s/c	SA-312	TP316	2				Tubo s/c	SA-312	TP316H	—		
	Tubo s/c	SA-312	TP304H	—				Tubo s/c	SA-312	TP316	—				Tubo s/c	SA-312	TP316H	—		
	Tubo s/c	SA-376	TP304	2				Tubo s/c	SA-312	317	2				Tubo s/c	SA-312	TP316H	—		
	Tubo s/c	SA-376	TP304H	—				Tubo s/c	SA-376	TP316	2				Tubo s/c	SA-376	TP316H	—		
	Tubo vaciado	SA-452	TP304H	—				Tubo s/c	SA-376	TP316	—				Tubo vaciado	SA-452	TP316H	—		
	Forj.	SA-182	F304	2				Tubo vaciado	SA-452	TP316H	—				Forj.	SA-182	F316	2		
Forj.	SA-182	F304H	—			Forj.	SA-182	F316H	—			Forj.	SA-182	F316H	—					
Barra	SA-479	304	2 3 5			Barra	SA-479	316	2 3 5			Barra	SA-479	316	2 3 5					
TABLA 2							TABLA 4													
COMPOSICION NOMINAL, 18 Cr - 8 Ni Cedencia 25 000 Tension 70 000	Producto	No. de Espec.	Grado	Notas		COMPOSICION NOMINAL, 16 Cr - 12 Ni - 2Mo. Cedencia 25 000 Tension 70 000	Producto	No. de Espec.	Grado	Notas		COMPOSICION NOMINAL, 16 Cr - 12 Ni - 2Mo. Cedencia 25 000 Tension 70 000	Producto	No. de Espec.	Grado	Notas				
	Placa	SA-240	304L	—			Placa	SA-240	316L	—			Placa	SA-240	316L	—				
	Tubo s/c	SA-213	TP304L	—			Tubo s/c	SA-213	TP316L	—			Tubo s/c	SA-213	TP316L	—				
	Tubo s/c	SA-312	TP304L	—			Tubo s/c	SA-312	TP316L	—			Tubo s/c	SA-312	TP316L	—				
	Forj.	SA-182	F304L	—			Forj.	SA-182	F316L	4			Forj.	SA-182	F316L	4				
Barra	SA-479	304L	5		Barra	SA-479	316L	5		Barra	SA-479	316L	5							
VALORES MAXIMOS DE ESFUERZO PERMITIDO, 1 000 lb/pulg ²																				
MATERIALES DE LA TABLA	PARA TEMPERATURAS DEL METAL NO MAYORES DE, GRADOS F																			
	-20-100	200	300	400	500	600	650	700	750	800	850	900	NOTAS							
1	18.8	17.8	16.6	16.2	15.9	15.9	15.9	15.9	15.5	15.2	14.9	14.7	1							
	18.8	15.7	14.1	12.9	12.1	11.4	11.2	11.1	10.8	10.6	10.4	10.2								
2	15.7	15.7	15.3	14.7	14.4	14.0	13.7	13.5	13.3	13.0	—	—	1							
	15.7	13.4	12.0	11.0	10.3	9.7	9.5	9.4	9.2	9.1	—	—								
3	18.8	18.8	18.4	18.1	18.0	17.0	16.7	16.3	16.1	15.9	15.7	15.5	1							
	18.8	16.2	14.6	13.4	12.5	11.8	11.6	11.3	11.2	11.0	10.9	10.8								
4	15.7	15.7	15.7	15.5	14.4	13.5	13.2	12.9	12.6	12.4	12.1	—	1							
	15.7	13.3	11.9	10.8	10.0	9.4	9.2	9.0	8.8	8.6	8.4	—								
MATERIALES DE LA TABLA	PARA TEMPERATURAS DEL METAL NO MAYORES DE, GRADOS F																			
	950	1000	1050	1100	1150	1200	1250	1300	1350	1400	1450	1500								
1	14.4	13.8	12.2	9.8	7.7	6.1	4.7	3.7	2.9	2.3	1.8	1.4	1							
	10.0	9.8	9.5	8.9	7.7	6.1	4.7	3.7	2.9	2.3	1.8	1.4								
3	15.4	15.3	14.5	12.4	9.8	7.4	5.5	4.1	3.1	2.3	1.7	1.3	1							
	10.7	10.6	10.5	10.3	9.3	7.4	5.5	4.1	3.1	2.3	1.7	1.2								

Tabla N°5.22 Propiedades de los materiales – aceros inoxidables
Fuente: Manual de recipientes a presión – E. Megyesy (1992)

Eficiencia de junta soldada.

Se puede definir la eficiencia de las soldaduras, como el grado de fiabilidad que se puede tener de ellas. En la tabla N° 5.23, se muestra la

eficiencia de junta tanto en costuras longitudinales como circunferenciales.

El esfuerzo en la costura circunferencial rige solamente cuando la eficiencia en la costura circunferencial es menor que la mitad de la eficiencia en la junta longitudinal, o cuando además de la presión interna, actúan sobre la junta cargas adicionales, como el viento, sismo, etc.

TIPOS DE JUNTAS SOLDADAS				
TIPOS NORMA UW-12	EFICIENCIA DE LA JUNTA, E			
	a. Radiografiada totalmente	b. Examinada por zonas	c. No Examinada	
1 	Junta a tope hechas por doble cordón de soldadura o por otro medio con el que se obtenga la misma calidad de metal de soldadura depositada sobre las superficies interior y exterior de la pieza. Si se emplea placa de respaldo, debe quitarse ésta después de terminar la soldadura.	1.00	0.85	0.70
2  En juntas circunferenciales únicamente	Junta a tope de un solo cordón con tira de respaldo que queda en su lugar después de soldar	0.90	0.80	0.65
3 	Junta a tope de un solo cordón sin tira de respaldo	—	—	0.60
4 	Junta a traslape de doble filete completo	—	—	0.55
5 	Junta a traslape de un solo filete completo con soldaduras de tapón	—	—	0.50
6 	Junta a traslape de un solo filete completo sin soldaduras de tapón	—	—	0.45

Tabla N°5.23 Eficiencia de las juntas soldadas (E)

Fuente: Manual de recipientes a presión – E. Megyesy (1992)

Sobre espesores de cálculo por corrosión.

A la hora de asumir el espesor de fabricación de un depósito hay que tener en cuenta que, a lo largo de la vida útil del mismo, puede ir perdiendo espesor de pared debido a la corrosión por efectos de la climatología, o bien por ataque químico del producto contenido.

Para aumentar la vida útil del depósito, se le añade al espesor calculado para soportar los esfuerzos, un sobre espesor que corrija esta pérdida de pared del recipiente, a este sobre espesor se le denomina corrosión admisible (CA).

Según E. Megyesy (1992) en su trabajo "Manual de recipientes a presión" menciona que "si el efecto de la corrosión es indeterminado, el margen lo definirá el diseñador". Pero también recomienda que "un desgaste por corrosión de 5 milésimas de pulgada por año generalmente es satisfactorio para recipientes y tuberías".

En este mismo trabajo el autor indica que "Los recipientes principales o mayores se diseñan generalmente para una larga vida de servicio (15 a 20 años), mientras que los secundarios o menores para periodos más cortos (8 a 10 años).

Sobre espesores de cálculo por laminación.

En los fondos conformados, en la zona del rebordeo, se produce una pérdida de espesor por desplazamiento del material (laminación) durante el proceso de fabricación. Por esto, a la hora de asumir el espesor de

fabricación de un fondo conformado, habrá que añadir ese espesor perdido que suele ser un 10% del espesor calculado.

Este fenómeno también se da en el conformado de virolas curvadas a pequeños diámetros con grandes espesores.

Para los cálculos de los espesores se utilizaron las fórmulas ASME sección VIII Div. I referentes a la presión interna y las dimensiones interiores del tanque.

A continuación, se determina la corrosión admisible adicionada a los espesores mínimos requeridos para el tanque, como resultado de la utilización de las fórmulas de la norma ASME Sección VIII División I.

Para el cálculo del CA del tanque de elaboración de SO, se consideró a este equipo, como un equipo principal para una vida útil de 15 años con un desgaste de 0,005 pulgada/año. Por lo tanto:

$$CA = 0,005 \frac{\text{pulgadas}}{\text{año}} * 15 \text{ años} = 0,075 \text{ pulgadas}$$

- **Cálculo del espesor de la plancha metálica inoxidable de la Virola**

La nomenclatura utilizada en las fórmulas para el cálculo del espesor de la virola son las siguientes:

- t: Espesor mínimo requerido del cuerpo (pulgadas)
- t_d : Espesor de diseño (pulgadas)
- t_c : Espesor comercial (pulgadas)
- P_d : Presión interna de diseño (psi)
- R: Radio interior (pulgadas)
- R_o : Radio exterior (pulgadas)
- S: Valor del máximo esfuerzo admisible en el material a temperatura de diseño (psi)
- E: Eficiencia de la junta.
- CA: Corrosión admisible (pulgadas)

Para este cálculo se consideró que la virola o parte cilíndrica del tanque está fabricada de varias planchas metálicas inoxidables soldadas, por lo que se tendrán costuras circunferenciales, así como longitudinales. Para el cálculo del espesor de plancha de la virola se utilizaron expresiones de la norma ASME Sección VIII Div I, en términos del radio interior; tanto para determinar el espesor por esfuerzos circunferenciales (junta longitudinal) como para el espesor por esfuerzos longitudinales (junta circunferencial).

Espesor mínimo requerido (junta longitudinal) – UG 27 (c)(1)

$$t = \frac{P_d \times R}{S \times E - 0,6 \times P_d}$$

Espesor mínimo requerido (junta circunferencial) – UG 27 (c)(2)

$$t = \frac{P_d \times R}{2 \times S \times E + 0,4 \times P_d}$$

A continuación, se determinó el valor de algunos parámetros para la utilización de las fórmulas.

Cálculo de la presión de diseño (P_d)

Para este cálculo se utilizó la expresión:

$$P_d = P_o + (10\%P_o \text{ o } 30 \text{ psi}) + P_{\text{columna fluido}} \dots\dots\dots (5.2)$$

Donde:

- $P_o = 0$

Considerando que el tanque opera a presión atmosférica

- $P_{\text{columna fluido}} = \gamma \times h_{\text{wcil}}$

$$\gamma = 12\,962,4 \text{ N/m}^3 \text{ (Peso específico de la SO)}$$

$$h_{\text{wcil}} = 2,475 \text{ m (Altura de nivel de trabajo – virola)}$$

$$P_{\text{columna fluido}} = (12\,962,4 \text{ N/m}^3) \times (2,475 \text{ m}) = 32\,081,9 \text{ N/m}^2$$

$$P_{\text{columna fluido}} = 4,65 \text{ psi}$$

- Para la sobre presión de operación se consideró 30 psi

Reemplazando valores en la expresión (5.2):

$$P_d = 0 + 30 \text{ psi} + 4,65 \text{ psi} = 34,65 \text{ psi}$$

En segundo lugar, se determinó que la temperatura máxima de diseño corresponde al área donde se interceptan el serpentín de calentamiento de vapor con la virola del tanque. Según lo indicado, la temperatura aproximada de la pared del tanque en esa intersección es de aproximadamente 305 °F, considerando que el vapor saturado que circula por el interior del serpentín está a una presión 4 barg. Por lo tanto:

$$\text{Temperatura máxima de diseño – Virola} = 305 \text{ °F}$$

En tercer lugar, se determinó el esfuerzo admisible (S) para el acero inoxidable 316. De la tabla N°5.22 se seleccionó el intervalo de esfuerzo máximo admisible 13 400 libras/pulg² – 18 100 libras/pulg² correspondiente a temperaturas no mayores a 400 °F; para efectos de este cálculo se consideró el valor promedio del intervalo seleccionado. Por lo tanto:

$$S = 15\,750 \text{ libras/pulg}^2$$

Para la eficiencia (E) se consideró juntas soldadas a tope con costura a ambos lados (las dimensiones internas del tanque permiten realizar este tipo de juntas) y una inspección de Rx por zonas. Por lo tanto, según la tabla N°5.23:

$$E = 0,85$$

Reemplazando valores en la expresión UG 27 (c)(1) para el cálculo del espesor mínimo requerido por esfuerzo circunferencial se obtuvo:

$$t = \frac{34,65 \text{ psi} \times (118,11/2) \text{ pulg}}{15\,750 \text{ psi} \times 0,85 - 0,6 \times 34,65 \text{ psi}} = 0,153 \text{ pulgadas}$$

Reemplazando valores en la expresión UG 27 (c)(2) para el cálculo del espesor mínimo requerido por esfuerzo longitudinal se obtuvo:

$$t = \frac{34,65 \text{ psi} \times (118,11/2) \text{ pulg}}{2 \times 15\,750 \text{ psi} \times 0,85 + 0,4 \times 34,65 \text{ psi}} = 0,076 \text{ pulgadas}$$

Se observó que el espesor de plancha "t" calculado por la expresión para el esfuerzo circunferencial es mayor que el calculado por la expresión para esfuerzo longitudinal, por lo que se consideró el espesor mínimo requerido de la virola:

$$t = 0,153 \text{ pulgadas}$$

A este espesor mínimo requerido por esfuerzo circunferencial se le adicionó la CA. Por lo tanto, el espesor mínimo de diseño (t_d) de la plancha inoxidable 316 para la virola es:

$$t_d = 0,153 \text{ pulgadas} + 0,075 \text{ pulgadas} = 0,228 \text{ pulgadas}$$

En la tabla N°5.24 se muestra los espesores y dimensiones comerciales de planchas de inoxidable 304 y 316.

Espesor		Peso Teórico (kg)	
pulg	mm	4' x 8'	5' x 10'
	0.3	7.14	11.15
1/64	0.4	9.53	14.86
1/54	0.45	10.72	16.72
1/46	0.50	11.91	18.58
	0.55	13.09	20.44
1/40	0.6	14.29	22.30
	0.7	16.67	26.01
1/32	0.8	19.05	29.73
1/27	0.9	21.43	33.45
1/20	1.2	28.58	44.59
1/16	1.5	35.72	55.74
5/64	2.0	47.57	74.32
3/32	2.5	59.45	92.90
1/8	3.0	71.35	111.48
	3.5	83.24	130.26
5/32	4.0	95.13	148.64
3/16	4.76	113.21	176.89
1/4	6.35	151.02	235.97
3/8	9.53	226.65	354.15
1/2	12.70	302.05	471.95
5/8	15.00	356.75	557.42
	18.00	428.10	668.90
3/4	19.05	453.07	707.92
1	25.40	604.09	943.89
1 1/4	31.75	755.12	1179.87
1 1/2	38.10	906.14	1415.84
2	50.80	1208.19	1887.79

Tabla N°5.24 Espesores de planchas de inoxidable
Fuente: Catalogo de inoxidables – Representaciones Fiorella (2021)

De la tabla N° 5.24 se seleccionó el espesor comercial (t_c) de la plancha de inoxidable 316, debiendo este ser siempre superior al t_d . Por lo tanto:

$$t_c = 0,25 \text{ pulgadas (6,35 mm)}$$

- **Cálculo del espesor de la plancha metálica inoxidable del fondo**

La nomenclatura utilizada en las fórmulas para el cálculo del fondo es la siguiente:

t: Espesor mínimo requerido del cuerpo (pulgadas)

t_d : Espesor de diseño (pulgadas)

t_c : Espesor comercial (pulgadas)

P_d : Presión interna de diseño (psi)

D: Diámetro mayor interior del cono (pulgadas)

α : La mitad del ángulo en el vértice (grados)

S: Valor del máximo esfuerzo admisible en el material a temperatura de diseño (psi)

E: Eficiencia de la junta.

CA: Corrosión admisible (pulgadas)

Como se determinó en el capítulo 5.4.4 del presente trabajo, el fondo del tanque es de tipo cónico, por lo que para el cálculo del espesor de plancha se utilizó la fórmula de la norma ASME Sección VIII Div I en su sección UG-32(g)(1), en términos de su diámetro interior, donde α es menor o igual a 30° .

$$t = \frac{P_d \times D}{2 \cos \alpha \times (S \times E - 0,6 \times P_d)}$$

En este trabajo $\alpha = 70^\circ$, pero la norma indica que para ángulos α mayores a 30° , el espesor del cono se obtendrá por el mismo método que para $\alpha \leq 30^\circ$, pero que será necesario calcular el correspondiente refuerzo mediante un análisis especial por Timoshenco u otros. Para ello se recurre al apéndice 1 en sus apartados 5(d) y 5(e) de la norma ASME donde se obtienen el área que se necesita de refuerzo y el área con que se cuenta para reforzar. Cabe indicar que el análisis para el refuerzo del fondo cónico no se realizó, por no ser parte del alcance de este trabajo.

