

**ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD PARA LA PRODUCCIÓN DE NITRATO Y
NITRITO DE SODIO PARA SATISFACER LA DEMANDA INTERNA DE
ECOPETROL**

**MARIA NATALY BAUTISTA ESCALANTE
CLAUDIA XIMENA VEGA DELGADO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2019

**ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD EN LA PRODUCCIÓN DE NITRATO Y
NITRITO DE SODIO PARA SATISFACER LA DEMANDA INTERNA DE
ECOPETROL**

**MARIA NATALY BAUTISTA ESCALANTE
CLAUDIA XIMENA VEGA DELGADO**

**Trabajo de grado para optar al título de:
INGENIERA QUÍMICA**

**Director: RONALD ALFONSO MERCADO OJEDA
PhD. En Ingeniería de Productos y Procesos
Co-Director: MAURICIO CARDEÑOSA MENDOZA
MSc. Ingeniería Civil- Ingeniería ambiental**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2019

DEDICATORIA

Este breve espacio se lo dedico a personas importantes que han marcado mi vida, y que me han ayudado a ser lo que soy ahora.

Agradezco a Dios y María Santísima por darme la sabiduría y el poder realizar este proyecto, que servirá para beneficio de una importante y respetada empresa como lo es el ICP.

A la vez a todos mis profesores que contribuyeron a mi formación académica a lo largo de la carrera como también al PhD. Ronald Mercado por sus asesorías y aportes en este trabajo.

También agradezco a mi madre que me ha acompañado en cada momento y me ha brindado su apoyo incondicional y me ha ayudado a crecer como persona. A cada momento me brinda la valentía de seguir adelante con los proyectos planteados a lo largo de mi vida.

Una compañía importante en mi vida también es mi gatita Iris, sin ella no sería lo mismo, siempre pendiente, jugando y calmando mi estrés y preocupación del día a día, sacándome una sonrisa en mi rostro y alegrando mi vida.

También agradezco a aquellas personas que no nombraré pero que siempre están en mi mente, que me brindan su apoyo y siguen pendientes de mí.

Nataly Bautista

Dedico esta tesis a mis padres (Claudia y Oscar), quienes dieron todo de sí para sacarme adelante y convertirme en la profesional que hoy soy, por todo su amor y sacrificios, por mostrarme los diferentes caminos de la vida y enseñarme cual es el mejor.

Gracias a ellos por regalarme a mi hermanita Karol quien siempre estaba para darme todo su amor y desestresarme.

Gracias a Dios por regalarme la vida, por siempre escuchar mis peticiones, darme la suficiente sabiduría e inteligencia para sacar adelante esta carrera y tesis.

Gracias a toda mi familia, por ser la mejor, por darme buenos consejos y siempre estar en los malos momentos.

Gracias a Ecopetrol por permitirme realizar la tesis con ellos, y al profesor Ronald, por ser tan buen profesor y director de tesis, por siempre estar ahí para resolver nuestras dudas.

Gracias a todos los profesores que conocí a lo largo de mi carrera, por compartir sus conocimientos y con estos hacer posible la realización de este proyecto.

Gracias a todos y cada una de las personas que estuvieron a lo largo de esta carrera y la hicieron más fácil, por compartir tan buenos momentos a mi lado, especialmente a Erika con quien compartimos largos días de estudio y otros de diversión.

Gracias a Nico por estar siempre a mi lado en este último año de la carrera, apoyándome cada segundo y calmándome en cada momento de locura.

Claudia Ximena Vega Delgado

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	17
1. OBJETIVOS	19
1.1.OBJETIVO GENERAL.....	19
1.2.OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
2. MARCO TEÓRICO	20
2.1.NITRATO DE SODIO	20
2.2.NITRITO DE SODIO.....	21
2.3.PROCESO DE OBTENCIÓN DE ÁCIDO NÍTRICO	22
2.3.1. Oxidación del amoniaco con aire a óxido nítrico.....	23
2.3.2. Oxidación del óxido nítrico para formar dióxido de nitrógeno	23
2.3.3. Absorción en agua del dióxido de nitrógeno y tetraóxido de nitrógeno	24
3. METODOLOGÍA.....	25
3.1. SELECCIÓN DE LA RUTA DE OBTENCIÓN MÁS FACTIBLE	25
3.2. . ESTUDIO TÉCNICO	26
3.2.1. Reactores.....	26
3.2.2. Bombas.....	26
3.2.3. Intercambiadores de calor	27
3.2.4. Separadores.....	27
3.2.5. Tanques	27
3.2.6. Mezcladores.....	27
3.2.7. Compresores.....	28
3.2.8. Torres de absorción	28

3.3. DIMENSIONAMIENTO DE LOS EQUIPOS	28
3.4. SIMULACIÓN DEL PROCESO	28
3.4.1. Modelo termodinámico	28
3.4.2. Producción de ácido nítrico:	29
3.4.3. Producción de nitrito y nitrato de sodio	31
3.5. ESTUDIO FINANCIERO	34
3.5.1. CONSIDERACIONES GENERALES	34
3.5.2. Métodos utilizados para la estimación de costos	34
3.6. COSTOS DE CAPITAL	35
3.6.1. Costos de terreno	35
3.6.2. Costos de equipos	36
3.7. COSTOS DE OPERACIÓN	36
3.7.1. Costos variables o costos directos de manufactura (DMC)	36
3.7.2. Costos fijos	37
3.7.3. Costos generales	37
3.7.4. Ecuación COM y coeficientes	37
3.8. INDICADORES DE FACTIBILIDAD	38
3.8.1. FLUJO DE CAJA	38
3.8.2. VPN y TIR	38
3.8.3. Precio de producción del producto	39
3.8.4. Punto de equilibrio	39
3.8.5. Resumen de costos	40
4. CONCLUSIONES	41
5. RECOMENDACIONES	42

BIBLIOGRAFÍA.....	43
ANEXOS	46

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama resumen metodología.....	25
Figura 2. Diagrama PFD	33
Figura 3. Punto de equilibrio.	39

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades del nitrato de sodio.....	20
Tabla 2. Propiedades del nitrito de sodio.	21
Tabla 3. Resumen de costos de la planta primer año de funcionamiento	40

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. JUSTIFICACIÓN DE LA CAPACIDAD DE LA PLANTA	46
ANEXO B. COTIZACIÓN DE PRECIOS NaNO_2 y NaNO_3	49
ANEXO C. DIAGRAMA BFD	50
ANEXO D. RUTAS DE SÍNTESIS	51
ANEXO E. FUNCIÓN DE CADA EQUIPO	55
ANEXO F. SIMULACIÓN de NaNO_2 y NaNO_3	57
ANEXO G. COSTOS DE CAPITAL	58
ANEXO H. CAPACIDAD DE LA PLANTA	63

(Ver Anexos adjuntos en el CD y pueden visualizarlos en la Base de Datos de la biblioteca UIS)

ANEXO I. ARCHIVO EXCEL. NITRITO Y NITRATO DE SODIO	
ANEXO J. SIMULACIÓN DE NITRITO Y NITRATO DE SODIO	
ANEXO K. CAPCOST	

ABREVIATURAS

CAPCOST	Programa de costos fijos de equipos
C_{BM}	Bare Module Factor
CEPCI	Chemical Engineering's Plant Cost Index
COL	Costo de mano de obra
COM	Costos operacionales de manufactura
CRM	Costo de materia prima
CUT	Costo de servicios industriales
CWT	Costos de tratamiento de desechos
DMC	Costos directos de manufactura
F_{BM}	Bare Module Factor
FCI	Índice de costo fijo
H₂S	Sulfuro de hidrogeno
HNO₃	Ácido nítrico
HSE	Salud, Seguridad, Medio Ambiente
N₂O₄	Tetraóxido de nitrógeno
Na₂CO₃	Carbonato de sodio
NaNO₂	Nitrito de sodio
NaNO₃	Nitrato de sodio
NaOH	Hidróxido de sodio
NH₃	Amoniaco
NO	Monóxido de nitrógeno
NO₂	Dióxido de nitrógeno
TIR	Tasa interna de retorno
TMAR	Tasa mínima de retorno
VPN	Valor presente neto

RESUMEN

TÍTULO: ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD PARA LA PRODUCCIÓN DE NITRITO Y NITRATO DE SODIO PARA SATISFACER LA DEMANDA INTERNA DE ECOPETROL*

AUTOR: MARIA NATALY BAUTISTA ESCALANTE
CLAUDIA XIMENA VEGA DELGADO**

PALABRAS CLAVE: Prefactibilidad, nitrito de sodio, nitrato de sodio, viabilidad, bacterias sulfato reductoras.