A continuación, se determinó el valor de algunos parámetros para la utilización de las fórmulas.

Cálculo de la presión de diseño (P_d)

Para este cálculo se utilizó la expresión (5.2):

$$P_d = P_o + (10\%P_o \text{ o } 30 \text{ psi}) + P_{\text{columna fluido}}$$

Donde:

- $P_o = 0$

Considerando que el tanque opera a presión atmosférica

- $P_{\text{columna fluido}} = \gamma \times h_{\text{wtotal}}$

$$\gamma = 12\,962,4 \text{ N/m}^3 \text{ (Peso específico de la SO)}$$

$$h_{\text{wtotal}} = 3,0 \text{ m (Altura de nivel de trabajo total)}$$

$$P_{\text{columna fluido}} = (12\,962,4 \text{ N/m}^3) \times (3,0 \text{ m}) = 38\,887,2 \text{ N/m}^2$$

$$P_{\text{columna fluido}} = 5,64 \text{ psi}$$

- Para la sobre presión de operación se consideró también 30 psi

Reemplazando valores en la expresión (5.2):

$$P_d = 0 + 30 \text{ psi} + 5,64 \text{ psi} = 35,64 \text{ psi}$$

También se determinó que la temperatura máxima de diseño corresponde a la temperatura máxima que puede alcanzar la SO en el proceso de elaboración de la disolución, por lo que la temperatura aproximada, a la que estará sometida el fondo del tanque es de aproximadamente 203 °F (95 °C). Por lo tanto:

$$\text{Temperatura máxima de diseño – fondo} = 203 \text{ °F}$$

Con la temperatura máxima de diseño considerada para el fondo cónico, se determinó el esfuerzo admisible (S) para el acero inoxidable 316. De la tabla N°5.22 se seleccionó el intervalo de esfuerzo máximo admisible 14 600 lb/pulg² – 18 400 lb/pulg² correspondiente a temperaturas no mayores a 300 °F; para efectos de este cálculo se consideró el valor promedio del intervalo seleccionado. Por lo tanto:

$$S = 16\,500 \text{ lb/pulg}^2$$

Para la eficiencia (E) se consideró juntas soldadas a tope con costura a ambos lados (las dimensiones internas del tanque permiten realizar este tipo de juntas) y una inspección total por Rx. Por lo tanto, según la tabla N°5.23:

$$E = 1$$

Reemplazando valores en la expresión UG 32 (g)(1) para el cálculo del espesor mínimo requerido para el fondo cónico se obtuvo:

$$t = \frac{35,63 \text{ psi} \times 118,11 \text{ pulg}}{2 \times \cos 70^\circ \times (16\,500 \text{ psi} \times 1 - 0,6 \times 35,64 \text{ psi})} = 0,373 \text{ pulgadas}$$

A este espesor mínimo requerido se le adicionó la CA, por lo tanto, el espesor mínimo de diseño (t_d) de la plancha inoxidable 316 para el fondo cónico es:

$$t_d = 0,373 \text{ pulgadas} + 0,075 \text{ pulgadas} = 0,448 \text{ pulgadas}$$

De la tabla N° 5.24 se seleccionó el espesor comercial (t_c) de la plancha de inoxidable 316, debiendo este ser siempre superior al t_d . Por lo tanto:

$$t_c = 0,5 \text{ pulgadas (12,7 mm)}$$

- **Cálculo del espesor de la plancha metálica inoxidable del techo**

La nomenclatura utilizada en las fórmulas para el cálculo del espesor del techo es la siguiente:

t: Espesor mínimo requerido del cuerpo (pulgadas)

t_d : Espesor de diseño (pulgadas)

t_c : Espesor comercial (pulgadas)

P_d : Presión interna de diseño (psi)

D: Diámetro interior (pulgadas)

S: Valor del máximo esfuerzo admisible en el material a

temperatura de diseño (psi)

E: Eficiencia de la junta.

CA: Corrosión admisible (pulgadas)

Para el presente trabajo, se determinó que la tapa sea de tipo elipsoidal con relación del eje mayor respecto al eje menor de 2:1, por lo que para el cálculo del espesor de plancha se utilizó la fórmula de la norma ASME Sección VIII Div I en su sección UG-32(d), en términos de su diámetro interior,

$$t = \frac{P_d \times D}{2 \times S \times E - 0,2 \times P_d}$$

A continuación, se determinó el valor de algunos parámetros para la utilización de la fórmula.

Cálculo de la presión de diseño (P_d)

Para este cálculo se utilizó la expresión (5.2):

$$P_d = P_o + (10\%P_o \text{ o } 30 \text{ psi}) + P_{\text{columna fluido}}$$

Donde:

- $P_o = 0$

Considerando que el tanque opera a presión atmosférica

- $P_{\text{columna fluido}} = 0$

Considerando que el techo está por encima del nivel máximo de la SO.

Para la sobre presión de operación se consideró también 30 psi.

Reemplazando valores en la expresión α :

$$P_d = 0 + 30 \text{ psi} + 0 \text{ psi} = 30 \text{ psi}$$

También se determinó que la temperatura máxima de diseño corresponde a la temperatura máxima que puede alcanzar los vapores de la SO en el proceso de elaboración de la disolución, por lo que la temperatura aproximada, a la que estará sometida el techo del tanque es de aproximadamente 203 °F (95 °C). Por lo tanto:

$$\text{Temperatura máxima de diseño – fondo} = 203 \text{ °F}$$

Con la temperatura máxima de diseño considerada para el techo elipsoidal, se determinó el esfuerzo admisible (S) para el acero inoxidable 316. De la tabla N°5.22 se seleccionó el intervalo de esfuerzo máximo admisible 14 600 lb/pulg² – 18 400 lb/pulg² correspondiente a temperaturas no mayores a 300 °F; para efectos de este cálculo se consideró el valor promedio del intervalo seleccionado. Por lo tanto:

$$S = 16\,500 \text{ lb/pulg}^2$$

Para la eficiencia (E) se consideró juntas soldadas a tope con costura a ambos lados (las dimensiones internas del tanque permiten realizar este tipo de juntas) y una inspección total por Rx. Por lo tanto, según la tabla N°5.23:

$$E = 1$$

Reemplazando valores en la expresión UG 32 (d) para el cálculo del espesor mínimo requerido para el fondo cónico se obtuvo:

$$t = \frac{30 \text{ psi} \times 118,11 \text{ pulg}}{2 \times 16\,500 \text{ psi} \times 1 - 0,2 \times 30 \text{ psi}} = 0,107 \text{ pulgadas}$$

A este espesor mínimo requerido se le adicionó la CA, por lo tanto, el espesor mínimo de diseño (t_d) de la plancha inoxidable 316 para el techo del tanque es:

$$t_d = 0,107 \text{ pulgadas} + 0,075 \text{ pulgadas} = 0,182 \text{ pulgadas}$$

De la tabla N° 5.24 se seleccionó el espesor comercial (t_c) de la plancha de inoxidable 316, debiendo este ser siempre superior al t_d . Por lo tanto:

$$t_c = 0,187 \text{ pulgadas (4,76 mm)}$$

A continuación, se muestra un resumen de los espesores de plancha inoxidable 316 para la tapa, virola y fondo del tanque disolvedor:

Espesor de tapa = 0,187 pulgadas (4,76 mm)

Espesor de virola = 0,25 pulgadas (6,35 mm)

Espesor de fondo = 0,5 pulgadas (12,7 mm)

5.5.5 Cálculos para el sistema de agitación

5.4.5.1 Selección del impelente (agitador):

Los sistemas de agitación para líquidos se utilizan con numerosos objetivos, dependiendo de la etapa del proceso industrial. En este trabajo la agitación en el tanque de elaboración de SO se utilizó para cumplir 2 principales objetivos:

- Suspensión en agua de las partículas sólidas de nitrato para facilitar su disolución en la elaboración de la SO.
- Mejorar la transferencia de calor entre la SO (agua + nitrato de amonio) y el serpentín de calentamiento a vapor del tanque.

Para cumplir con los objetivos planteados para la agitación del agua y la SO, se consideró en el análisis los siguientes tres tipos principales de impelentes, de hélice, de paletas, y de turbina, con los cuales se resuelven aproximadamente el 95% de los problemas de agitación de líquidos. Cabe mencionar que cada uno de estos tipos de impelentes comprende muchas variaciones y subtipos, así como en algunos casos también se requieren impelentes especiales.

Para determinar el tipo de impelente o agitador se utilizaron gráficos basados en la viscosidad del líquido a agitar. En la figura N°5.11 se muestra un gráfico que permite seleccionar el tipo de impelente en función del volumen y la viscosidad del líquido a agitar.

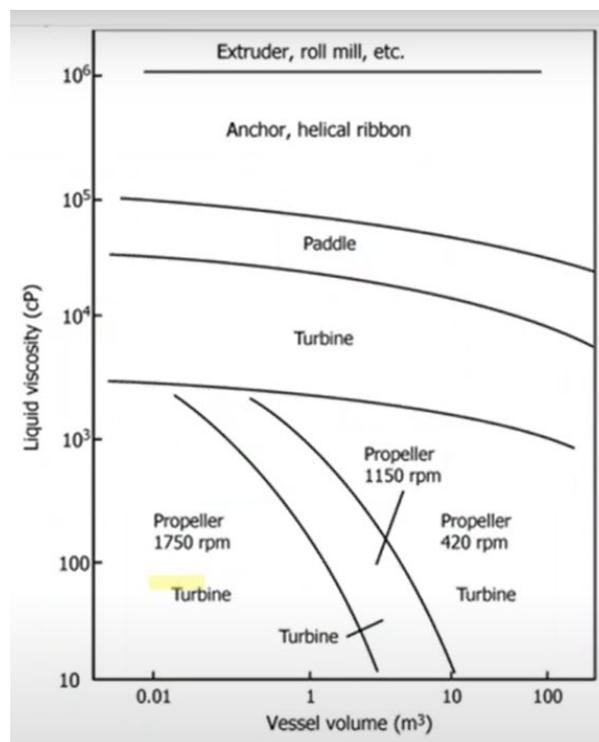


Figura N°5.11 Tipo de impelente en función del volumen y la viscosidad del líquido a agitar

Fuente: Mecánica de fluidos, transferencia de calor y masa – K. S. Raju (2011)

En la figura N°5.12 también se muestra un gráfico que permite seleccionar el tipo de impelente solamente en función de la viscosidad.

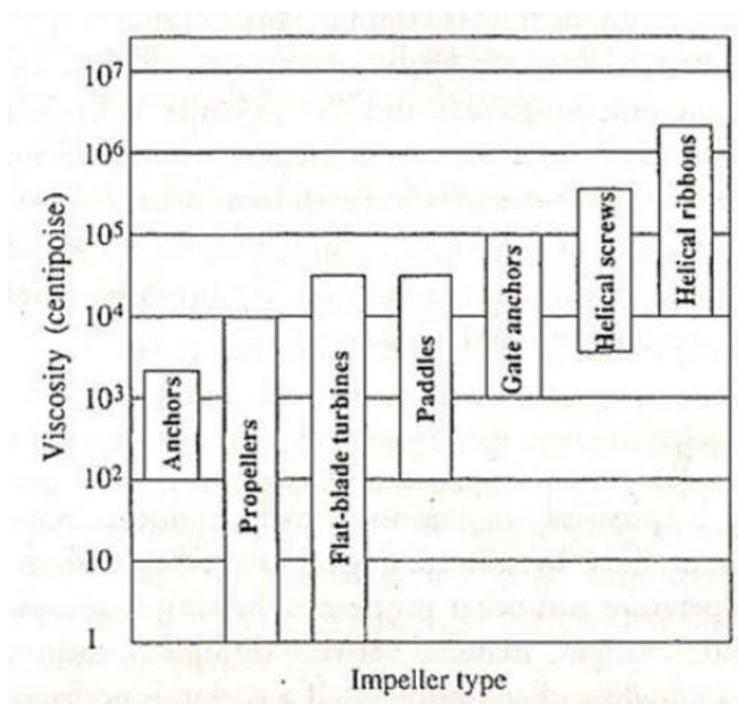


Figura N°5.12 Tipo de impelente en función de la viscosidad del líquido a agitar

Fuente: Mezclado de líquidos y procesos en tanques agitados – F.A. Holland y F.S. Chapman (1966)

Para el análisis en la selección del impelente del sistema de agitación se consideró la siguiente información de la Solución Oxidante (SO):

$$\mu_{SO} = 0,0023 \text{ kg/(m.s)}$$

$$V_{\text{trabajo}} = 18,95 \text{ m}^3$$

Ubicando los datos de viscosidad dinámica y volumen de trabajo en la gráfica de la figura N° 5.11 resultó como alternativas la utilización de los

impelentes de tipo hélice o tipo turbina. De igual manera según la gráfica N°5.12 resultó como alternativas la utilización de impelentes de tipo hélice o turbina.

En este trabajo el agitador tiene como objetivos facilitar la disolución del nitrato de amonio en el agua, así como mejorar la transferencia, por lo tanto, de las 2 alternativas para los tipos de impelentes, se seleccionó el de tipo turbina con 6 aspas inclinadas considerando lo mencionado en los siguientes trabajos:

- Castillo V. en su trabajo de titulación “Diseño de un agitador de fluidos” (2013) menciona que el “agitador de tipo turbina hojas inclinadas combina flujo radial con flujo axial y se utiliza especialmente para homogeneizar y mejorar la transferencia de calor con las paredes o serpentines dispuestos en el interior del estanque”.
- Warren L. et al en su obra “Operaciones unitarias en ingeniería química” menciona que “Una turbina de pala inclinada se emplea cuando la circulación global es importante”, también menciona que “el número de palas del agitador varía entre 4 y 16, pero generalmente son 6 u 8”.
- La facultad de Ciencias exactas y naturales de la especialidad de Biotecnología Industrial de la Universidad de Buenos Aires en su presentación “Agitación y Mezclado” (2017) menciona que “los

agitadores de tipo turbina con aspas cortas en inclinadas 45° generan en el fluido corrientes de con flujo axial y radial muy útil para procesos con solidos en suspensión”.

- L. Ricaurte en su trabajo de titulación "Diseño y simulación de un Tanque Mezclador de 10,000 gal para la elaboración de aceites lubricantes" (2016), menciona que “un agitador tipo turbina de aspas inclinadas 45° genera un patrón de flujo mixto y además son especialmente eficaces para el intercambio de calor con las paredes o serpentín interno”.

En la figura N° 5.13 se muestra un impelente (agitador) tipo turbina con aspas inclinadas.

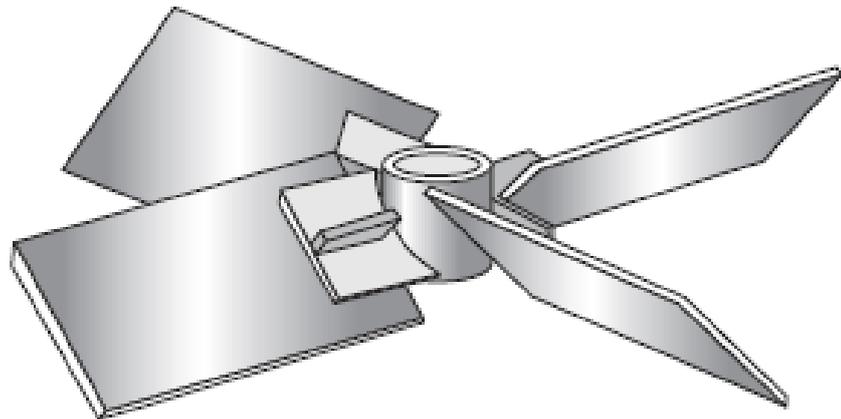


Figura N°5.13 Impelente tipo turbina con aspas inclinadas

Fuente: Operaciones unitarias en ingeniería química, Ed. 07 – Warren L. (2007)

De la misma forma en la figura N°5.14 se muestra el patrón de flujo generado por un impelente tipo turbina con aspas inclinadas.