DESCRIPCIÓN:

En algunos campos de Ecopetrol, el nitrato y nitrito de sodio se utilizan para el control de las bacterias sulfato reductoras y de esta manera controlar los procesos de corrosión asociados a las facilidades de producción. Estos insumos resultan muy costosos debido a que las cantidades que se necesitan son superiores a las producidas en el país, de manera que la empresa se ve obligada a importar este tipo de sales. En función de esta necesidad, se plantea la realización de un estudio de prefactibilidad para establecer si la producción de nitrato y nitrito de sodio significaría una reducción de los costos para la empresa. Para esto, se identificaron varias rutas de obtención y se estableció que la ruta de obtención 4 por la cual se obtiene NaNO_2 a partir de la absorción de los gases nitrosos en carbonato de sodio y NaNO_3 por neutralización del ácido nítrico con carbonato de sodio, ofrece un potencial económico más prometedor. En función de la demanda interna de Ecopetrol y de la demanda insatisfecha del país, se estableció una capacidad de la planta de 80 Ton/d. Igualmente se realizó un estudio técnico en el que se definieron las dimensiones de los equipos asociados al proceso, las cuales fueron corroboradas con la ayuda del simulador Aspen HYSYS. Finalmente, se realizó un estudio económico en el que se pudo determinar que el proyecto presenta una TIR de 24% de manera que se concluye que el proyecto es económicamente viable y los costes de producción son de COP\$1,800 por kilogramo para cada uno.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Ph. D. Ronald A. Mercado Ojeda

ABSTRACT

TITLE: STUDY OF PREFACTIBILITY FOR THE PRODUCTION OF NITRITE AND SODIUM NITRATE TO SATISFY THE INTERNAL DEMAND OF ECOPETROL*

AUTHOR: MARIA NATALY BAUTISTA ESCALANTE

CLAUDIA XIMENA VEGA DELGADO**

KEYWORDS: Prefeasibility, sodium nitrite, sodium nitrate, viability, sulfate reducing bacteria.

DESCRIPTION:

In some fields of Ecopetrol, nitrate and sodium nitrite are used for the control of sulphate-reducing bacteria and in this way control the corrosion processes associated with production facilities. These inputs are very expensive because the quantities needed are higher than those produced in the country, so the company is forced to import this type of salt. Based on this need, it is proposed to carry out a pre-feasibility study to establish whether the production of nitrate and sodium nitrite would mean a reduction in costs for the company. For this, several routes of obtaining were identified and it was established that the obtaining route 4, which NaNO_2 is acquired from the absorption of the nitrous gases in sodium carbonate and the NaNO_3 by neutralization of the nitric acid with sodium carbonate, it is the one that offers the most promising economic potential. Based on the internal demand of Ecopetrol and the unmet demand of the country, a plant capacity of 80 Ton / d was created. It was also realized a technical study in which the dimensions of the equipment associated with the process were defined, which were corroborated with the help of the Aspen simulator HYSYS. Finally, an economic study was implemented in which he could determine that the project presents a TIR of 24% that it is concluded that the project is economically viable and the production costs are COP \$ 1,800 per kilogram for each one.

* Bachelor Thesis

** Faculty of Engineering Physical Chemical. School of Chemical Engineering. Director: Ph.D. Ronald A. Mercado Ojeda

INTRODUCCIÓN

Durante las actividades de recobro secundario en los campos de crudo de Ecopetrol, se presentan problemas de biocorrosión en las tuberías debido a la proliferación de bacterias sulfato-reductoras, las cuales son capaces de producir ácidos como el sulfuro de hidrógeno (H_2S), que ocasiona corrosión de las tuberías de producción, además de los riesgos HSE¹.

Ecopetrol trabaja actualmente en varios proyectos de investigación, donde algunos estudios preliminares han demostrado que es posible inhibir la proliferación de las bacterias que producen H_2S , y por ende, mitigar los problemas asociados a éste, mediante control de su dieta, la cual es manipulable a través de compuestos que se inyectan para el proceso de recuperación. De esta manera, para tratar de solucionar esta problemática, se puede suministrar diferentes cantidades de nitrito de sodio o de nitrato de sodio o una mezcla de esas sustancias, a concentraciones específicas, de manera que se favorezca el crecimiento de las bacterias nitrato-reductoras, las cuales son capaces de inhibir la proliferación de las sulfato-reductoras y reducir la producción de H_2S ².

El problema principal son los costos de adquisición de los insumos químicos (nitrito y nitrato de sodio); Ecopetrol inyecta en la actualidad 520,000 barriles por día (bpd) de $NaNO_2$ y $NaNO_3$ para su actividad de recobro en el campo La Cira, el cual presenta altas concentraciones de H_2S en varios de sus pozos, para lo cual se proyecta que se requiera adicionar nitrato y/o nitrito de sodio como alternativa para

¹ VOORDOUW, Gerrit, *et al.* Use of Nitrate or Nitrite for the Management of the Sulfur Cycle in Oil and Gas Fields. Houston, Texas, U.S.A. Society of Petroleum Engineers. 2007. p.1.

² *Ibíd.*, p. 1.

controlar y reducir la presencia de H_2S en los pozos productores. Con las concentraciones que se encuentran en evaluación para controlar la proliferación de las bacterias sulfato reductoras, se proyecta una cantidad aproximada de 10 Ton/día de $NaNO_2$ y $NaNO_3$ en base seca, adicional a esto se decide ampliar la planta hasta 40 Ton/día, ya que se sugiere aumentar la capacidad de la misma en un factor de 3 para los demás campos de Ecopetrol y la cantidad restante para satisfacer la demanda adicional que se presenta en Colombia (Anexo A).

En la actualidad, estas sales deben importarse a un precio muy elevado, alrededor de COP\$6000 por kilo (Anexo B. Cotización). De esta manera, se pretende realizar un estudio técnico y financiero con el fin de evaluar la prefactibilidad para la creación de una planta productora de estos insumos químicos en Colombia, con unos costos de producción que representen un ahorro sustancial al ser comparado con el precio de importación, y de esta manera, satisfacer la demanda interna para su inyección en los diferentes campos de Ecopetrol.

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Estudiar la prefactibilidad de desarrollar un proyecto de inversión para la instalación y funcionamiento de una planta de producción de nitrato y nitrito de sodio en Colombia.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Recopilar la información necesaria para seleccionar la ruta de obtención más factible para la producción de nitrito y nitrato de sodio en Colombia y desarrollar el estudio técnico del proceso.

Elaborar el diagrama de flujo de procesos de la ruta seleccionada y dimensionar las diferentes operaciones del proceso.

Simular el proceso de obtención de nitrato y nitrito de sodio mediante el programa Aspen HYSYS.

Realizar el estudio financiero del proyecto de inversión y un análisis de los parámetros de mayor influencia para obtener un proyecto factible.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. NITRATO DE SODIO

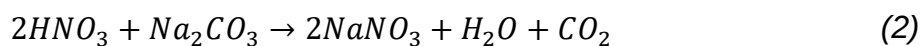
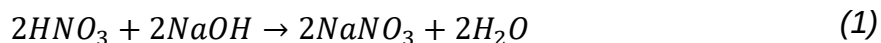
El nitrato de sodio (NaNO_3) es un compuesto que a temperatura ambiente, es sólido, inodoro e incoloro, moderadamente higroscópico, de sabor salino y muy soluble en agua, amoníaco y glicerol. El nitrato de sodio se utiliza en una serie de procesos industriales, en la mayoría de ellos actuando primordialmente como agente oxidante; este tiene un papel importante en la eliminación de burbujas en la oxidación de materia orgánica y en la oxidación de óxido ferroso y de trióxido de arsénico o antimonio³.

Las propiedades físicas y químicas seleccionadas del nitrato de sodio se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Propiedades del nitrato de sodio.⁴

Propiedad	Valor
Peso molecular	84.99 g/mol
Densidad	2.257 g/cm ³
Punto de ebullición	380 °C
Punto de fusión	308 °C

El nitrato de sodio puede ser obtenido sintéticamente por neutralización del ácido nítrico con hidróxido de sodio o carbonato de acuerdo con las siguientes reacciones⁵.

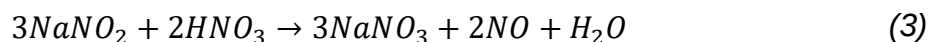


³ OTHMER, Kirk. *Encyclopedia of Chemical Technology*, 4 Edición, U.S.A. Ed. Wiley Jhon & Sons. 1996. Vol. 22, p. 193. ISBN: 978-0-471-15158-6.

⁴ GRUPO TRANSMERQUIM. Hojas de datos de seguridad. [En línea]. [Citado el 11 de marzo de 2018]. Disponible en: <http://www.gtm.net/images/industrial/n/NITRATO%20DE%20SODIO.pdf>

⁵ OTHMER. Op.Cit., p.196

También se puede formar nitrato de sodio tratando el nitrito de sodio con ácido nítrico:



2.2. NITRITO DE SODIO

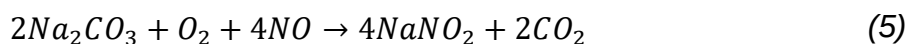
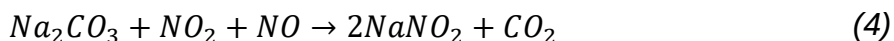
El nitrito de sodio (NaNO_2), es un compuesto estable, inodoro, amarillo pálido o color paja y está disponible en seco granular o hojuelas, así como en soluciones de agua. El nitrito de sodio se utiliza en tintes, productos químicos de caucho, como inhibidor de corrosión⁶ y cuando se mezcla con nitrato de sodio, se utiliza en el tratamiento de metales⁷. El nitrito de sodio es un oxidante y es tóxico; como tal, requiere cuidado en su manejo, almacenamiento y uso.