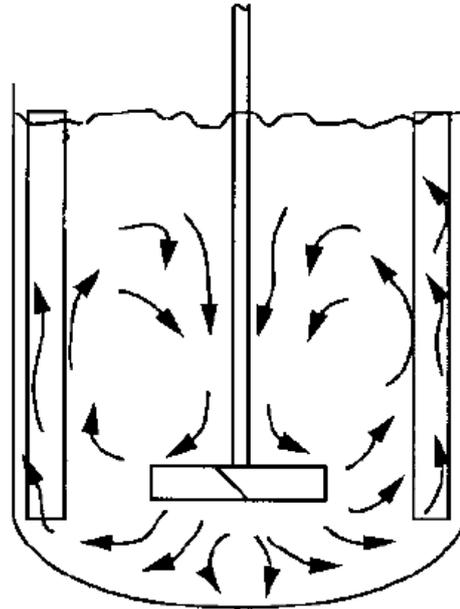


Figura N°5.14 Patrón de flujo generado por un impelente tipo turbina con aspas inclinadas.

Fuente: Manual de mezclado industrial – E. Paul (2004)

5.4.5.2 Potencia para el agitador

Para estimar la potencia que se requiere para hacer girar un agitador con una velocidad determinada, se disponen de correlaciones empíricas y gráficos que relacionan números adimensionales, tales como el número de Potencia, número de Reynolds, número de Froude y factores de forma (S_n) propios de un sistema de agitación en particular. Estos números adimensionales y factores de forma relacionan las características geométricas del recipiente, tipo de agitador, presencia o no de placas deflectoras, viscosidad dinámica (μ) y densidad (ρ) del líquido, así como la velocidad de rotación del agitador (n). De forma

general la relación entre estos números adimensionales se representa con la siguiente expresión:

$$N_p = \psi(\text{Re}, \text{Fr}, S_1, S_2, \dots, S_n)$$

Donde:

N_p : Numero de potencia

$$N_p = \frac{P}{n^3 D_a^5 \rho}$$

Re : Numero de Reynold

$$Re = \frac{n D_a^2 \rho}{\mu}$$

Fr : Número de Froude

$$Fr = \frac{n^2 D_a \rho}{g}$$

Nota: El número de Fr no es importante cuando se usan deflectores o cuando $Re < 300$.

S_n : Factores de forma

Como se observa obtener el N_p para un sistema de agitación es muy importante para el cálculo de la potencia de agitación. Despejando P en función de un N_p particular se tiene:

$$P = N_p n^3 D_a^5 \rho \quad (5.3)$$

Warren L. et al en su obra "Operaciones unitarias en ingeniería química" menciona que:

- Para números de Reynolds bajos ($Re < 10$), el flujo es laminar y la densidad no es más un factor y las líneas de N_p contra Re coinciden para un tanque con o sin placas deflectoras, y la pendiente de la línea en coordenadas logarítmicas es -1 . Por lo tanto:

$$N_p = \frac{K_L}{Re} \quad (5.4)$$

Reemplazando en la ecuación (5.4) se tiene:

$$P = K_L n^2 D_a^3 \mu \quad (5.5)$$

Donde K_L es una constante para un flujo laminar dependiente de un sistema de agitación en particular.

- Para números de Reynolds altos ($Re > 10000$), el número de potencia es independiente del número de Reynolds y la viscosidad ya no influye. En este intervalo, el flujo es totalmente turbulento. Por lo tanto:

$$N_p = K_T$$

Reemplazando en la ecuación (5.4) se tiene:

$$P = K_T n^3 D_a^5 \rho \quad (5.6)$$

Donde K_T es una constante para un flujo turbulento dependiente de un sistema de agitación en particular.

En las tablas N° 5.25 y N° 5.26 se dan los valores de las constantes K_T y K_L para varios tipos de impulsores y tanques.

$W/D_a, S_4$	Holgura (espacio libre entre las palas), S_2	K_T
0.3	0.33	2.0
0.2	0.33	1.63
0.2	0.25	1.74
0.2	0.17	1.91

Tabla N°5.25 K_T para una turbina de seis palas de 45° con variación de los factores de forma S_2 y S_4 .

Fuente: Operaciones unitarias en ingeniería química, Ed. 07 – Warren L. (2007)

Tipo de impulsor	K_L	K_T
Impulsor hélice, tres palas		
Paso 1.0 ⁴³	41	0.32
Paso 1.5 ³⁷	48	0.87
Turbina		
Disco de seis palas ³⁷ ($S_3 = 0.25, S_4 = 0.2$)	65	5.75
Seis palas inclinadas ⁴² (45°, $S_4 = 0.2$)	—	1.63
Cuatro palas inclinadas ³⁷ (45°, $S_4 = 0.2$)	44.5	1.27
Paleta plana, dos palas ⁴³ ($S_4 = 0.2$)	36.5	1.70
Impulsor HE-3	43	0.28
Cinta helicoidal	52	—
Ancla ³⁷	300	0.35

Tabla N°5.26 Valores de las constantes K_L y K_T para tanques que tienen cuatro deflectores en la pared del tanque, cuya anchura es igual a 10% del diámetro del tanque.

Fuente: Operaciones unitarias en ingeniería química, Ed. 07 – Warren L. (2007)

Para cálculos de la potencia de agitación donde $10 < Re < 10\ 000$ se utilizan graficas como el que se muestran en las figuras N°5.15 y N°5.16 para varios tipos de impulsores.

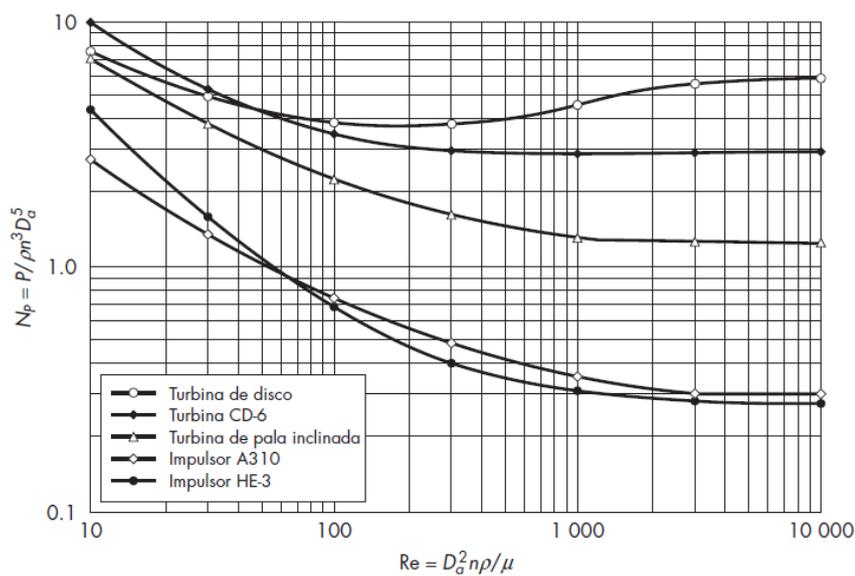


Figura N°5.15 Número de potencia N_p en función del número de Reynolds Re para turbinas e impulsores de alta eficiencia.

Fuente: Operaciones unitarias en ingeniería química, Ed. 07 – Warren L. (2007)

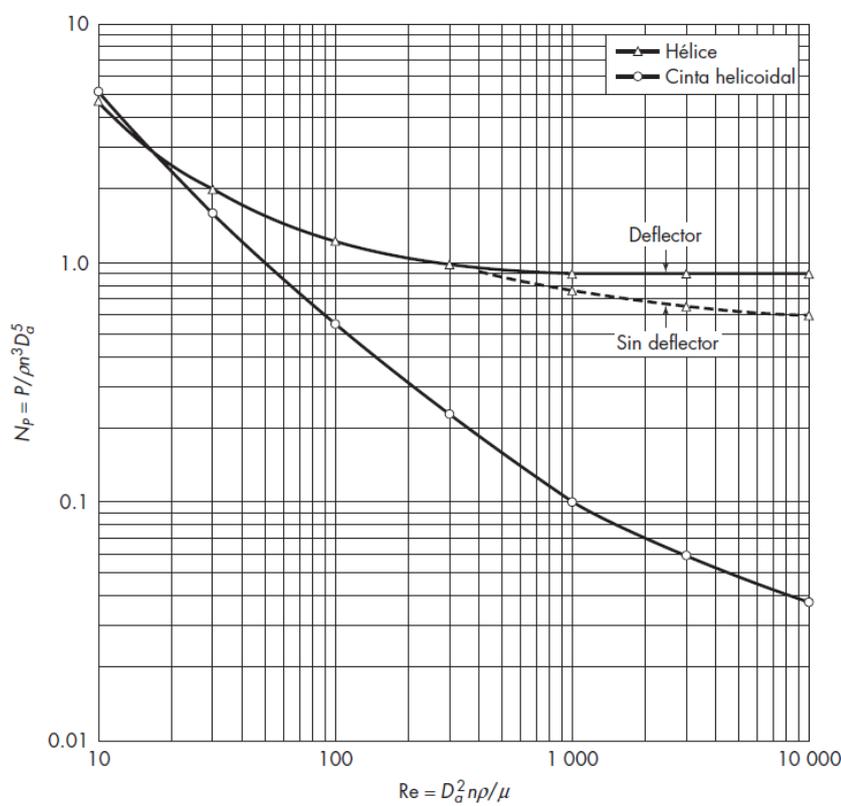


Figura N°5.16 Número de potencia N_p en función del número de Reynolds Re para hélices marinas (paso = 1,5:1) y cintas helicoidales.

Fuente: Operaciones unitarias en ingeniería química, Ed. 07 – Warren L. (2007)

En resumen, para la utilización de las gráficas, tablas o fórmulas que relacionan los números adimensionales, debe verificarse siempre bajo qué condiciones particulares o generales ha sido elaborada, debido a que dicha información varía según las características del agitador, factores de forma o proporciones geométricas.

Para relacionar las características geométricas del agitador con el recipiente, se utilizaron las proporciones de las principales variables dimensionales de un sistema de agitación estándar, que generalmente utiliza un agitador de turbina como el que se observa en la figura N° 5.17.

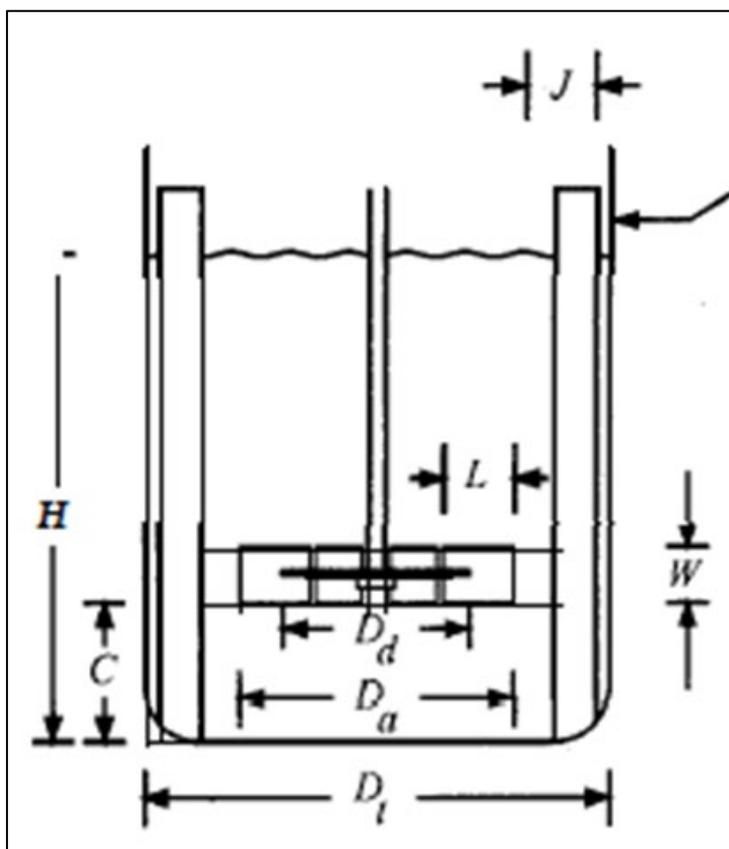


Figura N°5.17 Variables geométricas de un tanque agitador estándar.

Fuente: Procesos de transporte y operaciones unitarias, 3ra Edición – C. J. Geankoplis (1998)

Las proporciones geométricas típicas de las variables dimensionales de dicho tanque agitador utilizadas en este trabajo se muestran en la tabla N° 5.27. Estas proporciones son utilizadas en muchas correlaciones publicadas sobre el funcionamiento de los agitadores.

	$\frac{D_a}{D_t} = 0.3 \text{ a } 0.5$	$\frac{H}{D_t} = 1$	$\frac{C}{D_t} = \frac{1}{3}$
$\frac{W}{D_a} = \frac{1}{5}$	$\frac{D_d}{D_a} = \frac{2}{3}$	$\frac{L}{D_a} = \frac{1}{4}$	$\frac{J}{D_t} = \frac{1}{12}$

Tabla N°5.27 Proporciones geométricas estándar tanque-agitador

Fuente: Procesos de transporte y operaciones unitarias, 3ra Edición – C. J. Geankoplis (1998)

Donde:

D_a : Diámetro del agitador (m)

D_t : Diámetro interno del tanque (m)

D_d : Diámetro del disco, solo para turbinas tipo Roushton (m)

H : Altura del líquido medido desde el fondo del tanque (m)

C : Altura de ubicación del agitador medido desde el fondo del tanque (m)

W : Ancho de pala (m)

L : Longitud de pala (m)

J : Ancho de deflectores (m)

La altura de ubicación del impelente (C) puede variar de lo indicado en la tabla N°5.27 debido a requerimientos más específicos en la agitación. En la tabla N° 5.28 se muestra la altura de ubicación para un agitador con uno o dos impelentes.

Sistema de mezclado	Altura maxima del liquido	Número de impulsores	Elevación del impulsor desde el fondo del tanque	
			Impulsor inferior	Impulsor superior
Mezclado de líquidos	1,4	1	H/3	----
	2,1	2	D _t /3	2 H/3
Sólidos en suspensión	1,2	1	H/4	----
	1,8	2	D _t /4	2 H/3
Dispersión de gases	1,0	1	D _t /6	----
	1,8	2	D _t /6	2 H/3

Tabla N°5.28 Espacio libre y separación recomendados para el impulsor
Fuente: Manual de mezclado industrial – E. Paul (2004)

En este trabajo se definió inicialmente que la proporción H/D_t del tanque disolvedor sea igual a 1, además se tiene que el sistema de mezclado para el proceso es la disolución de sólidos en suspensión. Por lo tanto, según la tabla N°5.28 le corresponde 1 agitador con un solo impelente ubicado a H/4 del fondo (C = H/4).

Un problema muy común en tanques con agitación es la formación de vórtices los cuales traen efectos indeseables como el atrapamiento de aire, formación de oleadas, baja eficiencia en la agitación, así como otros efectos perjudiciales para el proceso de agitación. Según Warren L. en su trabajo “Operaciones unitarias en ingeniería química, Ed. 07”

menciona que, “para tanques de gran tamaño con agitadores verticales, el método más conveniente para reducir el vórtice es instalar deflectores, que impiden el flujo rotacional sin interferir con el flujo radial o longitudinal” también menciona que, por lo general, “son suficientes cuatro deflectores, para evitar el vórtice y la formación del vórtice”. Por lo tanto, para el sistema de agitación de este tanque disolvedor se consideró 4 placas deflectoras ubicados en forma vertical en las paredes internas de la virola del tanque disolvedor.

El proceso que se desarrolla en el tanque de elaboración de SO no solamente es de agitación, sino también de mezclado con suspensión de sólidos para facilitar la disolución del nitrato de amonio en el agua.

Existen diferentes formas para definir la condición de suspensión de los sólidos en un tanque agitado, Warren L. et al en su obra “Operaciones unitarias en ingeniería química” también menciona que en “los grados de suspensión se consideran el aumento de la uniformidad de la suspensión, así como el consumo de potencia inicial”. A continuación, se presentan los siguientes grados de suspensión:

- **Suspensión prácticamente completa con fileteado.** La mayor parte del sólido está suspendido en el líquido, con un pequeño porcentaje de partes fileteadas estacionarias de sólido en la periferia exterior del fondo o de otras partes del tanque.

- **Movimiento completo de las partículas.** Todas las partículas o bien están suspendidas, o se mueven a lo largo del fondo del tanque.

- **Suspensión completa o suspensión completa fuera del fondo.** Todas las partículas están suspendidas fuera del fondo del tanque o bien no permanecen sobre el fondo más que uno o dos segundos.