Las propiedades físicas y químicas seleccionadas del nitrito de sodio se enumeran en la tabla 2.

Tabla 2. Propiedades del nitrito de sodio⁸.

Propiedad	Valor
Punto de ebullición	320 °C
Punto de fusión	280 °C
pH (Solución acuosa)	9
Peso molecular	69 g/mol

La producción industrial de nitrito de sodio es mediante la absorción de óxidos de nitrógeno en soluciones de carbonato de sodio o hidróxido de sodio⁹.

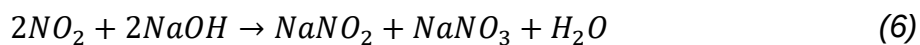


⁶ OTHMER. Op. Cit., p.199.

⁷ AUSTIN, George. Manual de procesos químicos en la industria, Colombia.: McGraw-Hill, 1997. Tomo I. p. 262. ISBN: 0-07-057147-3

⁸ GRUPO TRANSMERQUIM. Hojas de datos de seguridad. [En línea]. [Citado el 11 de marzo de 2018]. Disponible en: <http://www.gtm.net/images/industrial/n/NITRITO%20DE%20SODIO.pdf>

⁹ OTHMER. Op. Cit., p. 200. ISBN: 978-0-471-15158-6.



Si se forma algo de nitrato de sodio, puede separarse fácilmente mediante una cristalización diferencial¹⁰.

El nitrito de sodio actúa como un inhibidor anódico hacia los metales ferrosos formando una película de óxido fuertemente adherida sobre el acero, evitando la disolución del metal en las áreas anódicas¹¹.

Por lo tanto, para la producción de estas sales inorgánicas se requiere tener definido un proceso de obtención viable, así como también varias materias primas como son ácido nítrico, carbonato de sodio o hidróxido de sodio y óxidos de nitrógeno. Los óxidos de nitrógeno no son comercializados ya que se aprovechan en las industrias para producir compuestos de un valor elevado, debido a esto para producir los compuestos que se requieren, inicialmente se deben producir los gases nitrosos por medio de la oxidación de amoníaco, además se obtiene otra de las materias primas requeridas para el proceso como lo es el ácido nítrico por medio de la absorción reactiva de una parte de estos óxidos con agua.

2.3. PROCESO DE OBTENCIÓN DE ÁCIDO NÍTRICO

El ácido nítrico se prepara industrialmente por oxidación catalítica del amoníaco a alta temperatura con exceso de aire. El procedimiento fue desarrollado en 1902 por el químico alemán Wilhem Ostwald (1853-1932). En el proceso Ostwald, se utilizan altas temperaturas y catalizadores de platino para convertir amoníaco en ácido nítrico¹².

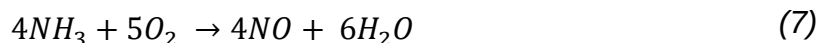
El proceso para la obtención de ácido nítrico se compone de las siguientes etapas:

¹⁰ OTHMER. Op. Cit., p. 195. ISBN: 978-0-471-15158-6.

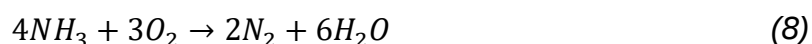
¹¹ *Ibíd.*, p. 200.

¹² BRIZUELA, Mario, *et al.* Ácido Nítrico. Universidad José Antonio Páez, Venezuela: (15 julio, 2016), 5 p.

2.3.1. Oxidación del amoníaco con aire a óxido nítrico. El procedimiento consiste en hacer reaccionar en el reactor catalítico una mezcla de amoníaco y aire enriquecido en oxígeno para obtener selectivamente óxido nítrico¹³.



La oxidación total del amoníaco produce nitrógeno elemental¹⁴:



La oxidación del amoníaco con oxígeno a una temperatura inferior a los 950°C en presencia de un catalizador de platino, da como producto principal de la reacción monóxido de nitrógeno¹⁵.

El catalizador más usado está compuesto por platino en un 90% y rodio en un 10%. El catalizador consiste en una malla formada a partir del entrelazado de hilos metálicos de 60-75 µm. Desde 1 hasta 50 mallas metálicas de catalizador se pueden fijar en el reactor (cuyo diámetro puede llegar a los 5,5m), dependiendo de la presión de operación y el diseño del mismo¹⁶.

2.3.2. Oxidación del óxido nítrico para formar dióxido de nitrógeno. El gas que se obtiene de la primera reacción de oxidación catalítica (reacción 7) contiene entre un 10-12% de NO, que se enfría en un tren de intercambiadores de calor y va reaccionando con oxígeno para producir NO₂¹⁷.



El dióxido se dimeriza a tetraóxido de dinitrógeno (N₂O₄) por el agua que está en forma de vapor en la mezcla de gases¹⁸.



¹³ GASCUE, Imanol. Producción de ácido nítrico. Ingenieríaquímica.net. [En línea]. [Citado el 22 mayo 2018]. Disponible en: <http://www.ingenieriaquimica.net/articulos/332-produccion-de-acido-nitrico-ii>

¹⁴ MIRANDA, Sergio. "Curso de Química Industrial II", Universidad de Los Andes, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Química. Año 2002, 72 p.

¹⁵ Ibid., p. 72

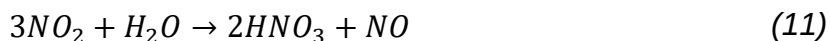
¹⁶ GASCUE, Op. cit.

¹⁷ BRIZUELA, Mario, *et al.* Ácido Nítrico. Universidad José Antonio Páez, Venezuela: (15 julio, 2016), 7 p.

¹⁸ MIRANDA. Op. Cit., p.76

2.3.3. Absorción en agua del dióxido de nitrógeno y tetraóxido de nitrógeno.

Esta parte del proceso se lleva a cabo las siguientes reacciones en una columna de absorción reactiva:



La concentración de ácido nítrico a la salida de la columna depende de la temperatura, presión, número de etapas de absorción y la concentración de dióxido de nitrógeno y tetraóxido de nitrógeno a la entrada del absorbedor.

Para maximizar el rendimiento, la temperatura se mantiene baja (aproximadamente entre 50-65°C) y la presión elevada (9-10 atm). La absorción del dióxido de nitrógeno en agua para formar ácido nítrico tiene un rendimiento del 99,9% por lo que el rendimiento global a partir del amoníaco fluctúa en torno al 95%¹⁹.

El ácido nítrico obtenido por el proceso Ostwald suele tener una composición del 60%²⁰, la cual resulta adecuada para la producción de nitrato de sodio.

A partir de un balance de las diferentes reacciones que se dan en el proceso, la producción de ácido nítrico se resume por la siguiente reacción global²¹.



El anterior proceso descrito se muestra detalladamente en el Anexo C.

¹⁹ GASCUE, Op. Cit.

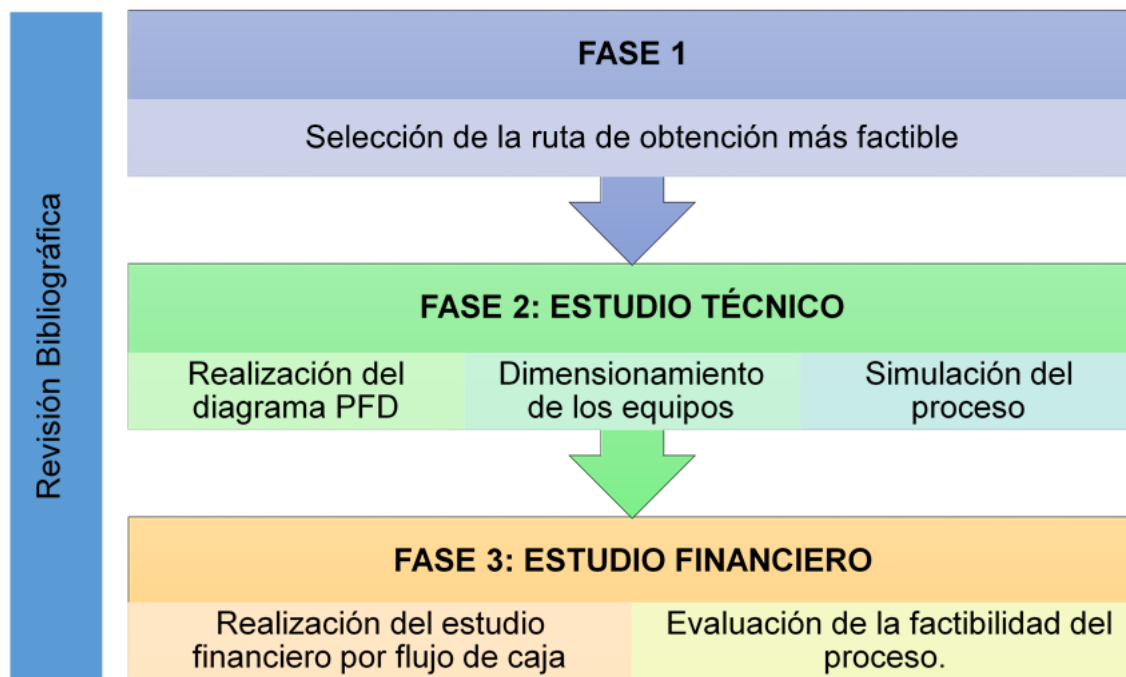
²⁰ BRIZUELA, Op. Cit. p. 7

²¹ GASCUE, Op. Cit.