- **Suspensión uniforme.** Para velocidades del agitador considerablemente superiores a las que se requieren para obtener una suspensión completa, ya no hay líquido claro cerca.

En este trabajo se consideró que la potencia hidráulica entregada por el agitador del tanque para la elaboración de SO debe proporcionar un mezclado que resulte en una suspensión completa o uniforme de las partículas de nitrato de amonio.

Al respecto para la suspensión de sólidos en procesos de mezclado, las correlaciones halladas consideran una condición mínima de agitación con una potencia inicial para lograr una suspensión completa, y que de necesitarse para otros requerimientos tales como para la dispersión de un gas, o una buena transferencia de calor hacia un serpentín o un

encamisado, se debe considerar en algunos casos un mayor consumo de potencia inicial.

Debido a que es difícil medir o predecir la velocidad de distribución en un tanque de mezclado, los investigadores en general determinaron un parámetro denominado “velocidad crítica de agitación” para lograr una suspensión completa y desarrollaron ecuaciones empíricas para diferentes agitadores.

Zwietering propone la siguiente correlación para la velocidad crítica de agitación:

$$n_c D_a^{0.85} = S v^{0.1} D_p^{0.2} \left(g \frac{\Delta \rho}{\rho} \right)^{0.45} B^{0.13}$$

Donde:

n_c : Velocidad crítica del agitador (s^{-1})

D_a : Diámetro del agitador (m)

S : Factor de forma

v : Viscosidad cinemática (m^2/s)

D_p : Tamaño medio de la partícula (m)

g : Aceleración de la gravedad (m/s^2)

$\Delta \rho$: Diferencia de la densidad (kg/m^3)

ρ : Densidad del líquido (kg/m^3)

B : 100 x peso del sólido / peso del líquido

En la figura N°5.18 también se muestra gráficos para la potencia requerida por unidad de volumen (P/V) para la suspensión completa de arena en agua usando turbinas de pala inclinada de 45° (bombeo descendente). Algunos de los puntos mostrados se derivaron de observaciones directas, y otros fueron calculados a partir de correlaciones de otros investigadores.

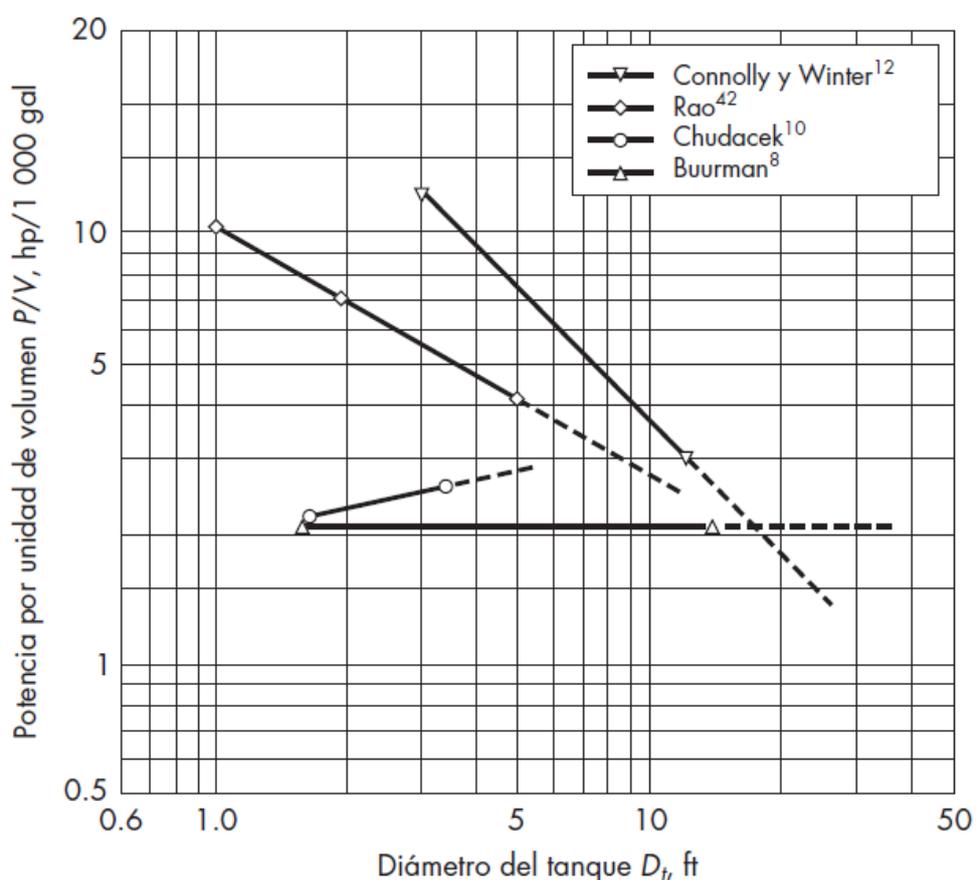


Figura N°5.18 Potencia requerida para la suspensión completa de arena en agua en tanques agitados utilizando turbinas de palas inclinadas.

Fuente: Operaciones unitarias en ingeniería química, Ed. 07 – Warren L. (2007)

Para el cálculo de la potencia requerida para la suspensión completa y la velocidad crítica de agitación (n_c), en este trabajo se consideró lo

presentado por Warren L. et al en su obra “Operaciones unitarias en ingeniería química”, donde previo análisis de las otras graficas de la figura N°5.16, utilizó la gráfica hallada por Buurman et al., aplicando también la ecuación adimensional de Zwietering para corregir las diferencias en las propiedades físicas y concentración de sólidos, considerando que n_c varia con:

$$D_p^{0,2} \Delta\rho^{0,45} B^{0,13}$$

A continuación, para el cálculo de la potencia requerida para la suspensión completa y la velocidad critica de agitación (n_c) se determinaron los valores de D_p , $\Delta\rho$ y B .

Para la elaboración de explosivos o semielaborados se tienen dos tipos de nitrato de amonio principalmente:

- Nitrato de amonio grado técnico
- Nitrato de amonio poroso o grado ANFO

En este trabajo se utilizó la información referente al nitrato de amonio grado técnico debido a que es el utilizado para la elaboración de la SO.

• Determinación de D_p :

En la figura N°5.19 se muestra el aspecto esférico que tienen los granos de nitrato de amonio que se utiliza para la elaboración de SO.



Figura N°5.19 Aspecto físico de los granos de nitrato de amonio.

Fuente: Síntesis y caracterización del nitrato de amonio como insumo para explosivos de uso industrial en la minería - Informe de suficiencia / A. Ramírez (2009)

En la tabla N°5.29 se muestran los valores de las propiedades físicas del nitrato de amonio grado técnico medidos en un control de calidad. En dicha tabla se observa que el 95% del diámetro de los granos de nitrato de amonio varía entre 1 mm a 4 mm de diámetro.

	Specifications	Actual results	Method GOST
Fraction of total mass of nitrate and ammonium nitrogen in terms of NH_4NO_3 in dry substance	34,4 pct. min	34,5 pct	GOST 2-85
Fraction of total mass of additives $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ in terms of MgO	0,3-0,4 pct.	0,33 pct	GOST 2-85 it.4.7
Moisture (drying method)	0,3 pct. max	0,29 pct	GOST 2-85 GOST 20851.4-75 it.1
Static strength of granules	0,8 kg/grain. min	1,5 kg/grain	GOST 21560.2-82
Granulometry 1-4 mm	95 pct. min	99,32 pct	GOST 21560.1-82
Colour	White	White	

Tabla N°5.29 Parámetros físicos del nitrato de amonio, grado técnico

Fuente: Certificado de Análisis de Nitrato de Amonio Grado Técnico Ruso de la empresa JSC "AZOT" BEREZNIKI (2006).

Síntesis y caracterización del nitrato de amonio como insumo para explosivos de uso industrial en la minería - Informe de suficiencia / A. Ramírez (2009).

Para efectos de cálculo se determinó que D_p tenga un valor promedio, por lo tanto:

$$D_p = 2,5 \text{ mm}$$

- Determinación de $\Delta\rho$:

En la tabla N°5.30 se muestra los valores de las propiedades físico químicas del nitrato de amonio donde se observa que la densidad del nitrato de amonio es de 1,72 g/mL, este valor corresponde a la densidad del nitrato de amonio grado técnico, presentado por A. Ramírez en su trabajo “Síntesis y caracterización del nitrato de amonio como insumo para explosivos de uso industrial en la minería - Informe de suficiencia” donde menciona que “Los gránulos de nitrato de amonio grado técnico tienen densidades de partícula cercanas a la densidad del nitrato de amonio sólido (ligeramente arriba de 1,72 g/mL)”.

Densidad	1,72 g/mL (20 °C)
Peso Molecular (ó masa molar)	80,04 g/mol
Densidad aparente	~ 600 - 700 kg/m ³
Valor de pH	4,5 - 7,0 (100g/L (20 °C))
Solubilidad en agua	1920 g/L (20 °C)
Solubilidad en etanol	38 g/L (20 °C)
Punto de ebullición	210 °C (483 K)
Punto de fusión	169 °C (442 K)
Descomposición térmica	> 210 °C (483 K)
Energía de formación	- 4424 kJ/kg
Entalpía de formación	- 4563 kJ/kg
Tipo de cristales: α - forma tetragonal β - forma ortorrómbica (Pseudotetragonal) γ - forma ortorrómbica δ - forma tetragonal ε - forma cúbica regular (Isométrico)	Rango de temperatura: (°C) - 18 a - 16 - 16 a 32,1 32,1 a 84,2 84,2 a 125,2 125,2 a 169,6
Número CAS	6484-52-2
Número UN	1942
Frase R	R 8-9
Frase S	S 15-16-41
Etiqueta de peligrosidad	Material oxidante (5.1)
Clasificación de Riesgo (NFPA)	
Health (Salud)	: 1 (color azul)
Flammability (Inflamabilidad)	: 1 (color rojo)
Reactivity (Reactividad)	: 3 (color amarillo)
Specific hazard (Riesgo específico: contacto)	: 2 Oxidante (color blanco)
(0): No especial (1): Ligero (2): Moderado (3): Severo (4): Extremo	

Tabla N°5.30 Propiedades físico químicas del nitrato de amonio

Fuente: Síntesis y caracterización del nitrato de amonio como insumo para explosivos de uso industrial en la minería - Informe de suficiencia / A. Ramírez (2009).

Por lo tanto:

$$\rho_{\text{nitrato amonio grado tecnico}} = 1,72 \text{ g/cm}^3$$

Para el cálculo de $\Delta\rho$ se analizaron 2 situaciones:

- Inicio del proceso de disolución, es decir cuando el contenido del tanque disolvedor es solo agua a 25°C. En la tabla N° 5.31 se presenta la medida de la densidad del agua a diversas temperaturas.

Temperatura °C	Densidad kg/m ³	Temperatura °C	Densidad kg/m ³
0	999.84	45	990.22
5	999.96	50	988.05
10	999.70	55	985.70
15	999.10	60	983.21
20	998.20	65	980.57
25	997.05	70	977.78
30	995.65	75	974.86
35	994.03	80	971.80
40	992.21	85	968.62

Tabla N°5.31 Medida de la densidad del agua a diversas temperaturas
Fuente: Termodinámica técnica / J. Segura (1993).

Por lo tanto, de la tabla N° 5.31 se selecciona el valor de densidad del agua a 25 °C:

$$\rho_{\text{agua a } 25^{\circ}\text{C}} = 0,997 \text{ g/cm}^3$$

- Culminación del proceso de disolución, es decir cuando el contenido del tanque disolvedor es la SO, cuya densidad promedio es:

De la tabla N°5.6 se tiene que la densidad de la SO varía entre 1,32 g/cm³ y 1,36 g/cm³, por lo tanto, para efectos de cálculo se consideró la densidad promedio de la SO (ρ_{SO}) en:

$$\rho_{SO} = 1,34 \text{ g/cm}^3$$

De estas situaciones se consideró en la que el contenido del tanque disolvedor es solo agua, ya que es la más exigente para el cálculo de la potencia y n_c debido a que:

- La concentración de sólidos en suspensión en el líquido es mayor al inicio que al final del proceso.
- La densidad del líquido contenido en el tanque es menor al inicio que al final del proceso, por lo tanto, mantener los sólidos en suspensión requiere mayor velocidad y potencia al inicio que al final del proceso.

Por lo tanto:

$$\Delta\rho = \rho_{\text{nitrato amonio tecnico}} - \rho_{\text{agua a } 25^{\circ}\text{C}}$$

$$\Delta\rho = 1,72 \text{ g/cm}^3 - 0,997 \text{ g/cm}^3$$

$$\Delta\rho = 0,723 \text{ g/cm}^3$$

- Determinación de B

Por definición el parámetro B se calcula con la siguiente formula:

$$B = 100 \times \text{peso del sólido} / \text{peso del líquido}$$

El proceso de elaboración de SO se realiza disolviendo 1000 kg de nitrato de amonio por vez, hasta llegar al peso total establecido para la fórmula de la SO. Por lo tanto,

para el cálculo de B se consideraron los 1000 kg de nitrato de amonio como peso del sólido en el líquido.

Para determinar B también se analizaron 2 situaciones:

- Inicio del proceso de disolución:

Peso del sólido = 1000 kg de nitrato de amonio

Al inicio del proceso de disolución solo se tiene agua a 25°C, teniendo en cuenta que la proporción de agua para la SO es el 30% de la capacidad total de preparación del tanque disolvedor las cuales se ingresan al inicio del proceso se tiene que:

Peso del líquido = $0,30 \times 25\ 000\ \text{kg} = 7\ 500\ \text{kg}$

Por lo tanto:

$B = 100 \times 1000\ \text{kg} / 7\ 500\ \text{kg} = 13,3$

- Final del proceso de disolución:

Peso del sólido = 1 000 kg de nitrato de amonio

Al final del proceso de disolución se tienen ya 24 000 kg de SO, por lo tanto, se consideró que:

Peso del líquido = 24 000 kg

Calculando B :

$$B = 100 \times 1000 \text{ kg} / 24\,000 \text{ kg} = 4,16$$

De los 2 valores calculados para B se consideró el más crítico para el cálculo de la potencia y n_c :

$$B = 13,3$$

En la tabla N° 5.32 se presentan un resumen de los valores determinados para D_p , $\Delta\rho$ y B .

Parámetro	Unidad	Arena	Nitrato de amonio
D_p	μm	200	2500
$\Delta\rho$	g/cm^3	1,59	0,723
B	---	11.1	13,3

Tabla N°5.32 Resumen de los valores determinados para D_p , $\Delta\rho$ y B
Fuente: Elaboración propia (2022)

Según lo indicado por L. Warren, se calculó los siguientes factores de corrección:

Cambiando en n_c :

$$\left(\frac{2\,500}{200}\right)^{0,2} * \left(\frac{0,723}{1,59}\right)^{0,45} * \left(\frac{13,3}{11,1}\right)^{0,13} = 1,190$$

Cambiando en P:

$$(1,190)^3 = 1,687$$

De la figura N°5.18, para el diámetro de 3 m (9,84 pies) calculado para el tanque de SO le corresponde un P/V = 2,1 hp/1 000 gal para obtener gránulos de arena en suspensión uniforme. Para su aplicación a gránulos de nitrato de amonio en suspensión se realizó el siguiente calculo:

$$P/V = (0,0021 \text{ hp/gal}) \times 1,687 = 0,0035 \text{ hp/gal}$$

Como ya se indicó anteriormente, el análisis se realizó para cuando se inicia el proceso de disolución, situación en la cual se ingresan 7,5 m³ (1702,6 gal) de agua en el tanque de disolución según requerimiento de la formula (30 % de agua, 70% de nitrato de amonio) para la elaboración de 25 T de SO. Por lo tanto, la potencia de agitación (P) calculada es:

$$P = 0,0035 \text{ hp/gal} * 1 702,6 \text{ gal} = 6,0 \text{ hp} \text{ <} 4,5 \text{ kW}$$

Para el cálculo de la n_c se consideró una agitación con flujo turbulento para favorecer el mezclado, disolución y calentamiento de la SO. Por lo tanto, se utilizó las siguientes expresiones para el cálculo de n_c :

$$N_P = K_T$$

$$P = K_T n^3 D_a^5 \rho$$

De la tabla N°5.26 para una turbina de seis palas inclinadas (45° , $S_4 = W/D_a = 0,2$) se tiene:

W: Ancho de pala del agitador

D_a : Diámetro del agitador

$$K_T = 1,63 \rightarrow N_p = 1,63$$

Warren L. et al en su trabajo **Operaciones unitarias en ingeniería química** menciona que “son frecuentemente recomendadas las relaciones $D_a/D_t = 1/3$ y $E/D_t = 1/4$ aunque algunos prefieren $D_a/D_t = 0,4$ para la suspensión de sólidos”. Para este trabajo se consideró las proporciones:

$$D_a/D_t = 0,4 ; E/D_t = 1/4$$

De los cálculos previos respecto a las dimensiones del tanque de elaboración de SO, se determinó que el $D_t = 3$ m. Por lo tanto:

$$D_a = 0,4 * 3 \text{ m} = 1,2 \text{ m}$$

También se calculó la ρ de la mezcla en suspensión:

Peso del agua al inicio del proceso = 7 500 kg

Peso de N. de amonio al inicio del proceso = 1 000 kg

Densidad del agua a 25 °C = 997 kg/m³

Para la mezcla en suspensión solo se consideró el volumen del agua a 25°C por lo tanto el volumen la mezcla en suspensión es:

$$V_m = 7500 \text{ kg} / 997 \text{ kg/m}^3 = 7,52 \text{ m}^3$$

$$\rho_m = (7500 + 1000) \text{ kg} / 7,52 \text{ m}^3 = 1133 \text{ Kg/m}^3$$

Calculando n_c usando la ecuación:

$$P = K_T n^3 D_a^5 \rho$$

$$n_c^3 = \frac{P}{K_T D_a^5 \rho}$$

$$n_c^3 = \frac{4500 \text{ W}}{1,63 * (1,2\text{m})^5 * 1133 \text{ kg/m}^3}$$

$$n_c = 1 \text{ rev/s} \langle \rangle 60 \text{ RPM}$$

Para la potencia del motor reductor del agitador, se seleccionó una potencia comercial inmediata superior a los requerido por los cálculos (4,5 kW) siendo esta:

$$\text{Potencia} = 5,5 \text{ kW}$$

5.5.6 Diseño térmico para el intercambiador de calor tipo serpentín (ICS)

La selección del ICS está basada en el análisis del diseño mediante la matriz morfológica realizado en el capítulo “Selección de Soluciones” (5.4.3), además también se consideró los siguientes trabajos de investigación respecto a la eficiencia de los IC de este tipo. A continuación, se mencionan extractos de las investigaciones al respecto:

- A. Zachár, en su investigación “Análisis de intercambiadores de calor de tubos en espiral para mejorar la tasa de transferencia de calor con pared corrugada en espiral” publicada en la Revista Internacional de Transferencia de Calor y Masa, (June 2010) sobre diferentes métodos para mejorar la tasa de transferencia de calor en intercambiadores y sobre diferentes técnicas de mejora, menciona que éstas se han clasificado en dos categorías principales:
 - Técnicas activas que requieren alimentación externa (por ejemplo, vibración o campos electromagnéticos).
 - Técnicas pasivas que no necesitan alimentación externa (por ejemplo, geometrías especiales o inserciones dentro del tubo).

Dentro de los métodos pasivos según menciona A. Zachar “un método pasivo muy usado es el de tubos en espiral en los que el

flujo secundario causado por la fuerza centrífuga aumenta la transferencia de calor”.

- J. Gonzalo et al en su publicación “Intercambiadores de calor de tubo en espiral” (2012) menciona que “la transferencia de calor en tubos circulares curvados ha sido objeto de varios estudios, los cuales tienen amplia difusión en la literatura científica; las tasas de transferencia de calor en las bobinas helicoidales son más altas en comparación con los tubos rectos, por lo cual son ampliamente utilizados en aplicaciones industriales”.

- A. Pérez et al en su trabajo “Diseño de un intercambiador de calor de serpentín para el enfriamiento de acetona”, menciona que “Los intercambiadores de calor de serpentín son empleados en varias aplicaciones industriales debido a su estructura compacta y los elevados coeficientes de transferencia de calor que usualmente se obtienen”.

En este trabajo el diseño térmico del ICS del tanque consistió en determinar el flujo de vapor saturado a una presión de 4 Barg (fluido de calentamiento) y el área de transferencia de calor requerido para suministrar la potencia calorífica para el proceso de elaboración de SO. El intervalo de tiempo considerado en este trabajo para la elaboración

de SO, según requerimiento inicial del diseño es de 1 hora, periodo donde se realizan las siguientes etapas:

- 1ra etapa: Llenado de agua al tanque a temperatura ambiente (se consideró a 25 °C) hasta la cantidad indicada por la formulación. Posterior al suministro de agua se arranca el agitador.
- 2da etapa: Alimentación del nitrato de amonio y su disolución en el agua contenida en el tanque. En esta etapa se produce una reacción endotérmica (enfriamiento) por lo que de manera simultánea a la alimentación de nitrato de amonio se suministra la potencia de calentamiento necesaria para que la temperatura del contenido del tanque no disminuya, y se mantenga constante a la temperatura inicial del agua (25 °C).
- 3ra etapa: Calentamiento de la disolución o SO desde la temperatura de 25 °C a la temperatura de 80 °C. Este proceso de calentamiento se inicia después de que se ha ingresado todo el nitrato de amonio al tanque según la formulación.

Para la 1ra etapa, se determinó el tiempo de llenado de agua (t) al tanque disolvedor para calcular el tiempo disponible para las siguientes etapas del proceso.

En el alcance del presente trabajo no está considerado el cálculo hidráulico de la instalación para el suministro de agua al tanque de elaboración de SO, por lo tanto, solo se indicó referencialmente el caudal

de bombeo necesario (40 l/s) para el proceso de elaboración de SO. Según se muestra en la figura N°5.20 una bomba centrífuga Hidrostral modelo 65-250 existente en el mercado nacional cumple con el caudal requerido.

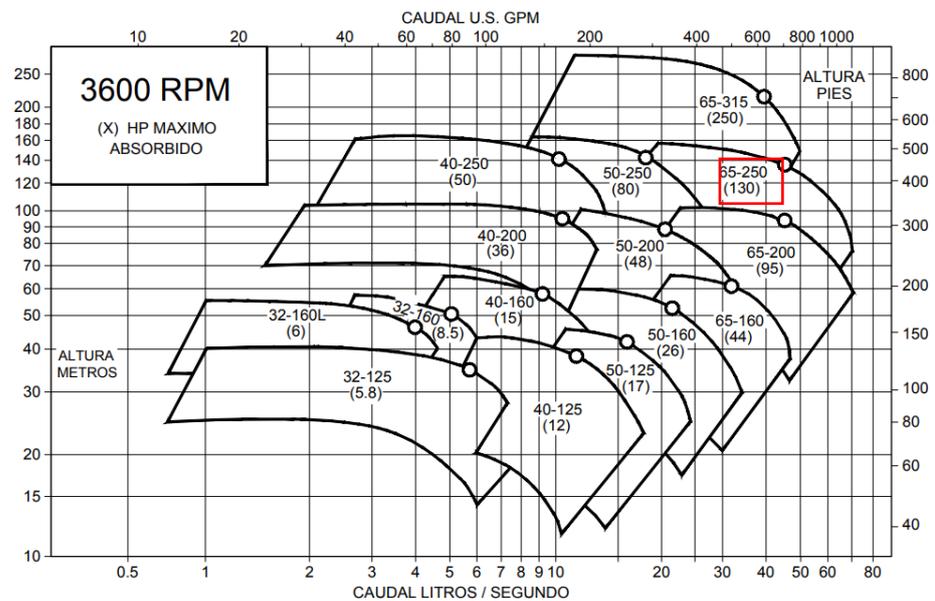


Figura N°5.20 Curvas para selección de bombas

Fuente: Catalogo 1 - Bombas Centrífugas ISO 2858 Rev F -Hidrostral (2015)

Para calcular el tiempo de suministro de agua se sabe que la capacidad total de preparación del tanque considerada para este trabajo es de 25 000 Kgf de donde el 30% será en agua según formulación, por lo tanto:

$$W_{H_2O} = 0,3 * 25\ 000\ \text{kgf} = 7\ 500\ \text{kgf}$$

$$\gamma_{H_2O} = 997\ \text{kgf/m}^3 \quad (\text{Temperatura} = 25\ ^\circ\text{C})$$

$$Q_{H_2O} = 40\ \text{l/s} \Leftrightarrow 2,4\ \text{m}^3/\text{min}$$

$$Q_{H_2O} * t = W_{H_2O} / \gamma_{H_2O}$$

$$t = W_{H_2O} / (\gamma_{H_2O} * Q_{H_2O})$$

$$t = 7500 \text{ kgf} / (997 \text{ kgf/m}^3 * 2,4 \text{ m}^3/\text{min})$$

$$t = 3 \text{ minutos}$$

Por lo tanto, el tiempo de bombeo o de suministro de agua tendrá una duración de 3 minutos para las 7 500 kgf de agua que se utilizarán en la elaboración de la SO.

Para la 2da etapa, también se realizaron cálculos para determinar el tiempo de duración de esta etapa, así como la potencia calorífica necesaria para mantener constante la temperatura de la SO en elaboración y que este parámetro no esté por debajo de la temperatura de saturación según la proporción de nitrato de amonio (solute) y agua (solvente).

Debido a que en el alcance del presente trabajo no está considerado el diseño o cálculos referentes al sistema o equipos de alimentación del nitrato de amonio (tornillo transportador, faja transportadora, discos transportadores, etc), para la alimentación o suministro de esta materia prima se consideró referencialmente un sistema de transporte con una capacidad de alimentación de 500 kgf/min de nitrato de amonio. De los 25 000 kgf de la capacidad total del tanque para la elaboración de SO el 70% corresponde al peso del nitrato de amonio, por lo tanto:

$$W_{\text{NH}_4\text{NO}_3} = 0,7 * 25\ 000 \text{ kgf} = 17\ 500 \text{ kgf}$$

$$\dot{W}_{\text{NH}_4\text{NO}_3} = 500 \text{ kgf/min}$$

$$\dot{W}_{NH_4NO_3} * t = W_{NH_4NO_3}$$

$$t = W_{NH_4NO_3} / \dot{W}_{NH_4NO_3}$$

$$t = 17\,500 \text{ kgf} / 500 \text{ kgf/min}$$

$$t = 35 \text{ minutos}$$

Por lo tanto, del cálculo se estableció que el tiempo de alimentación de nitrato de amonio es de 35 minutos.

Con el flujo de alimentación de nitrato de amonio también se determinó la potencia calorífica necesaria para mantener la temperatura del contenido del tanque a la temperatura a la que ingresó el agua ($T = 25^\circ\text{C}$), considerando que el calor que se absorbe por la reacción endotérmica debe ser igual al calor que se suministra a través del IC del tanque. A esta potencia calorífica necesaria para mantener la temperatura se le denominó potencia de disolución y se calculó con la siguiente expresión:

$$\dot{Q}_d = \frac{\Delta H_{d(NH_4NO_3)} \dot{W}_{NH_4NO_3}}{M_{NH_4NO_3}} \quad (5.8)$$

Donde:

\dot{Q}_d : Potencia calorífica para la disolución (kW)

$\Delta H_{d(NH_4NO_3)}$: Entalpia de disolución (kJ/mol)

$M_{NH_4NO_3}$: Masa molar del NH_4NO_3 (kg/mol)

$\dot{m}_{NH_4NO_3}$: Flujo masico de NH_4NO_3 (kg/min)

Para obtener el calor o entalpia de disolución del nitrato de amonio en agua se utilizó la tabla N°5.33 donde se muestra los calores de disolución de diferentes compuestos químicos.

Calor de solución de algunos compuestos seleccionados		
cloruro de hidrógeno	-	74.84
nitrato de amonio	+	25.69
amoníaco	-	30.50
hidróxido de potasio	-	57.61
hidróxido de cesio	-	71.55
cloruro de sodio	+	3.87
clorato de potasio	+	41.38
nitrato de potasio	+	34.89
ácido acético	-	1.96
hidróxido sódico	-	44.51
Cambio en entalpía ΔH^\ominus en kJ/mol en agua ¹		

Tabla N°5.33 Entalpia de disolución de diferentes compuestos
Fuente: Sitio web Wikipedia (Julio 2021)

La masa molar del nitrato de amonio se obtuvo de la tabla N°5.34 donde se muestran sus principales propiedades físicas.

9. PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS		
9.1	Estado físico:	Sólido
9.2	Apariencia:	Granulado
9.3	Color:	Blanco amarillento
9.4	Olor:	Sin olor
9.5	Densidad:	1.7 g/cm ³
9.6	pH:	4 (10% solución en agua)
9.7	Peso molecular:	80.05 g/mol
9.8	Solubilidad:	1870 g/L (20° C)
9.9	Punto de ebullición:	No disponible
9.10	Punto de inflamación:	No disponible
9.11	Punto de sublimación:	No disponible
9.12	Punto de fusión:	169 °C
9.13	Temperatura de auto ignición:	No disponible
9.14	Temperatura de descomposición:	210 °C

Tabla N°5.34 Propiedades fisicoquímicas del nitrato de amonio
Fuente: Hoja de datos de seguridad de materiales-Yara (2015)

A continuación, se muestran los valores que consideraron para este cálculo:

$$\Delta H_{d(NH_4NO_3)} : 25,69 \text{ kJ/mol}$$

$$M_{NH_4NO_3} : 80,043 \text{ g/mol}$$

$$\dot{m}_{NH_4NO_3} : 8,33 \text{ kg/s (500 kg/min)}$$

Reemplazando valores en la expresión (5.8) para la obtención de \dot{Q}_d :

$$\dot{Q}_d = \frac{25,69 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} * 8,33 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{80,043 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} * 1000$$

$$\dot{Q}_d = 2\,676 \text{ kW}$$

Por lo tanto, la potencia calorífica mínima requerida para mantener la temperatura constante dentro del tanque durante el proceso de disolución es de 2 676 kW.

Para la 3ra etapa, se determinó la potencia calorífica requerida, flujo de vapor saturado a 4 barg y el área de transferencia del IC tipo serpentín para calentar la SO desde la temperatura de 20 °C a 80 °C en el tiempo que quedó disponible después de los procesos de la 1ra y 2da etapa.

Para el cálculo del tiempo disponible para esta 3ra etapa se utilizó la siguiente expresión:

$$t_{3ra\ etapa} = t_{total} - (t_{1ra\ etapa} + t_{2da\ etapa})$$

Donde:

$$t_{total} = 60 \text{ minutos}$$

$$t_{1ra\ etapa} = 3 \text{ minutos}$$

$$t_{2da\ etapa} = 35 \text{ minutos}$$

Por lo tanto:

$$t_{3ra\ etapa} = 60 \text{ minutos} - (3 \text{ minutos} + 35 \text{ minutos})$$

$$t_{3ra\ etapa} = 22 \text{ minutos}$$

Para los cálculos térmicos en esta 3ra etapa del proceso de disolución se utilizaron correlaciones o fórmulas que se basan principalmente en el balance de energía:

$$Q_c = Q_g + Q_p$$

Donde:

Q_c : Calor cedido

Q_g : Calor ganado

Q_p : Calor perdido

Q_c , es el flujo de calor cedido por el fluido calentador (vapor saturado a 4barg) que circula por el interior del IC tipo serpentín para sostener el proceso de elaboración de SO.

Q_g , es el flujo de calor recibido por la SO para aumentar la temperatura de la SO contenido en el tanque disolvedor.

Q_p , es el flujo de calor perdido hacia el ambiente en forma de calor a través de las paredes del tanque.

Para el cálculo de Q_c se utilizó la expresión con las variables referidos a la potencia calorífica (calor latente) entregada por el vapor saturado (4 Barg):

$$Q_c = \dot{m}_{vapor}(h_f - h_i)$$

Donde:

\dot{m}_{vapor} : Flujo masico de vapor saturado a 4 barg

h_f : Entalpia final (vapor saturado a 4 barg)

h_i : Entalpia inicial (liquido saturado a 4 barg)

Para el cálculo de Q_g se utilizó la expresión con variables referidos a la potencia calorífica (calor sensible) para calentar la SO:

$$Q_g = \frac{m_{SO}}{t} C_{p_{SO}}(T_f - T_i)$$

Donde:

m_{SO} : masa total de SO según capacidad del tanque disolvedor (Kg).

t : Tiempo disponible para el calentamiento de la SO

Cp_{SO} : Calor específico de SO (kJ/kg.°K)

T_f : Temperatura final de calentamiento de la SO (°C)

T_i : Temperatura inicial de la SO (°C)

Para el cálculo de \dot{Q}_p se utilizaron los valores de las dimensiones geométricas del tanque calculadas en el capítulo 5.4.4, así como especificaciones del material del tanque, considerando un espesor de aislamiento de 0,05 m (2") de lana mineral. A continuación, se muestran los valores considerados:

Diámetro del tanque = 3,0 m

Altura de la virola = 3,525 m

Diámetro mayor del fondo cónico = 3,0 m

Diámetro menor del fondo cónico = 0,114 m

Altura del fondo cónico = 0,525 m

Temperatura en el interior del tanque = 80 °C

Temperatura en el exterior del tanque = 20 °C

Espesor de aislamiento = 0,05 m

Conductividad del acero inoxidable 316 = 15 W/(m·°K)

En la tabla N°5.35 se muestran los cálculos del calor perdido por las paredes o superficie del tanque disolvedor.