3. METODOLOGÍA

A continuación, se muestra el diagrama resumen de la metodología utilizada para el desarrollo de este trabajo.

Figura 1. Diagrama resumen metodología



3.1. SELECCIÓN DE LA RUTA DE OBTENCIÓN MÁS FACTIBLE

Para la producción de nitrito y nitrato de sodio se tienen diferentes rutas de obtención, las cuales se estudian en el Anexo D, se tiene en cuenta que en todas las rutas de síntesis el ácido nítrico debe adquirirse como insumo.

De acuerdo a los diferentes potenciales económicos (Anexo I, digital, Hoja: potencial económico), se observa que la ruta de obtención más factible es la ruta de síntesis 4. En consecuencia, se procede a realizar el estudio técnico, como también se toma en consideración la síntesis de ácido nítrico como paso intermediario para la producción de nitrato de sodio.

3.2. . ESTUDIO TÉCNICO

CONSIDERACIONES Y SUPOSICIONES EN EL DISEÑO DE EQUIPOS

Primeramente, en la figura 2 se puede observar el diagrama de flujo del proceso (PFD) mediante la ruta de síntesis seleccionada. Para producir 27,260 Ton/año se optará por:

- Los productos principales se obtienen diluidos en agua al 50% en peso.
- La planta opera 341 días/año con 24 días de mantenimiento.
- Todos los equipos dimensionados son en acero Inoxidable.

3.2.1. Reactores.

- Se escoge un reactor de flujo pistón (PFR) para los 8 reactores presentes en el diagrama de flujo en Hysys²².
- Las reacciones son exotérmicas, por tanto, se requiere de una chaqueta de refrigeración para mantener la temperatura en un valor deseado²³.

3.2.2. Bombas.

- Se utiliza la ley de conservación de masa²⁴.
- Si el flujo es incompresible, el gasto volumétrico en la entrada y el gasto volumétrico en la descarga es igual²⁵.
- La bomba no aumenta necesariamente la velocidad del fluido que pasa por ella, sino que incrementa la presión del fluido.
- Con ayuda de los balances de masa y energía se conoce: el flujo que ingresa a la bomba y la presiones tanto de entrada y salida de la bomba²⁶.

²² CANCHUCAJA CRUZ, Ramiro Félix; MORI FLORES, Jackelin Judith. Estudio técnico-económico de la producción de nitrato de amonio para la industria minera a partir de la petroquímica del metano. Tesis para optar el título de ingeniero químico. Lima.: Universidad nacional de ingeniería. 2011. p.65.

²³ GUZMAN, L, et. al. Op. cit., p. 20.

²⁴ CENGEL, Yunus A; CIMBALA, John M. Mecánica de fluidos fundamentos y aplicaciones. 2 ed. España, 2012. p. 736.

²⁵ *Ibíd.*, p. 736.

²⁶ *Ibíd.*, p. 736.

3.2.3. Intercambiadores de calor.

- Se eligen los intercambiadores de tubo y carcasa ya que poseen un amplio rango de aplicabilidad y flexibilidad operativa.
- Tienen algunas ventajas como: La configuración ofrece gran área superficial en un volumen pequeño, buena forma para operar a presión, limpieza fácil etc.
- El patrón de flujo a utilizar es en contracorriente debido a que estos aprovechan mejor la diferencia de temperatura disponible y aumenta el aprovechamiento del potencial de transferencia²⁷.

3.2.4. Separadores.

- Los separadores son de tipo gas-líquido que contiene además una malla para condensar posibles evaporaciones de la fase líquida²⁸.

3.2.5. Tanques.

- El tanque TK-101 es de forma esférica ya que es el recomendado para almacenar amoníaco sin posibles fugas²⁹.
- Los tanques TK-102 a TK-104 son de modo vertical y con cabeza fija.
- La bodega de almacenamiento debe estar provista con piso de concreto resistente a la corrosión³⁰.

3.2.6. Mezcladores.

- Se establecieron tiempos de residencias por heurística de 5 minutos para líquidos y 2 minutos para gases, con lo cual se halla un volumen aproximado del tanque teniendo en cuenta el sobre diseño de 20%³¹.

²⁷ SINNOTT, Ray; TOWLER, Gavin. Diseño en ingeniería química. Barcelona: Reverté, 2012. p. 931-932

²⁸ Ibid., p. 603

²⁹ LEON ESTRADA, Juan Manuel. *Diseño y cálculos de recipientes a presión. [En línea]. Citado el: 19 de septiembre de 2018.* Disponible en: <https://es.scribd.com/doc/74197620/Diseno-Y-Calculo-de-Recipientes-a-Presion-Juan-Manuel-Leon-Estrada>

³⁰ SINNOTT, Ray; TOWLER, Gavin. Op., cit., p 1013.

³¹ PERRY, John. Manual del ingeniero químico. Uteha: Mc. Graw Hill, 1966.

3.2.7. Compresores.

Los compresores se diseñaron de acuerdo a las siguientes reglas heurísticas:

- Si la relación entre la presión de salida y la presión de entrada es mayor que 3 se deben utilizar múltiples etapas.
- Se enfría el gas antes de comprimirlo si la temperatura de entrada al compresor es mayor que 167 °C

3.2.8. Torres de absorción.

De acuerdo al diseño de torres que se requieren en este proceso se maneja una temperatura moderada de 65°C y un flujo de solvente considerablemente bajo debido a que se presenta absorción reactiva.

3.3. DIMENSIONAMIENTO DE LOS EQUIPOS

Se realiza el dimensionamiento de los equipos con el fin de obtener las áreas, costos y demás parámetros relevantes para continuar con el desarrollo del proyecto.

El diseño de cada equipo se muestra en Anexo I, Digital, y la función de cada uno de ellos se puede observar en el Anexo E.

3.4. SIMULACIÓN DEL PROCESO

Se realizó la simulación de la ruta de obtención escogida en el programa *Aspen Hysys* (Ver Anexo F). En un primer momento, se agregó la lista de todos los componentes involucrados en el proceso. Luego, se seleccionó el paquete termodinámico para esa lista y se introdujo el set de reacciones con sus respectivos parámetros característicos. Posteriormente, se añadieron las corrientes de materia y energía junto a los equipos del proceso. Esto último con base en el dimensionamiento previo y los balances de masa y energía.

La simulación para la producción de nitrito y nitrato de sodio puede observar en el Anexo J. Simulación NaNO₂ y NaNO₃, Digital.

3.4.1. Modelo termodinámico. El modelo termodinámico que se emplea para simular un equipo o, en general, un proceso consiste en un conjunto de ecuaciones

que caracterizan el comportamiento de las sustancias. Estas ecuaciones contienen una gran cantidad de términos relacionados con las propiedades físicas y termodinámicas de las sustancias y/o mezclas que constituyen las corrientes del proceso. El modelo escogido permite calcular tales propiedades a partir de otras variables más simples como la temperatura, la presión y la composición.

Inicialmente en la simulación para la producción de ácido nítrico se utilizan dos paquetes de fluidos, para las corrientes 1-29 se selecciona Peng-Robinson y para la corriente 29 en adelante se utiliza PRSV, en la simulación aguas abajo se utiliza UNIFAC.

3.4.2. Producción de ácido nítrico. Inicialmente se tiene amoníaco que se encuentra almacenado en estado líquido a $-33.15\text{ }^{\circ}\text{C}$ y a presión atmosférica en el tanque TK-101. La bomba P-101 envía un flujo de 400.5 kg/h NH_3 al proceso a 1120 kPa para luego ser vaporizado a $28.45\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el intercambiador E-101, en seguida se sobrecalienta a 177°C en los intercambiadores E-102 y E-103 utilizando vapor de proceso y pasa al filtro FIL-101 A/B el cual elimina las partículas sólidas.