Zona del Tanque	Area (m ²)	Conduc. Inox 316 (W/m.K)	Conductividad de aislamiento lana mineral (W/m.K)	Espesor de plancha inox 316 (m)	Espesor de aislam. (m)	Calor perdido (W)
Virola - Aislado	33.22	15	0.0365	0.00635	0.05	1454.69
Fondo - Aislado	7.94	15	0.0365	0.0127	0.05	347.47
Techo - Aislado	7.07	15	0.0365	0.00476	0.05	309.53
					Qp	2111.69

Tabla N°5.35 Calor perdido a través de las paredes del tanque
Fuente: Elaboración propia (2022)

Por lo tanto:

$$\dot{Q}_p = 2,11 \text{ kW}$$

Para relacionar la potencia calorífica necesaria para calentar la SO (\dot{Q}_c) con la capacidad de transferencia de calor del serpentín de calentamiento se consideró que $\dot{Q}_c = Q$ y se utilizó la siguiente correlación:

$$Q = U A \Delta T_m$$

Esta correlación nos permitió conocer el área de transferencia (A) asociada a un flujo de calor (Q) referido al cambio de temperatura media (ΔT_m) apropiado, y a un coeficiente global de transferencia de calor (U).

- Para este trabajo el área depende del desarrollo de la espira que describe el tubo del serpentín, es decir, de la longitud total del tubo y de su diámetro:

- Para determinar el cambio de temperatura medio se utilizó la expresión del cambio de temperatura medio logarítmico (ΔT_{ml}), que es la más utilizada para estos cálculos:

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)}$$

Donde la definición de los incrementos de temperatura ΔT_1 y ΔT_2 depende de las temperaturas de entrada y salida de los fluidos frío y caliente, ya sea en flujo paralelo o en contracorriente.

- Para determinar el coeficiente global de transferencia de calor (U) para intercambiadores de calor de tubo en espiral se utilizó la siguiente expresión:

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln(D_o/D_i)}{2\pi k L} + \frac{1}{h_o A_o}$$

Donde:

A_i : Área de la superficie interna del tubo del serpentín (m^2).

A_o : Área de la superficie externa del tubo del serpentín (m^2).

h_i : Coeficiente convectivo de la superficie interna del tubo ($W/m^2 \cdot K$)

h_o : Coeficiente convectivo de la superficie externa del tubo ($W/m^2 \cdot K$)

D_i : Diámetro interno del tubo (m).

D_o : Diámetro externo del tubo (m).

L : Longitud del tubo, espira desarrollada (m)

k : Conductividad del material del tubo (W/m·K)

Despejando el coeficiente global de transferencia de calor exterior (U_o) en términos de las dimensiones exteriores del serpentín, se tiene la siguiente expresión:

$$U_o = \frac{1}{\frac{D_o}{h_i D_i} + \frac{D_o \ln(D_o/D_i)}{2k} + \frac{1}{h_o}} \quad (5.9)$$

Para calcular Q_c , Q_g y Q se realizaron cálculos preliminares para determinar los valores de las variables h_i , h_o , Cp_{so} y U_o mencionadas en las expresiones mostradas. Para estos cálculos se utilizaron tablas o correlaciones de investigaciones o de literatura especializada.

5.4.6.1 Determinación coeficiente convectivo de la superficie externa (h_o) del tubo del serpentín

Según se determinó en el capítulo 5.4.5, el impelente a utilizar es de tipo turbina con 6 aspas inclinadas. Por lo tanto, de la tabla N°1.5 (correlaciones o modelos obtenidos para tanques calentados con ICS y diversos tipos de agitadores – B. Miranda) se utilizó la siguiente expresión para el cálculo de h_o :

$$\text{Nu} = 0,196\text{Re}^{2/3}\text{Pr}^{0,84}\phi^{0,14}\text{S}^{-1,58}$$

Desarrollando cada uno de los números adimensionales la expresión para su utilización con la SO tomó la siguiente forma:

$$\frac{h_o D_o}{k_{SO}} = 0,196 \left(\frac{n D_a^2 \rho_{SO}}{\mu_{SO}} \right)^{2/3} \left(\frac{Cp_{SO} \mu_{SO}}{k_{SO}} \right)^{0,84} \left(\frac{\mu_{SO}}{\mu_{wso}} \right)^{0,14} \left(\frac{D_a}{D_T} \right)^{-1,58} \quad (5.10)$$

Donde:

D_T : Diámetro del tanque (m).

D_a : Diámetro del agitador (m).

D_o : Diámetro exterior del tubo del serpentín (m).

n : Velocidad de giro del agitador (s^{-1})

μ_{SO} : Viscosidad dinámica del fluido a la temperatura promedio de 80°C en el tanque ($\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$).

μ_{wso} : Viscosidad dinámica del fluido a la temperatura de 151.9°C en la superficie del tubo del serpentín ($\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$).

ρ_{SO} : Densidad de la SO (kg/m^3)

Cp_{SO} : Capacidad calorífica de la SO ($\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$)

k_{SO} : Conductividad térmica de la SO ($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)

Como se puede observar, para la utilización de la expresión (5.10) y determinar el valor de h_o , se calculó previamente y en forma teórica los valores de C_{pSO} , k_{SO} y μ_w .

- **Cálculo de la capacidad calorífica de la SO (C_{pSO})**

Para este cálculo se utilizó la regla de Kopp el cual es un método empírico y simple que se aplica para determinar en forma aproximada la capacidad calorífica o calor específico de una mezcla.

$$Cp_m = \sum y_i Cp_i$$

Donde:

Cp_m : Capacidad calorífica de una mezcla

y_i : Fracción molar o en masa del i-esimo del componente

Cp_i : Capacidad calorífica del i-esimo del componente

Para su aplicación a este trabajo la expresión para el cálculo de la capacidad calorífica de la SO se presentó de la siguiente forma:

$$Cp_{SO} = y_{H_2O} * Cp_{H_2O} + y_{NH_4NO_3} * Cp_{NH_4NO_3} \quad (5.11)$$

Donde:

Cp_{SO} : Capacidad calorífica de la SO (J/(g·K)).

y_{H_2O} : Fracción molar del agua en la SO

Cp_{H_2O} : Capacidad calorífica del agua (J/(g·K)).

$y_{NH_4NO_3}$: Fracción molar del nitrato de amonio en la SO

$Cp_{NH_4NO_3}$: Capacidad calorífica del nitrato de amonio (J/(g·K)).

Los valores considerados para las capacidades caloríficas del agua y el nitrato de amonio son:

$$Cp_{H_2O} = 4,18 \frac{J}{g \cdot K}$$

$$Cp_{NH_4NO_3} = 3,39 \frac{J}{g \cdot K}$$

A continuación, se presentan los cálculos referentes a las fracciones molares del agua (y_{H_2O}) y del nitrato de amonio ($y_{NH_4NO_3}$) en la SO.

$$y_{H_2O} = \frac{Nm_{H_2O}}{Nm_{SO}} \qquad y_{NH_4NO_3} = \frac{Nm_{NH_4NO_3}}{Nm_{SO}}$$

$$Nm_{SO} = Nm_{H_2O} + Nm_{NH_4NO_3}$$

$$Nm_{H_2O} = \frac{m_{SO} * \%m_{H_2O}}{M_{H_2O}} * 1000$$

$$Nm_{NH_4NO_3} = \frac{m_{SO} * \%m_{NH_4NO_3}}{M_{NH_4NO_3}} * 1000$$

Donde:

Nm_{H_2O} : numero de moles de agua en la SO (moles)

$Nm_{NH_4NO_3}$: número de moles de nitrato de amonio en la SO (moles)

Nm_{SO} : número de moles totales en la SO (moles)

m_{SO} : masa total de SO (kg)

$\%m_{H_2O}$: Porcentaje en masa de agua en la SO

$\%m_{NH_4NO_3}$: Porcentaje en masa de nitrato de amonio en la SO.

M_{H_2O} : Masa molar del agua (g/mol)

$M_{NH_4NO_3}$: Masa molar del nitrato de amonio (g/mol)

A continuación, se presentan los valores considerados para los cálculos de las fracciones molares:

$$m_{SO} = 25\,000 \text{ kg}$$

$$\%m_{H_2O} = 30\%$$

$$\%m_{NH_4NO_3} = 70\%$$

$$M_{H_2O} = 18 \text{ g/mol}$$

$$M_{NH_4NO_3} = 80 \text{ g/mol}$$

Reemplazando valores para el cálculo de Nm_{H_2O} , $Nm_{NH_4NO_3}$ y

Nm_{SO} :

$$Nm_{H_2O} = \frac{25\,000 \text{ kg} * 0,3}{18 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} * 1000 = 416\,320 \text{ moles}$$

$$Nm_{NH_4NO_3} = \frac{25\,000 \text{ kg} * 0,7}{80 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} * 1000 = 218\,750 \text{ moles}$$

$$Nm_{SO} = 416\,320 \text{ moles} + 218\,750 \text{ moles} = 635\,070 \text{ moles}$$

Por lo tanto, las fracciones molares son las siguientes:

$$y_{H_2O} = \frac{416320 \text{ moles}}{635\,070 \text{ moles}} = 0,7$$

$$y_{NH_4NO_3} = \frac{218\,750 \text{ moles}}{635\,070 \text{ moles}} = 0,3$$

Reemplazando valores en la expresión (5.11) para el cálculo Cp_{SO} de la SO:

$$Cp_{SO} = y_{H_2O} \cdot Cp_{H_2O} + y_{NH_4NO_3} \cdot Cp_{NH_4NO_3}$$

$$Cp_{SO} = 0,7 \left(4,18 \frac{J}{g\,K} \right) + 0,3 \left(3,39 \frac{J}{g\,K} \right) = 3,9 \frac{J}{g\,K}$$

$$Cp_{SO} = 3,9 \frac{J}{g\,K}$$

- **Cálculo de la conductividad térmica de la SO (k_{so})**

Para este cálculo se utilizó el trabajo de C. Cruz Fierro (2020) “Algunos métodos de estimación para conductividad térmica” donde presenta la ecuación propuesta por Filippov para determinar la conductividad térmica de mezclas binarias de líquidos en base a la conductividad térmica de los líquidos puros y las fracciones peso.

$$k_m = w_1k_1 + w_2k_2 - 0,72w_1w_2(k_2 - k_1)$$

Donde:

k_m : Conductividad térmica de la mezcla

k_1 : Conductividad térmica del componente 1

k_2 : Conductividad térmica del componente 2

w_1 : Fracción en peso del componente 1

w_2 : Fracción en peso del componente 2

Los componentes se asignan de tal forma que el componente 1 sea el de menor conductividad y el componente 2 sea el de mayor conductividad.

Para este trabajo la expresión quedo de la siguiente manera:

$$k_{SO} = w_1k_{H_2O} + w_2k_{NH_4NO_3} - 0,72w_1w_2(k_{H_2O} - k_{NH_4NO_3}) \quad (5.12)$$

Donde:

k_{SO} : Conductividad térmica de la SO (W/m·K)

k_{H_2O} : Conductividad térmica del agua (W/m·K)

$k_{NH_4NO_3}$: Conductividad térmica del nitrato de amonio (W/m·K)

w_1 : Fracción en peso del agua en la SO

w_2 : Fracción en peso del nitrato de amonio en la SO

La conductividad térmica del agua (k_{H_2O}) para una temperatura de 80 °C, se determinó a partir de la gráfica que se muestra en la figura

N°5.21 donde se observa la conductividad de este material a diferentes temperaturas.

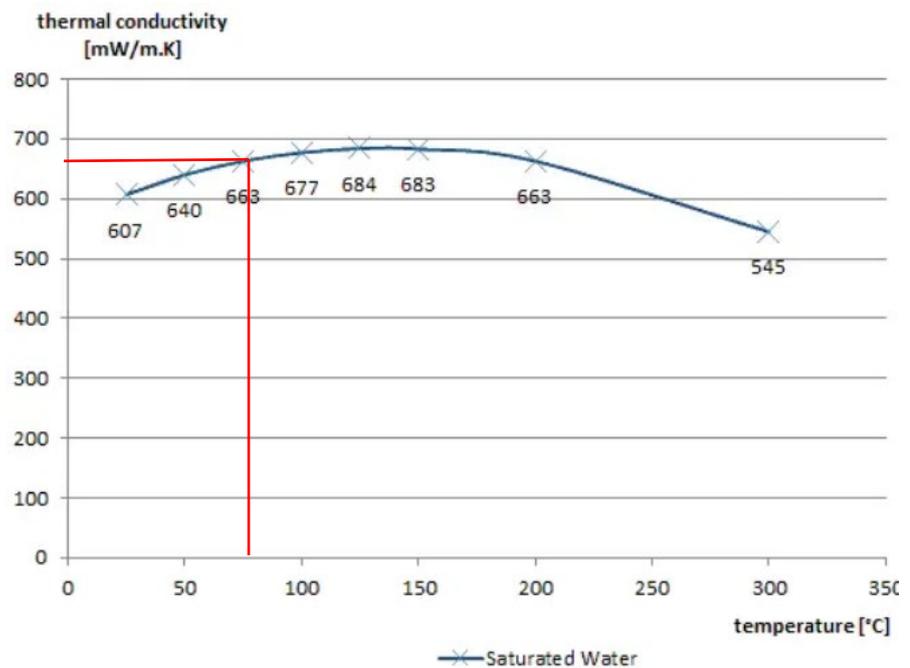


Figura N°5.21 Conductividad térmica del agua a diferentes temperaturas
Fuente: N. Connor / sitio web Thermal Engineering (2019)

Por lo tanto, de la figura N°5.21:

$$k_{H_2O} = 0,663 \frac{W}{m K}$$

La conductividad térmica del nitrato de amonio ($k_{NH_4NO_3}$) se obtuvo de la tabla N°5.36 donde se muestra la conductividad térmica de diversos materiales.

Material	Velocidad de desplazamiento del calor a través del material Cal/(seg).(cm ²).(°C/cm)
Hierro	0,161
Vidrio blando	0,0025
Arena Seca	0,00093
Parafina	0,0006
Nitrato de amonio seco y granulado	0,00057
Ladrillo de fuego	0,00028

Tabla N°5.36 Conductividad térmica para diferentes materiales

Fuente: R. Belén, C. Celín – Producción de nitrato de amonio, estudio de prefactibilidad / Universidad Nacional de Cuyo (2016)

Por lo tanto, de la tabla N°5.36 la conductividad térmica del nitrato de amonio es 0,00057 Cal/(s.cm²).(°C/cm), haciendo la conversión respectiva se obtuvo:

$$k_{NH_4NO_3} = 0,24 \frac{W}{m K}$$

De cálculos previos se sabe que las fracciones en peso son:

$$w_1 = 30\% \quad (\text{agua})$$

$$w_2 = 70\% \quad (\text{nitrato de amonio})$$

Reemplazando los valores considerados en la expresión (5.12) para el cálculo de la conductividad térmica de la SO (k_{SO}).

$$k_{SO} = w_1 k_{H_2O} + w_2 k_{NH_4NO_3} - 0,72 w_1 w_2 (k_{H_2O} - k_{NH_4NO_3})$$

$$k_{SO} = 0,3 * 0,663 \frac{W}{m K} + 0,7 * 0,24 \frac{W}{m K} - 0,72 * 0,3 * 0,7 * (0,663 \frac{W}{m K} - 0,24 \frac{W}{m K})$$

$$k_{SO} = 0,30 \frac{W}{m K}$$

- **Cálculo de la viscosidad dinámica de la SO a la temperatura de la superficie exterior del serpentín (μ_{wso})**

Para líquidos en general sabemos que la viscosidad disminuye con la temperatura. Para calcular la variación de la viscosidad con la temperatura existen varias correlaciones, en este trabajo se utilizó la correlación de Arrhenius aplicada a la viscosidad:

$$\mu = A_s e^{\left(\frac{E_A}{RT}\right)} \quad (5.13)$$

Donde:

μ : Viscosidad dinámica a una temperatura T (kg/m·s)

A_s : Factor pre exponencial (kg/m·s)

E_A : Energía de activación kJ/mol

R : Constante universal de los gases

$$0,00831447 \text{ kJ}/(\text{mol} \cdot \text{K})$$

T : Temperatura absoluta (K)

Aplicando la ecuación 5.13 y haciendo la diferencia para las viscosidades μ_1 a una temperatura T_1 , y μ_0 para una temperatura T_0 se obtiene la siguiente expresión:

$$\ln\left(\frac{\mu_1}{\mu_0}\right) = \frac{E_A}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_0}\right) \quad (5.14)$$

Donde:

μ_1 : Viscosidad dinámica (kg/m·s) de la sustancia a determinar a una temperatura T_1 (K).