Por otro lado, se tiene un flujo de $5,703.83\text{ kg/h}$ de aire atmosférico el cual se filtra en FIL-102 A/B y continua a un tren de compresión en el cual se pasa de una presión de 101.3 kPa a 1100 kPa , para lograr el cambio brusco de presión se utilizan 1 compresor axial de cuatro etapas y un compresor centrífugo, los cuales presentan 2 intercambiadores de calor entre la segunda y la cuarta etapa de compresión, debido a que la temperatura a la entrada de un compresor debe ser menor que 167°C ³².

El amoníaco una vez vaporizado y filtrado, se mezcla en M-101 con la corriente de aire, que también ha sido previamente filtrada y comprimida, obteniendo una mezcla amoníaco/aire que contiene una composición molar de 10.63% de amoníaco

³² BRANAN, Carl. Rules of thumb for chemical engineers. 4 ed. Burlington, ELSEVIER, 2005. P.133. ISBN: 0750678569

(relación adecuada para maximizar la formación de NO)³³. Esta mezcla se hace pasar al reactor R-101 en el cual ocurre la oxidación del amoníaco sobre el catalizador de platino. El amoníaco se oxida rápidamente y como la reacción es exotérmica, la temperatura se eleva hasta 908.6°C.

La formación del dióxido de nitrógeno está favorecida por la disminución de la temperatura, por lo que el gas que ha reaccionado fluye a través de un tren de intercambiadores de calor con reacción³⁴. Además, bajas temperaturas favorecen la formación de tetraóxido nítrico, el cual es un dímero del dióxido nítrico³⁵. Dichas reacciones ocurren debido a las condiciones de temperatura decrecientes. Si no se consideran estas reacciones no se podría estimar la presencia de dióxido nítrico y tetraóxido nítrico en la entrada de la columna de absorción, ya que estos se forman únicamente en el tren de enfriamiento³⁶. Debido a que en HYSYS no es posible realizar la simulación de un intercambiador de calor con reacción se debe presentar en la entrada de cada intercambiador reactores adiabáticos.

La reacción para la producción de dióxido de nitrógeno ocurre del intercambiador E-105 al intercambiador E-110. A continuación, en el condensador E-112, se condensan parcialmente los gases de reacción hasta separar completamente el agua en estado líquido. La formación de este condensado ocasiona la conversión considerable de óxido nítrico, dimerización del dióxido nítrico y formación de ácido nítrico a partir de la hidrólisis del dióxido nítrico y el tetraóxido nítrico. Las cuatro reacciones son exotérmicas y el proceso requiere una gran demanda de enfriamiento ya que se lleva la corriente gaseosa desde una temperatura de 908.6°C hasta 25°C, lo cual se logra con una serie de intercambiadores.

El ácido nítrico producido es separado en V-101 del proceso con una composición de 15.35% molar y enviado directamente a la torre de absorción C-101.

³³ GASCUE, Op. cit.

³⁴ GUZMAN, L, *et. al.* Op. cit., p. 19.

³⁵ CANCHUCAJA CRUZ, Ramiro Félix; MORI FLORES, Jackelin Judith. Op. Cit., p. 55.

³⁶ *Ibíd.*, p. 56.

A continuación, el gas se combina con aire a 60°C en el mezclador M-102 y pasa al intercambiador E-113 en el cual se produce más dióxido de nitrógeno y su dímero. Como no hay enfriamiento la temperatura se eleva hasta 70.87°C.

Luego del enfriamiento, el gas se circula hacia la torre de absorción C-101, donde reacciona con agua desionizada a contracorriente³⁷. Además, el ácido nítrico al 15.35% obtenido anteriormente, es suministrado lateralmente en la etapa que corresponde a su concentración³⁸. Es importante el enfriamiento en las zonas baja y media, debido a que promueve las reacciones de dimerización y oxidación. El ácido nítrico es producido según las reacciones (11) y (12). Esta absorción con reacción es muy compleja e intervienen muchas reacciones. La transferencia de masa en la torre C-101 ocurre entre los platos y reacciones de oxidación en los espacios vacíos entre los platos³⁹. Tal absorción es imposible simularla en una columna de Aspen HYSYS. Por tal motivo en el PFD del HYSYS (Anexo J) no realiza cálculos y se muestra solo como figura ya que los cálculos de esta torre de absorción se encuentran en el Anexo I, hoja: C-101.

3.4.3. Producción de nitrito y nitrato de sodio. Al tener la materia prima disponible como lo son los gases nitrosos, ácido nítrico y carbonato de sodio, se procede a la obtención de los productos deseados.

El carbonato de sodio está almacenado en el tanque TK-103 e ingresa al proceso a una temperatura de 25°C y una presión de 101.3 kPa. A continuación es diluido con agua en el mezclador M-103 e impulsado con una presión de 1000 kPa al proceso por medio de la bomba P-102. Debido a que el carbonato de sodio se requiere para los dos procesos, es dividido en las cantidades requeridas para cada proceso en el divisor D-102 a la torre de absorción C-102 y al reactor R-108.

En la torre de absorción C-102 son absorbidos los gases nitrosos previamente enfriados en el intercambiador E-115 desde una temperatura de 272.07°C hasta

³⁷ GUZMAN, L, *et. al.* Op. cit., p. 21.

³⁸ CANCHUCAJA CRUZ, Ramiro Félix; MORI FLORES, Jackelin Judith. Op. Cit., p. 56.

³⁹ *Ibíd.*, p. 57

150°C⁴⁰ con carbonato de sodio que ingresa a la torre con una temperatura de 60°C⁴¹, para así obtener el nitrito de sodio con una composición de 67% molar, con algo de agua y un poco de carbonato. A continuación, se mezcla con más agua en el mezclador M-104 para así obtener el nitrato de sodio con la relación $\text{NaNO}_2/\text{H}_2\text{O}$ requerida, la cual es 50:50 peso.

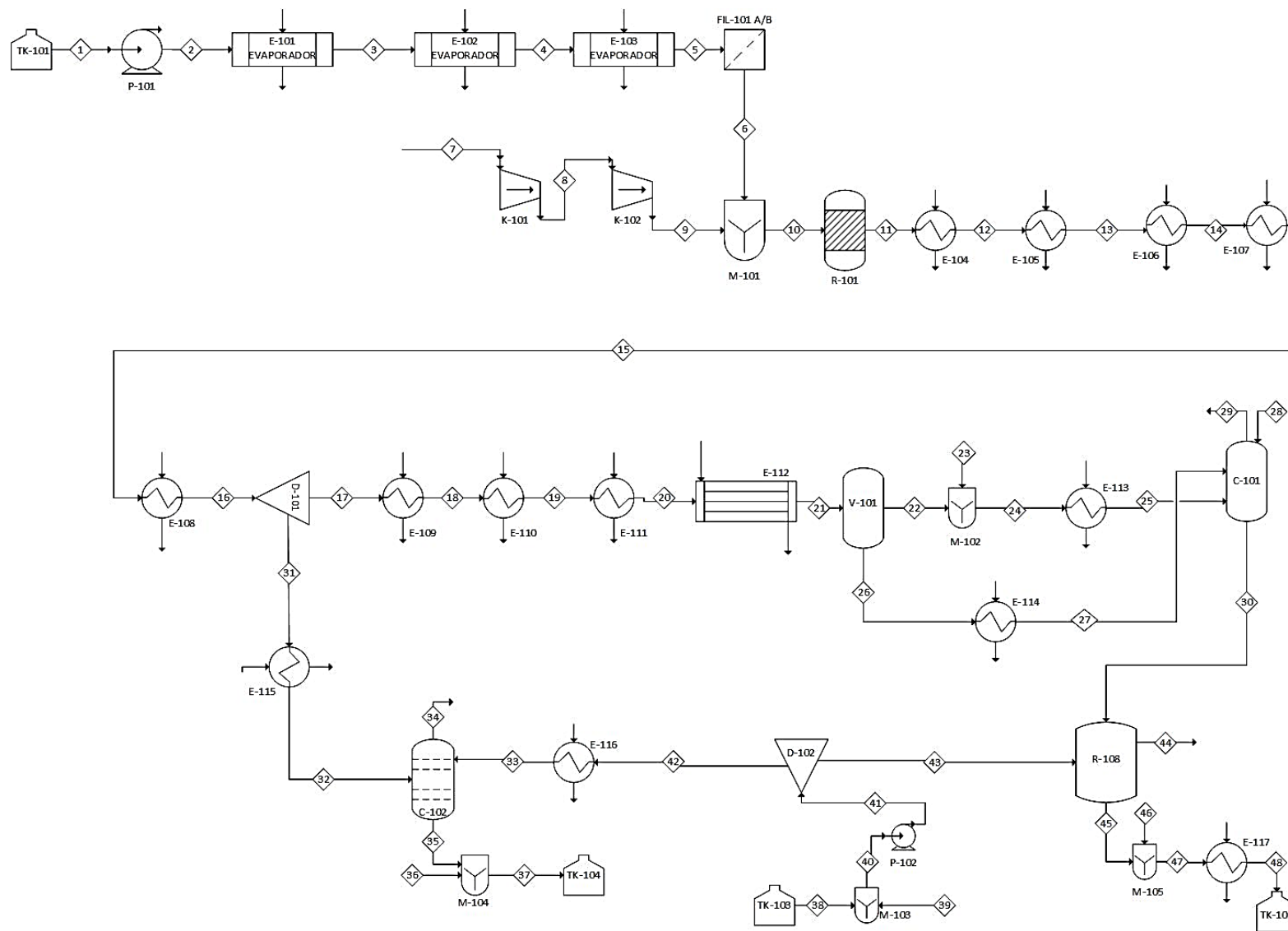
Por otro lado, en el reactor R-108 el carbonato de sodio reacciona con el ácido nítrico producido en la torre C-101 y se obtiene nitrato de sodio y agua con una composición molar de 0.84 y 0.16 respectivamente, como el producto solicitado tiene una composición 50:50 peso de nitrato/agua se diluye con un poco más de agua en el mezclador M-105 y finalmente es almacenado en el tanque TK-102.