μ_0 : Viscosidad dinámica (kg/m·s) de la sustancia a una temperatura T_0 (K).

E_A : Energía de activación (kJ/mol)

R : Constante universal de los gases (kJ/mol·K)

La ecuación 5.14 es adecuada para muchas disoluciones cuando se encuentran por encima de su temperatura de transición vítrea (punto intermedio de temperatura entre el estado fundido y el estado rígido) y se conoce la viscosidad de la sustancia a otra temperatura.

En este trabajo la expresión quedó de la siguiente forma:

$$\ln \left(\frac{\mu_{wso}}{\mu_{so}} \right) = \frac{E_{Aso}}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_0} \right) \quad (5.15)$$

Donde:

μ_{wso} : Viscosidad de la SO a una temperatura T_1 (kg/m·s)

μ_{so} : Viscosidad de la SO a una temperatura T_0 (kg/m·s)

T_1 : Temperatura de la superficie exterior del serpentín (K)

T_0 : Temperatura promedio de la SO en el tanque (K)

E_{Aso} : Energía de activación de la SO (kJ/mol)

R : Constante universal de los gases (kJ/(mol. K))

La temperatura de 151,9 °C a la que se calculó μ_{wso} corresponde a la temperatura del vapor saturado a 4 Barg (fluido de calentamiento que circula por el interior del serpentín) considerando que es igual a la temperatura de la superficie exterior del serpentín.

A continuación, se presentan los valores de las variables consideradas para este cálculo.

$$\mu_{so} = 0,0023 \frac{kg}{m \cdot s}$$

$$T_1 = 424,9 \text{ } ^\circ K \text{ (151,9 } ^\circ C)$$

$$T_0 = 353 \text{ } ^\circ K \text{ (80 } ^\circ C)$$

$$E_{Aso} = 9,82 \frac{kJ}{mol}$$

$$R = 0,00831447 \text{ kJ/(mol. K)}$$

Reemplazando los valores en la expresión (5.15) para el cálculo de la viscosidad dinámica de la SO a la temperatura de la superficie exterior del serpentín (μ_{wso})

$$\ln \left(\frac{\mu_{wso}}{\mu_{so}} \right) = \frac{E_{Aso}}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_0} \right)$$

$$\ln \left(\frac{\mu_{wso}}{0,0023 \frac{kg}{m.s}} \right) = \frac{9,82 \frac{kJ}{mol}}{0,00831447 \frac{kJ}{mol \cdot K}} \left(\frac{1}{424,9 K} - \frac{1}{353 K} \right)$$

$$\mu_{wso} = 0,0006869 \frac{kg}{m.s}$$

A continuación, se muestran todos los valores de las variables consideradas para determinar h_o con la utilización de la expresión (5.9), previa confirmación de cumplir con las restricciones mencionadas por el investigador para la utilización de esta correlación. También cabe mencionar que para este cálculo inicialmente se consideró un tubo de diámetro nominal 4" Sch10 para el serpentín de calentamiento:

$$\frac{h_o D_o}{k_{SO}} = 0,196 \left(\frac{n D_a^2 \rho_{SO}}{\mu_{SO}} \right)^{2/3} \left(\frac{C p_{SO} \mu_{SO}}{k_{SO}} \right)^{0,84} \left(\frac{\mu_{SO}}{u_{wso}} \right)^{0,14} \left(\frac{D_a}{D_T} \right)^{-1,58}$$

Por lo tanto:

$$D_o = 0,114 m$$

$$D_a = 0,99 m$$

$$D_T = 3,0 m$$

$$k_{SO} = 0,30 \frac{W}{m K}$$

$$n = 0,9 \frac{rev}{s} \text{ (velocidad promedio de giro del agitador)}$$

$$\rho_{SO} = 1340 \frac{kg}{m^3}$$

$$Cp_{SO} = 3,9 \frac{J}{g \cdot K}$$

$$\mu_{so} = 0,0023 \frac{kg}{m \cdot s}$$

$$\mu_{wso} = 0,0006869 \frac{kg}{m \cdot s}$$

Despejando h_o y reemplazando valores en la expresión:

$$h_o = \frac{k_{SO}}{D_o} \left[0,196 \left(\frac{n D_a^2 \rho_{SO}}{\mu_{so}} \right)^{2/3} \left(\frac{Cp_{SO} \mu_{so}}{k_{SO}} \right)^{0,84} \left(\frac{\mu_{so}}{u_{wso}} \right)^{0,14} \left(\frac{D_a}{D_T} \right)^{-1,58} \right]$$

$$h_o = 319\,776,27 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

5.4.6.2 Determinación coeficiente convectivo de la superficie interna (h_i) del tubo del serpentín.

Para determinar el coeficiente convectivo de la superficie interna (h_i) en tubos de intercambiadores de calor también existen diversas correlaciones, las cuales deben ser utilizadas según los límites o consideraciones señaladas por los investigadores o autores de dichas expresiones.

Entre las más utilizadas para tubos rectos tenemos las siguientes correlaciones:

- **Correlación de Dittus-Boelter**

Aplicable a un fluido con flujo interno turbulento en tubo liso.

$$Nu = 0,023(Re)^{0,8}(Pr)^{0,4}$$

$$\frac{h_i D}{k} = 0,023 \left(\frac{v \rho D}{\mu} \right)^{0,8} \left(\frac{C_p \mu}{k} \right)^n$$

n = 0,4 Para procesos de calentamiento del fluido

n = 0,3 Para procesos de enfriamiento del fluido

Restricciones:

$$Re > 10\,000$$

$$0,6 > Pr > 100$$

$$30\text{ °C} < \Delta T_m < 50\text{ °C (moderado)}$$

- **Correlaciones de Gnielski**

Aplicable también a un fluido con flujo interno turbulento en tubo liso. Gnielski presenta dos correlaciones, cada una con sus propias restricciones.

$$1. \quad Nu = 0,0214(Re^{0,8} - 100)Pr^{0,4}$$

$$\frac{h_i D}{k} = 0,0214 \left(\left(\frac{v \rho D}{\mu} \right)^{0,8} - 100 \right) \left(\frac{C_p \mu}{k} \right)^{0,4}$$

Restricciones:

$$10\,000 < Re < 1\,000\,000$$

$$0,5 < Pr < 1,5$$

$$2. \quad Nu = 0,012(Re^{0,87} - 280)Pr^{0,4}$$

$$\frac{h_i D}{k} = 0,012 \left(\left(\frac{v \rho D}{\mu} \right)^{0,87} - 280 \right) \left(\frac{C_p \mu}{k} \right)^{0,4}$$

Restricciones:

$$3\,000 < Re < 1\,000\,000$$

$$1,5 < Pr < 500$$

Donde para las correlaciones de Dittus-Boelter y Gnielski tenemos:

h_i : Coeficiente interno de película

D : Diámetro interno del tubo (dimensión característica)

k : Conductividad térmica del fluido

v : Velocidad del fluido

ρ : Densidad del fluido

μ : Viscosidad del fluido

C_p : Capacidad calorífica del fluido

A continuación, se muestran correlaciones para determinar los coeficientes internos en tubos de serpentines de calentamiento. Las

correlaciones para este cálculo se basan principalmente en modificar las correlaciones que se utilizan para determinar h_i en tubos rectos. Entre las más utilizadas tenemos:

- **Correlación de Schmidt**

$$\frac{Nu_s}{Nu} = 1 + 3,6 \left(1 - \frac{D}{D_s}\right) \left(\frac{D}{D_s}\right)^{0,8}$$

Restricciones:

$$20\ 000 < Re < 150\ 000$$

$$5 < D_s / D < 84$$

- **Correlación de Pratt**

$$\frac{Nu_s}{Nu} = 1 + 3,4 \left(\frac{D}{D_s}\right)$$

Restricciones:

$$1\ 500 < Re < 20\ 000$$

Donde para las correlaciones de Schimdt y Pratt tenemos:

Nu_s : Número de Nusselt del serpentín

Nu : Número de Nusselt de tubo recto

D : Diámetro interno del tubo (dimensión característica)

D_s : Diámetro medio del arrollamiento del serpentín

Otra forma para determinar coeficientes de película interior (h_i) es mediante la utilización de tablas como la que se muestra en la tabla N°5.37, en donde determinan coeficientes promedio considerando la aplicación del IC y el material del cual está construido.

Application	Material	Film Coefficients Btu/hr sq ft F		Thermal Conductivity of Metal Btu/hr sq ft F/in.	Metal Thickness Inch	U Value Btu/hr sq ft F
		h_o	h_i			
Heating Water with Saturated Steam	Copper	300	1000	2680	0.0747	229
	Aluminum	300	1000	1570	0.0747	228
	Carbon Steel	300	1000	460	0.0747	223
	Stainless Steel	300	1000	105	0.0747	198
Heating Air with Saturated Steam	Copper	5	1000	2680	0.0747	4.98
	Aluminum	5	1000	1570	0.0747	4.97
	Carbon Steel	5	1000	460	0.0747	4.97
	Stainless Steel	5	1000	105	0.0747	4.96

where h_o = outside fluid film heat-transfer coefficient
 h_i = inside fluid film heat-transfer coefficient
 stainless steel is any grade in 300 series

Source: Tranter Mfg., Inc.

Tabla N°5.37 Efectos de la conductividad del metal en U (Coeficientes de película interior y exterior)

Fuente: El Rol del acero inoxidable en intercambiadores de calor industriales (The Role of Stainless Steel in Industrial Heat Exchangers)
 Comité de productores de acero inoxidable-Instituto americano del hierro y el acero (2001).

Debido a que el Re calculado en el interior del tubo es igual 555 978 no se utilizó las correlaciones mencionadas para el cálculo de h_i , por estar fuera de la restricción señaladas por sus autores. Por lo tanto, para este trabajo se determinó el coeficiente de película interno (h_i) a partir de la tabla N°5.37 considerando lo siguiente:

- Aplicación: Calentamiento de agua con vapor saturado
- Material del IC: Acero inoxidable

Por lo tanto:

$$h_i = 1\,000 \frac{BTU}{hr \cdot Pie^2 \cdot ^\circ F}$$

Realizando la conversión de unidades:

$$h_i = 5\,678 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Con los valores de h_0 y h_i ya calculados se procedió a determinar el coeficiente global U_0 con la expresión (5.10):

$$U_0 = \frac{1}{\frac{D_o}{h_i D_i} + \frac{D_o \ln(D_o/D_i)}{2k_{SO}} + \frac{1}{h_0}}$$

Donde las variables tomaron los siguientes valores según consideraciones y cálculos previos:

$$D_o = 0,114 \text{ m}$$

$$D_i = 0,108 \text{ m}$$

$$k_{SO} = 0,30 \frac{W}{m \cdot K}$$

$$h_i = 5\,678 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

$$h_o = 319\,776,27 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Reemplazando valores en la expresión:

$$U_0 = \frac{1}{\frac{0,114 \text{ m}}{5\,678 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} * 0,108 \text{ m}} + \frac{0,114 \text{ m} * \ln\left(\frac{0,114 \text{ m}}{0,108 \text{ m}}\right)}{2 * 0,30 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}} + \frac{1}{319\,776,27 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}}}$$

$$U_0 = 2511 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

Con los valores de las variables ya determinadas se calculó la potencia calorífica necesaria para calentar la SO (Q_g) desde 25 °C a 80 °C en 22 minutos.

$$Q_g = \frac{m_{SO}}{t} C_{p_{SO}} (T_f - T_i) \quad (5.14)$$

A continuación, se presentan los valores de las variables consideradas:

$$m_{SO} = 25\,000 \text{ kg}$$

$$t = 1\,320 \text{ s (22 minutos)}$$

$$C_{p_{SO}} = 3,91 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$T_f = 80 \text{ °C}$$

$$T_i = 25 \text{ °C}$$

Reemplazando valores en la expresión (5.14):

$$Q_g = \frac{25\,000\text{ kg}}{1\,320\text{ s}} * 3,91 \frac{\text{kJ}}{\text{Kg.K}} * (80\text{ }^\circ\text{C} - 25\text{ }^\circ\text{C})$$

$$Q_g = 4\,094,9\text{ kW}$$

Con los valores ya calculados de Q_g y Q_p se determinó Q_c con la expresión presentada anteriormente:

$$Q_c = Q_g + Q_p$$

$$Q_c = 4\,094,9\text{ kW} + 2,1\text{ kW}$$

$$Q_c = 4\,097\text{ kW}$$

Dado que $Q=Q_c$, la capacidad de la potencia calorífica necesaria del serpentín es igual 4 097 kW. Con dicha capacidad, así como, conocido ya los otros valores de las variables de la expresión $Q = U \cdot A \cdot \Delta T_m$ se procedió a calcular el área de transferencia de calor del serpentín en términos del área exterior (A_o) dado que se utilizó U_o :

$$A_o = \frac{Q_c}{U_o \Delta T_{ml}}$$

Previamente se calculó la temperatura media logarítmica ΔT_{ml} con la expresión adaptada para un tanque con serpentín de calentamiento cuya

temperatura es constante (t_m). La expresión quedó de la siguiente forma:

$$\Delta T_{ml} = \frac{t_f - t_i}{\ln\left(\frac{t_m - t_i}{t_m - t_f}\right)} \quad (5.15)$$

Donde:

t_f : Temperatura final de la SO (80 °C)

t_i : Temperatura inicial de la SO (25 °C)

t_m : Temperatura del fluido caliente (154.8 °C)

Reemplazando valores en la expresión (5.15):

$$\Delta T_{ml} = \frac{80 \text{ °C} - 25 \text{ °C}}{\ln\left(\frac{154,8 \text{ °C} - 25 \text{ °C}}{154,8 \text{ °C} - 80 \text{ °C}}\right)}$$

$$\Delta T_{ml} = 99,8 \text{ °C}$$

Con los valores ya calculados de:

$$Q_c = 4\,097 \text{ kW}$$

$$U_o = 2517 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

$$\Delta T_{ml} = 99,8 \text{ °C}$$

Se procedió a calcular el área de transferencia de calor del serpentín.

$$A_o = \frac{4\,097\text{ kW}}{2517 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} * 99,8\text{ }^\circ\text{C}}$$

$$A_o = 16,34\text{ m}^2$$

Para determinar el número de anillos del ICS por nivel, así como el número de niveles del ICS que tenga un área total de transferencia de calor de 16,32 m² se calculó el flujo de vapor saturado a 4 barg así como la velocidad del vapor en el interior del serpentín considerando que esta debe estar en un rango de 25 m/s a 40 m/s.

Para determinar el flujo masico de vapor requerido se utilizó la siguiente expresión:

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_{vapor}(h_f - h_i)$$

$$\dot{m}_{vapor} = \frac{\dot{Q}_c}{(h_f - h_i)}$$

Donde:

$$\dot{Q}_c = 4\,097\text{ kW}$$

$$h_f = 2748,10 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (\text{para vapor saturado a 4 barg})$$

$$h_i = 640,09 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad (\text{para liquido saturado a 4 barg})$$

Reemplazando valores:

$$\dot{m}_{vapor} = \frac{4\,097\text{ kW}}{\left(2\,748 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 640,09 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right)}$$

$$\dot{m}_{vapor} = 1,94 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Considerando que para el cálculo de U_o se seleccionó preliminarmente que el tubo inoxidable 316 del serpentín es de DN 4" y el flujo de vapor se dividió en 3 para que la velocidad de vapor resultante en el interior este dentro del rango establecido. Por lo tanto:

$$V_{vapor} = \frac{\dot{m}_{vapor}}{\rho_{vapor} A_i N}$$

Donde:

$$\dot{m}_{vapor} = 1,94 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$\rho_{vapor} = 2,67 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \text{ (Para vapor saturado a 4 Barg)}$$

$$A_i = 0,009 \text{ m}^2 \text{ (Área transversal interna de un tubo DN 4", Sch 10)}$$

$$N = 3 \text{ (número de anillos del ICS por nivel)}$$

Reemplazando los valores en la expresión:

$$V_{vapor} = \frac{2,12 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{2,67 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 0,009 \text{ m}^2 * 3}$$

$$V_{vapor} = 26,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Por lo tanto, el número de anillos por nivel del ICS se determinó que sea igual a 3, para que la velocidad del vapor este dentro del rango establecido.

Para determinar el número de niveles del serpentín se dividió el área total de transferencia de calor ($16,34 \text{ m}^2$) entre el área total de cada nivel (A_{tn}) conformado por 3 anillos.

$$N^{\circ} \text{ niveles} = \frac{A_o}{A_{tn}} \quad (5.16)$$

Donde:

$$A_{tn} = A_{o1} + A_{o2} + A_{o3}$$

$$A_{o1} = 2,48 \text{ m}^2 \text{ (área exterior anillo numero 1)}$$

$$A_{o2} = 2,06 \text{ m}^2 \text{ (área exterior anillo número 2)}$$

$$A_{o3} = 1,63 \text{ m}^2 \text{ (área exterior anillo numero 3)}$$

Por lo tanto:

$$A_{tn} = 2,48 \text{ m}^2 + 2,06 \text{ m}^2 + 1,63 \text{ m}^2$$

$$A_{tn} = 6,17 \frac{\text{m}^2}{\text{nivel}}$$

Reemplazando valores en la expresión (5.16) :

$$N^{\circ} \text{ niveles} = \frac{16,34 \text{ m}^2}{6,17 \frac{\text{m}^2}{\text{nivel}}}$$

$$N^{\circ} \text{ niveles} = 2,6 \text{ niveles}$$

Redondeando al inmediato superior se tiene que:

$$N^{\circ} \text{ niveles} = 3 \text{ niveles}$$

Efectuados ya todos los cálculos respectivos para el diseño de un TANQUE DISOLVEDOR DE 25 t/h para elaboración de SO, a continuación, en la figura N°5.22, se presenta el arreglo geométrico y especificaciones generales del diseño de un tanque disolvedor de 25 t/h para elaboración de SO.

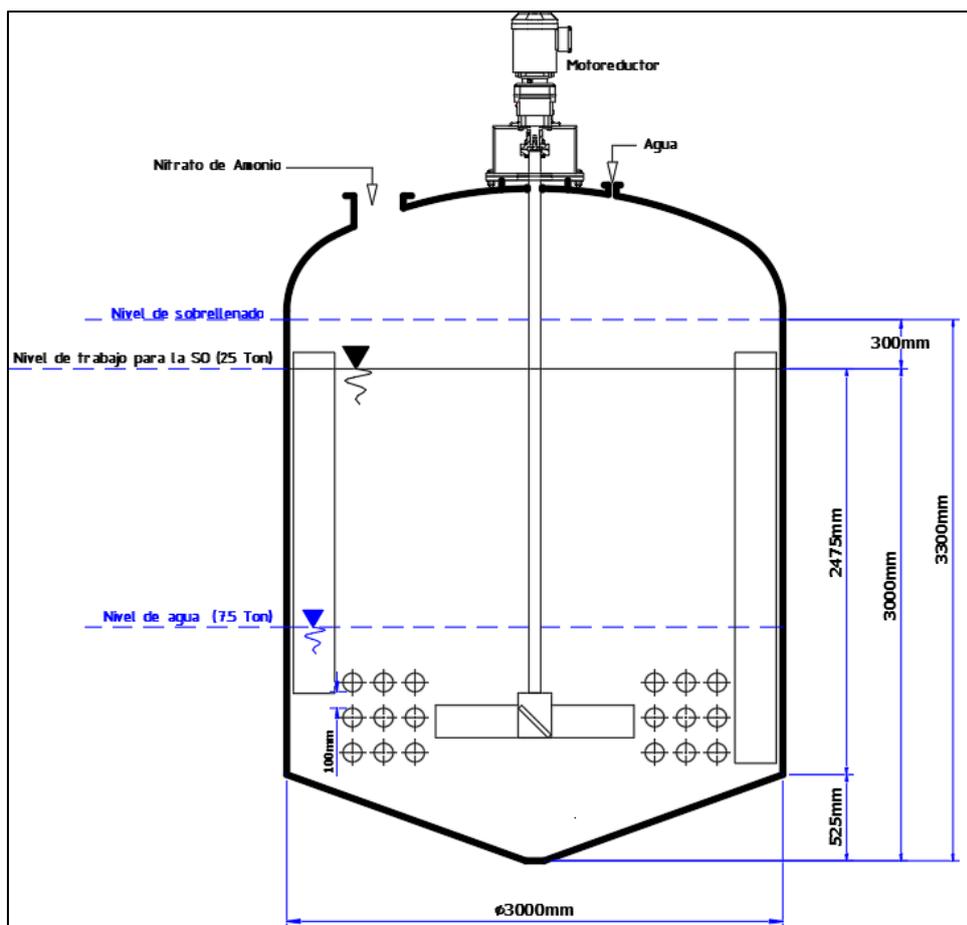


Figura N°5.22 Dimensiones generales de un tanque disolvedor de 25 t/h de capacidad para elaboración de SO.

Fuente: Elaboración propia (2023)

CAPÍTULO VI

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1 Análisis del intercambiador de calor tipo serpentín (ICS)

El área de transferencia del ICS del TQ-03 con la última modificación es de 20,4 m² que se alimenta desde una caldera de 175 BHP, según los cálculos efectuados para lograr la capacidad de 25 t/h en la elaboración de SO se hace necesario un área de transferencia de calor de 16,34 m² con una caldera de una potencia mínima de 450 BHP. Estos resultados nos indican que la velocidad de calentamiento está relacionado a dos variables dependientes una de otra como son el área de transferencia del IC y el flujo de vapor disponible para el calentamiento, ya que el hecho de tener una mayor área de transferencia de calor no significa que se tenga una mayor potencia de calentamiento si es que no se tiene suficiente vapor para el calentamiento y que por el contrario trae como consecuencia caída de presión en vapor como se pudo observar en la grafica N°5.7.

6.2 Análisis del sistema de agitación

El agitador seleccionado para el diseño de este trabajo es de tipo turbina con aspas inclinadas, según la literatura especializada con esto se logra un flujo mixto, es decir de tipo radial y axial, lo que favorece procesos de disolución y transferencia de calor. El agitador seleccionado en este trabajo es similar al que está instalado en el TQ-03, pero difiere principalmente en el número de

aspas así como en el diámetro del agitador. Esta última variable es importante ya que es considerada en las correlaciones para los cálculos de potencia y coeficientes de película exterior según se puede observar en la expresión (5.10).

6.3 Análisis del tanque disolvedor

Las dimensiones calculadas para el diseño de este nuevo tanque disolvedor considera las proporciones mencionadas en la literatura especializada para este tipo de tanques cuyas variables como el diámetro del tanque y del agitador son consideradas en las correlaciones de los coeficientes de película a diferencia del tanque existente TQ-03 cuya proporción entre su diámetro de tanque, altura de trabajo y diámetro de serpentín no considera las dimensiones adecuadas para un tanque disolvedor.

6.4 Contrastación con la hipótesis planteada

El trabajo de investigación comprueba que para el diseño de un tanque disolvedor de 25 t/h para elaboración de SO es necesario correlacionar todas las variables que impactan en la disolución y calentamiento de la SO, dado que modificar equipos de este tipo considerando parcialmente las variables referente al tanque disolvedor, fuente de calor así como de los materiales que intervienen en el proceso tendrán efectos negativos o no se logrará la productividad objetivo en la elaboración de la SO.

CONCLUSIONES

1. Se cumplió con el objetivo propuesto debido a que se demostró que el diseño del tanque disolvedor de 25 t/h para elaborar SO, determinó que variables se deben considerar en el proceso de disolución para elaboración de SO, así mismo estos resultados permitirán la fabricación de nuevos tanques o modificar tanques existentes para mejorar la capacidad de producción.
2. Los resultados hallados en el presente trabajo señalan los parámetros o variables que ocasionan que el actual tanque TQ-03 demore más de 3 horas para la elaboración de 20 t de SO.
3. Se consideró que la hipótesis fue positiva porque los valores de las variables y especificaciones del diseño del tanque de 25 t/h de este trabajo demuestran que el tanque disolvedor TQ-03 tiene problemas de capacidad de producción debido a que en su diseño o en su modificación no se consideraron adecuadamente la interrelación entre las variables que intervienen en el proceso y su funcionamiento.

RECOMENDACIONES

1. Determinar de manera experimental en valor de los parámetros físicos y químicos de la SO para efectuar cálculos de mejor precisión.
2. Realizar investigaciones referentes a correlaciones que permitan determinar, calcular o verificar los coeficientes de película interior y exterior en ICS para diferentes restricciones Re y Pr , considerando específicamente procesos de disolución y calentamiento.
3. En este trabajo se mencionan las variables principales del proceso de disolución en la elaboración de SO en una producción discontinua por lo que podríamos extender las investigaciones o diseños de equipos disolvedores de producción discontinua (por lotes) a equipos disolvedores de flujo continuo donde también se genere reacciones endotérmicas o exotérmicas de sales.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Ardila J. (2012) "Intercambiadores de calor (IC) de tubo en espiral", Publicación de UIS Ingenierías, Universidad Industrial de Santander, Colombia.

Belén R. (2016) "Producción de nitrato de amonio, estudio de prefactibilidad", Facultad de ciencias aplicadas a la industria, Universidad Nacional de Cuyo, Argentina.

Bespalko S. et al (2019) "Estudio experimental del efecto térmico de la reacción en la disolución de algunos álcalis y sales con mezcla natural y agitación forzada", publicación de la Universidad Tecnológica Estatal Cherkasy. Departamento de tecnologías energéticas / Ucrania.

Carrizales R. (2011) "Guía para la selección de Intercambiadores de calor", Revista Académica de Investigación TLATEMOANI N°6-junio 2011, Laboratorio de Ingeniería Química, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México.

Castillo V. (2013) "Diseño y cálculo de un agitador de fluidos", Seminario de titulación, Facultad de Ingeniería de Mecánica, Universidad del Bío Bío, Chile.

Cruz Fierro C. (2020) "Algunos métodos de estimación para conductividad térmica", revisión 10.

Geankoplis J. (1998) "Procesos de transporte y operaciones unitarias", 3ra Edición, México.

Gonzales E. (1963) "Anteproyecto de una planta de nitrato de amonio para fertilizante", Tesis de titulación, Escuela de ingeniería química e industrias extractivas, Instituto Politécnico Nacional, México.

Huerto H. (2013) "Estudio del flujo en un tanque agitador vertical de impulsor PTB con superficie libre mediante el programa ANSYS CFX V.14.0", Tesis de titulación, Facultad de Ciencias e Ingeniería, Pontificia Universidad Católica del Perú.

Kern D. (1999 Ed.31) "Procesos de Transferencia de Calor", Editorial CECSA, México.

Martínez Y. (2011) "Laboratorio de Ingeniería de Alimentos", Guía de Laboratorio, Escuela de Ingeniería Agroindustrial, Universidad Nacional de Trujillo, Perú.

Megyesy E. (1992) "Manual de recipientes a presión", 1ra reimpresión, México.

Miranda B. (2013) "Determinación de una correlación para estimar el coeficiente de película externo para serpentines en tanques agitados", publicado en la revista "Ingeniería", Universidad de Costa Rica.

Pérez E. et al (2019) "Diseño de un intercambiador de calor de serpentín para el enfriamiento de acetona", Revista científica NEXO Vol. 32, No. 01, pp. 61-74/junio 2019, Universidad de Ingeniería, Camagüey, Cuba.

Quintana A et al (2019) "Determinación de calores de disolución y cristalización para soluciones saturadas de nitrato de potasio en agua", Publicación de Academia Journals, México.

Ramírez A. (2009). "Síntesis y caracterización del nitrato de amonio como insumo para de uso industrial en la minería" - Informe de suficiencia para licenciatura en Química, Facultad de Ciencias, UNI, Perú.

Ricaurte L. (2016) "Diseño y simulación de un Tanque Mezclador de 10,000 gal para la elaboración de aceites lubricantes". Trabajo para obtención del título de Ingeniero Mecánico, Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador.

Roig J. (2103) "Manual práctico para el diseño y cálculo De equipos de proceso para plantas Industriales según el código ASME Sección VIII División 1", España.

Saenz P. (2016) "Mejoramiento del sistema de condensado para reducir pérdidas de vapor en el área de lavandería del hospital nacional ESSALUD Huancayo", Tesis de titulación, Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Nacional del Centro, Perú.

Velasco J. (2020) "Diseño, implementación y análisis técnico económico de tanques reactores, sistema de agitación y calentamiento para la elaboración de artículos de limpieza en la empresa CORVELS S.R.L.", Trabajo de investigación para obtener el grado de Bachiller, Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Continental, Perú.

Warren L. (2010) "Operaciones unitarias en ingeniería química", 7ma edición, México.

ANEXOS

Proceso : Elaboracion de 20 Ton SO de N. de Amonio en agua

Proporción: 71 % nitrato de amonio / 29% agua

Fecha de registro : 12/04/2022

Inicio de agitación : 9:17 a. m.

Inicio de calentamiento : 9:22 a. m.

Peso de cada carga de N. Amonio : 1300 Kg

N° Carga N. Amonio	Hora de Lectura	(*) T _{sol. Oxidante} (°C)	N. Amonio (Kg)	N. Amonio Acumulado (Kg)	P _{antes de Valv. Reduc.} (BARg)	P _{despues de Valv. Reduc.} (BARg)	Comentarios
---	09:30	25	---	0	7	3.7	En proceso agitacion y calentamiento
1, 2, 3	09:33	14.6	3900	3900	7	3	Se ingresaron las cargas de N. Amonio N°s 1, 2 y 3
4, 5, 6	09:48	7	3900	7800	6.8	1.6	Se ingresaron las cargas de N. Amonio N°s 4, 5 y 6
7	09:53	6.9	1300	9100	6.5	1.4	Se ingresó la carga de N. Amonio N° 7
8	10:00	6.5	1300	10400	6	1.4	Se ingresó la carga de N. Amonio N° 8
---	10:09	27	---	---	5.4	0.5	En proceso agitacion y calentamiento
9	10:23	38.1	1300	11700	5	1	Se ingresó la carga de N. Amonio N° 9
---	10:40	58.7	---	---	4	0.6	En proceso agitacion y calentamiento
10	10:57	69	1300	13000	4.4	0.9	Se ingresó la carga de N. Amonio N° 10
---	11:02	72.7	---	---	4.4	1.2	En proceso agitacion y calentamiento
---	11:10	75.5	---	---	4.4	1.2	En proceso agitacion y calentamiento
---	11:15	79.1	---	---	5	0	Cierre automatico de valvula de control de vapor
---	11:18	81.6	---	---	6.8	0	Valvula de control de vapor cerrada
---	11:20	82.7	---	---	7	0	Valvula de control de vapor cerrada
---	11:25	83.7	---	---	7	0	Valvula de control de vapor cerrada
---	11:33	84.5	---	---	7	0	Valvula de control de vapor cerrada
11	11:35	83.9	1300	14300	7	0	Se ingresó la carga de N. Amonio N° 11
---	12:21	77.5	---	---	6.8	0	Valvula de control de vapor cerrada
---	12:32	77.7	---	---	6.5	0	Valvula de control de vapor cerrada
---	12:35	76.0	---	---	6.5	2.7	Apertura automatica de valvula de control de vapor
---	12:40	79.1	---	---	5.5	0	Cierre automatico de valvula de control de vapor
---	12:43	82.1	---	---	7	0	Valvula de control de vapor cerrada
---	12:55	84.5	---	---	7	0	Valvula de control de vapor cerrada

Tiempo de elaboración de la SO

03:25 Hrs

(*) Las temperaturas fueron registradas al finalizar el proceso de cada carga del N. Amonio