El proceso descrito anteriormente, con la tabla de corrientes respectiva al diagrama se puede observar en el Anexo I, Digital, hoja PFD.

⁴⁰ WENDEL, M. Manufacture of nitrates [Patente]. Estados Unidos. 1997. p 3

⁴¹ *Ibíd.*, p. 3

Figura 2. Diagrama PFD



3.5. ESTUDIO FINANCIERO

3.5.1. CONSIDERACIONES GENERALES. Para el estudio financiero se tiene en cuenta las siguientes suposiciones y consideraciones:

- La vida útil de los equipos utilizados será de aproximadamente 10 años
- Al finalizar el proyecto se estima un valor de salvamento de los equipos de la planta equivalente al 34% del valor con el cual fueron adquiridos. El valor de depreciación será del 20% anual.
- El terreno seleccionado, al cabo de la finalización del proyecto, tendrá el mismo costo por el cual fue adquirido, ignorando la valorización del terreno, debido a la complejidad de la proyección de valoración de inmuebles.
- Para convertir costos en dólares [USD] a pesos colombianos [COP] se trabajó con un valor del de: 3,100 [COP], equivalente al precio del dólar utilizado en la fecha 6 de septiembre del 2018.
- Los reactores del R-102 al R-107 son solo simulados en Hysys y no se tendrán en cuenta en los costos de equipos ya que en la realidad las reacciones suceden en los intercambiadores de calor.

3.5.2. Métodos utilizados para la estimación de costos. Se han realizado los cálculos pertinentes para la estimación de los costos de cada uno de los equipos fundamentales en la planta de producción usando los siguientes métodos:

- Método del efecto de la capacidad⁴²

$$C_{BM} = C_p^o * F_{BM} \quad (14)$$

⁴² TURTON, Richard. *et al. Analysis, Synthesis, and Design of Chemical Processes*. 3 ed. New York: Prentice Hall, 2009. p. 177

Donde el valor de C_p^o se puede calcular con las gráficas presentes en el apéndice A del libro: “*Analysis, Synthesis, and Design of Chemical Processes*” o mediante la siguiente ecuación⁴³:

$$\log_{10} C_p^o = K_1 + K_2 \log_{10}(A) + K_3 [\log_{10}(A)]^2 \quad (15)$$

Siendo, A el parámetro de capacidad para el equipo o su magnitud característica de diseño. Los datos para las constantes: K_1 , K_2 y K_3 , junto con los valores máximos y mínimos utilizados en la correlación, se dan en la Tabla A.1 y dependen del tipo de equipo⁴⁴. El valor para F_{BM} está dado en la tabla A.7⁴⁵.

- Corrección del tiempo CI⁴⁶

$$CI = C_p(2001) * \frac{I_2}{I_1} \quad (16)$$

Se utilizan los índices de CEPCI que se encuentran publicados en las revistas Chemical Engineering⁴⁷.

3.6. COSTOS DE CAPITAL

3.6.1. Costos de terreno. La planta de producción de nitrito y nitrato de sodio será ubicada en Barrancabermeja, por sugerencia de los ingenieros de Ecopetrol, además de que en esta ciudad se encuentra el campo La Cira en el que se utilizan los productos antes mencionados.

Teniendo en cuenta lo anterior se cotiza el precio de un metro cuadrado en la zona industrial de Barrancabermeja basándose en varias fuentes dedicadas al comercio de bienes raíces y se realiza un promedio entre los costos del terreno y el área, a

⁴³ Ibid., 952

⁴⁴ Ibid., p. 953-956

⁴⁵ Ibid., p. 981

⁴⁶ Ibid., p.171

⁴⁷ SCOT, Jenkins. Cepci updates: January 2018 (prelim.) and december 2017 (final) [En línea]. En: Chemical Engineering. Marzo, 2018. Disponible en: <https://www.chemengonline.com/cepci-updates-january-2018-prelim-and-december-2017-final/?printmode=1>

continuación, se analiza la facilidad de adquirir insumos y materias primas como de proveer todos los servicios necesarios para el buen funcionamiento de la planta.

El costo de metro cuadrado en Barrancabermeja es aproximadamente de COP\$ 1,721,803.85.

Nuestra planta requiere un terreno que tiene un costo de COP\$ 1,618,286,524.90. Teniendo en cuenta que el tamaño aproximado de la planta es de 939.88 m². Este tamaño se calcula a partir del dimensionamiento de los equipos y su espaciado de seguridad entre cada equipo⁴⁸. (Anexo I, Digital, hoja: costo terreno)

3.6.2. Costos de equipos. Para la estimación de los costos modulares de los equipos se utiliza la herramienta CAPCOST (Anexo K, Digital). Al suministrar los parámetros más relevantes del diseño, realiza una estimación aproximada del costo modular del equipo basándose en el método del efecto de la capacidad.

3.7. COSTOS DE OPERACIÓN

La planta requiere una inversión significativa debido a sus costos de operación. Entre los principales componentes de dichos costos se encuentran los costos de materia prima, de personal, de servicios industriales y de tratamiento de residuos (Anexo I.). Los costos de manufactura por operación han sido divididos en tres categorías: Costos variables, costos fijos y costos generales. (Anexo I, Digital, Hoja: COM).

3.7.1. Costos variables o costos directos de manufactura (DMC). Los costos variables son los gastos que varían en función de la producción. En ellos se encuentran los costos de materia prima, tratamiento de desechos, servicios

⁴⁸ PDVSA. Separación entre equipos e instalaciones. Venezuela. 25 de abril de 1995. Volumen 1. Disponible en: <http://www.elistas.net/cgi-bin/eGruposDMime.cgi?K9D9K9Q8L8xumopxC-qjd-uluCTXXQCvthCnoqdy-qihhyCPYWPQifb7>

industriales y mano de obra, entre otros, en grados menores como en el caso de los costos de mantenimiento y mano de obra. (Anexo I, Digital, Hoja: COM).

La ecuación siguiente describe los costos variables totales de la planta⁴⁹:

$$DMC = CRM + CWT + CUT + 1.31COL + 0.078FCI + 0.04COM \quad (17)$$

3.7.2. Costos fijos. Hacen referencia a los gastos de la planta que son independientes de los posibles cambios en el flujo de producción. Entre los costos fijos se encuentran los impuestos a la propiedad, seguros y la depreciación, que representan costos a tasas constantes.

Los costos fijos totales de la planta son descritos por la siguiente ecuación⁵⁰:

$$0.1612 FCI + 0.6136 COL + Depreciación \quad (18)$$

Para el cálculo de los costos fijos usaremos un margen de depreciación equivalente al 20% del costo capital. (Anexo I, Digital, Hoja: COM)

3.7.3. Costos generales. Entre los costos generales se encuentran los gastos de administración, ventas, financiación e investigación y desarrollo. (Anexo I, Digital, Hoja: FCI, COL, COM)

Los costos generales totales se expresan mediante la siguiente ecuación⁵¹:

$$0.1 COM + 0.009 FCI + 0.177 COL \quad (19)$$

3.7.4. Ecuación COM y coeficientes. Los costos por operación pueden ser calculados en función del costo capital, costo por mano de obra, tratamiento de desechos y servicios industriales. La siguiente ecuación resume los costos de

⁴⁹ JIMÉNEZ GUTIÉRREZ, Arturo. Diseño de procesos en ingeniería química. Mexico, Reverté, 2003. P. 38.

⁵⁰ Ibid., P. 38

⁵¹ Ibid., P.38

manufactura en términos de dichas variables, así (Anexo I. Digital, Hoja: COM, Factores):

$$0.28FCI + 2.44COL + 1.16(CUT + CWT + CRM) \quad (20)$$

3.8. INDICADORES DE FACTIBILIDAD

Los indicadores de factibilidad permiten conocer si un proyecto es viable o no. En el cual se observan los más comunes que serán el flujo de caja, VPN⁵², TIR⁵³, y punto de equilibrio.

3.8.1. FLUJO DE CAJA

Se consideraron como ingresos las ventas del producto y el valor del terreno en el último año de vida del proyecto (sin tener en cuenta la valorización del mismo), el valor de salvamento será el 34% de lo adquirido al inicio del proyecto.

3.8.2. VPN y TIR

El valor presente neto permite evaluar la viabilidad económica del proyecto y así determinar su rentabilidad, que está relacionada con la rentabilidad del inversionista, es decir con la tasa mínima de retorno (TMAR), ya que es el valor presente calculado a esa tasa. Cuando el VPN es positivo indica que el proyecto es rentable, cuando es negativo el proyecto no lo es.

Se estimará una TMAR de 20%, lo cual da un VPN calculado de aproximadamente 97 mil millones de pesos. (Anexo I. Digital, Hoja: VPN y TIR)

Por otra parte la tasa interna de retorno hace referencia a la tasa la cual el valor presente neto es igual a cero. Como indicador económico alude a la mayor TMAR

⁵² ROSS, Stephen; WESTERFIELD, Randolph; JAFFE, Jeffrey. Finanzas corporativas. 9 ed. México. Mc Graw Hill, 2012. P.101. ISBN: 9786071507419

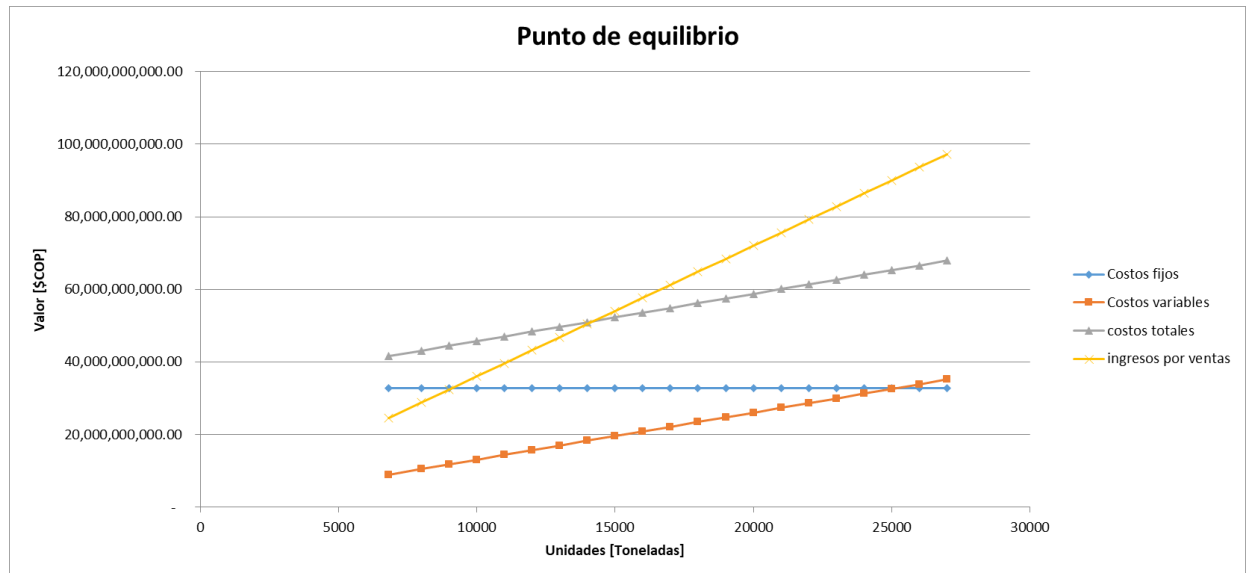
⁵³ Ibid., p.144.

que se puede esperar un inversionista en el proyecto. La planta de producción de nitrito y nitrato de sodio tiene una TIR de 24% siendo factible la inversión.

3.8.3. Precio de producción del producto. Uno de los factores decisivos en la puesta en marcha del estudio de prefactibilidad consiste en la disminución del precio de venta actual (Anexo B) y analizar la rentabilidad del proceso lo cual se tiene en cuenta en el Anexo I, Digital, Hoja: Precio de venta y se observa que se puede disminuir su valor de venta hasta \$1,800.

3.8.4. Punto de equilibrio. Es de vital importancia conocer el punto de equilibrio al momento de determinar la factibilidad de un proyecto, ya que nos permite determinar el nivel de ventas necesario para cubrir los costes totales de producción (costos fijos y costos variables).

Figura 3. Punto de equilibrio.



De acuerdo a la figura 3, se puede observar que para que se logre el objetivo de las ventas deben ser de aproximadamente 14,000 toneladas de nitrito y nitrato de sodio, esto con el fin de llegar al punto de equilibrio y dado el caso de no querer seguir con el proyecto, liquidarlo.

De acuerdo a la estimación financiera que se realizó en el presente estudio de prefactibilidad, nos permite definir qué tan viable es el proyecto, esto se lleva a cabo mediante la tasa interna de retorno (TIR) y el valor presente neto (VPN). Por consiguiente, la instalación y puesta en marcha de una planta de producción de Nitrito y Nitrato de sodio con una duración estimada de 10 años, es un proyecto viable. Como evidencia tenemos una TIR de 24% comparada con la TMAR de 20%.

La viabilidad de este proyecto se debe a los bajos costos que presentan las materias primas seleccionadas, comparados con las cifras en las que vamos a producir nuestros productos (\$1,800 c/u), siendo menor el costo adquisitivo de estos insumos. Por lo tanto, la empresa no generará pérdidas y al mismo tiempo cumplirá con la demanda interna impuesta por ECOPETROL y la demanda insatisfecha del país.

3.8.5. Resumen de costos.

Tabla 3. Resumen de costos de la planta primer año de funcionamiento

TABLA RESUMEN COSTOS DE LA PLANTA	INSTALACIÓN PLANTA [\$COP]
Terreno	\$ 1,618,286,524.90
Total equipos	\$ 29,069,189,519.69
CUT	\$ 3,508,845,116
CRM	\$ 19,708,893,999
COL	\$1,849,651,368.37
CWT	\$ 5,592,734,953.53
COM	\$46,523,063,278.44

4. CONCLUSIONES

La mejor configuración para la síntesis de nitrito y nitrato de sodio es la ruta por la cual se obtiene NaNO_2 a partir de la absorción de los gases nitrosos en carbonato de sodio y el NaNO_3 por neutralización del ácido nítrico con carbonato de sodio. Esta es la que brinda el mejor potencial económico y factibilidad. Para este proceso se tiene en cuenta la producción de ácido nítrico.

En base a una capacidad de 80 Ton/día se obtienen dimensiones de los equipos ajustados a tamaños de una planta industrial. Las dimensiones de los equipos obtenidas de manera manual fueron corroboradas mediante el uso de simulación usando el software Aspen HYSYS.

Los indicadores de factibilidad económica de este proyecto indican que la TIR es del 24%, siendo un proyecto de inversión rentable. El costo de producción del nitrito y nitrato de sodio es de 1,800 \$COP/kg c/u, el cual es menor al valor de adquisición actual aproximadamente de 2600 \$COP/kg c/u, lo cual establece que el proyecto es económicamente rentable.

5. RECOMENDACIONES

Se recomienda pasar a la etapa de estudio de factibilidad del proyecto, para obtener valores más precisos de la rentabilidad del proyecto.

Se puede comercializar el excedente de producto en el país y así garantizar mayor rentabilidad del proceso.

Se recomienda realizar la integración energética del proceso para ahorrar costos y hacer el proyecto más viable.

BIBLIOGRAFÍA

AUSTIN, George. Manual de procesos químicos en la industria, Colombia.: McGraw-Hill, 1997. Tomo I. p. 262.. ISBN: 0-07-057147-3

BRANAN, Carl. Rules of thumb for chemical engineers. 4 ed. Burlington, ELSEVIER, 2005. P.133. ISBN: 0750678569

BRIZUELA, Mario, *et al.* Ácido Nítrico. Universidad José Antonio Páez, Venezuela: (15 julio, 2016), 5-7p.

CANCHUCAJA CRUZ, Ramiro Félix; MORI FLORES, Jackelin Judith. Estudio técnico-económico de la producción de nitrato de amonio para la industria minera a partir de la petroquímica del metano. Tesis para optar el título de ingeniero químico. Lima.: Universidad nacional de ingeniería. 2011. p.(55-65).

CENGEL, Yunus A; CIMBALA, John M. Mecánica de fluidos fundamentos y aplicaciones. 2 ed. España, 2012. p. 736.

GASCUE, Imanol. Producción de ácido nítrico. Ingenieríaquímica.net. [En línea]. [Citado el 22 mayo 2018]. Disponible en: <http://www.ingenieriaquimica.net/articulos/332-produccion-de-acido-nitrico-ii>

GRUPO TRANSMERQUIM. Hojas de datos de seguridad. [En línea]. [Citado el 11 de marzo de 2018]. Disponible en: <http://www.gtm.net/images/industrial/n/NITRATO%20DE%20SODIO.pdf>

GRUPO TRANSMERQUIM. Hojas de datos de seguridad. [En línea]. [Citado el 11 de marzo de 2018]. Disponible en: <http://www.gtm.net/images/industrial/n/NITRITO%20DE%20SODIO.pdf>

GUZMAN, L, *et. al.* Producción de ácido nítrico a partir de amoniaco [PDF]. España, Universidad técnica Federico Santa María. Departamento de ingeniería química y ambiental. 2012. P(19-23). [Consultado: 7 de junio de 2018]

JIMÉNEZ GUTIÉRREZ, Arturo. Diseño de procesos en ingeniería química. Mexico, Reverté, 2003. P. 38.

LEON ESTRADA, Juan Manuel. *Diseño y cálculos de recipientes a presión.* [En línea]. Citado el: 19 de septiembre de 2018. Disponible en: <https://es.scribd.com/doc/74197620/Diseno-Y-Calculo-de-Recipientes-a-Presion-Juan-Manuel-Leon-Estrada>

MIRANDA, Sergio. "Curso de Química Industrial II", Universidad de Los Andes, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Química. Año 2002, 72-76 p.

OTHMER, Kirk. *Encyclopedia of Chemical Technology, 4 Edición, U.S.A. Ed. Wiley Jhon & Sons. 1996. Vol. 22, p. (193-200). ISBN: 978-0-471-15158-6.*

PDVSA. Separación entre equipos e instalaciones. Venezuela. 25 de abril de 1995. Volumen 1. Disponible en: <http://www.elistas.net/cgi-bin/eGruposDMime.cgi?K9D9K9Q8L8xumopxC-qjd-uluCTXXQCvthCnoqdy-qlhhyCPYWPQifb7>

PERRY, John. Manual del ingeniero químico. Uteha: Mc. Graw Hill, 1966.

ROSS, Stephen; WESTERFIELD, Randolph; JAFFE, Jeffrey. Finanzas corporativas. 9 ed. México. Mc Graw Hill, 2012. P.101. ISBN: 9786071507419

SCOT, Jenkins. Cepci updates: January 2018 (prelim.) and december 2017 (final) [En línea]. En: Chemical Engineering. Marzo, 2018. Disponible en: <https://www.chemengonline.com/cepci-updates-january-2018-prelim-and-december-2017-final/?printmode=1>

SINNOTT, Ray; TOWLER, Gavin. Diseño en ingeniería química. Barcelona: Reverté, 2012. p. 931-1013

TURTON, Richard. *et al. Analysis, Synthesis, and Design of Chemical Processes*. 3 ed. New York: Prentice Hall, 2009. p. 177

VOORDOUW, Gerrit, *et al.* Use of Nitrate or Nitrite for the Management of the Sulfur Cycle in Oil and Gas Fields. Houston, Texas, U.S.A. Society of Petroleum Engineers. 2007. p.1.

-WENDEL, M. Manufacture of nitrates [Patente]. Estados unidos. 1997. p 3

ANEXOS

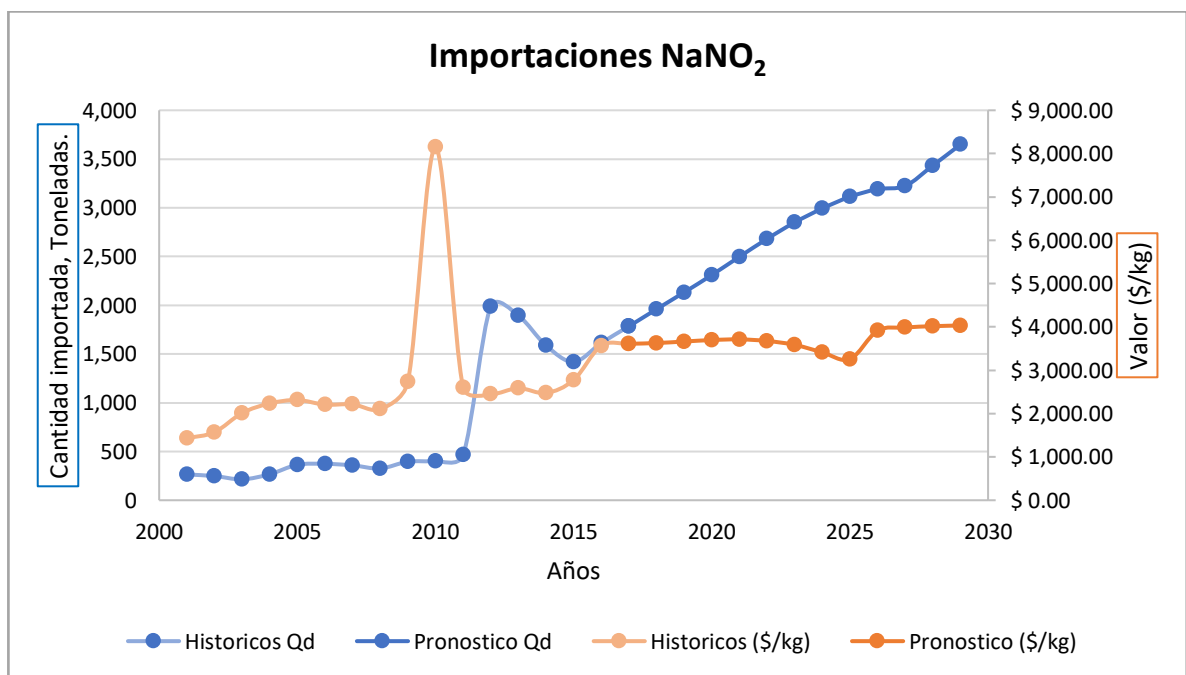
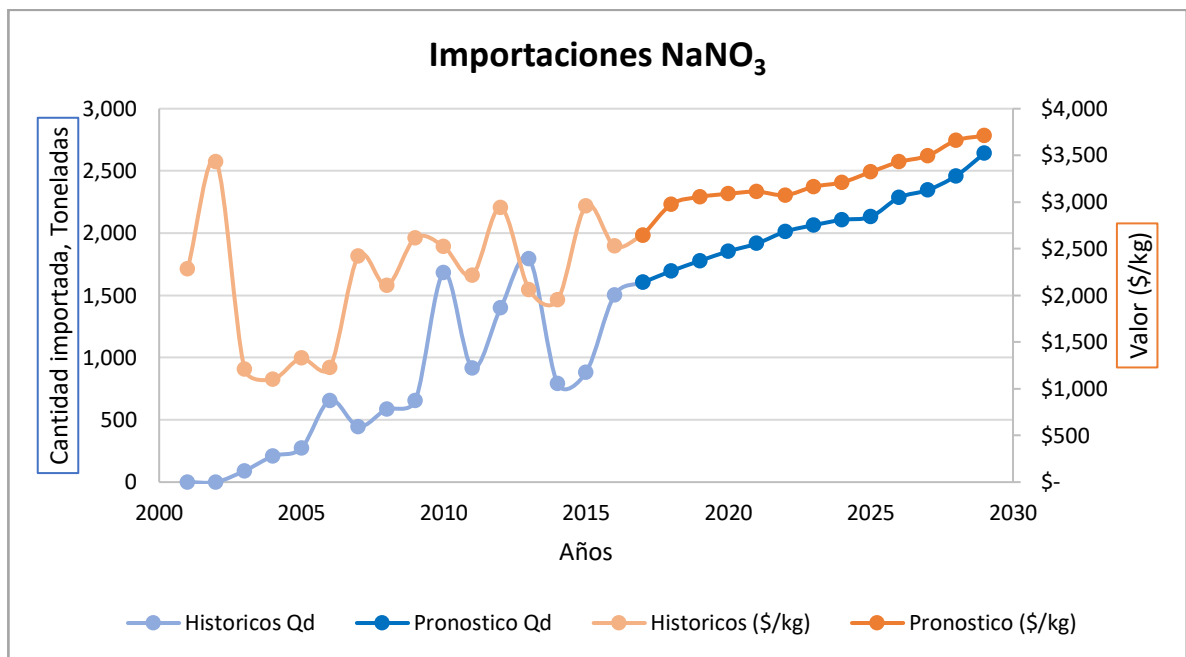
ANEXO A. JUSTIFICACIÓN DE LA CAPACIDAD DE LA PLANTA

Inicialmente Ecopetrol requiere 10 ton/día de nitrito y nitrato de sodio para inhibir la corrosión por bacterias sulfato reductoras en el campo la Cira. Adicional a esto se sugiere aumentar la producción de estos insumos en un factor de 3, para satisfacer la demanda en otros campos de Ecopetrol, lo cual equivale a 30 ton/día, en otras palabras, serían 15 ton/día de cada producto, debido a que este producto es obtenido en una relación másica 50:50 de nitrato/agua y nitrito/agua lo anterior equivale a 30ton/día de nitrato en solución y 30 ton/día de nitrito en solución.

Se decide hacer la planta de producción de 20 ton/día de cada insumo, debido a que es viable la venta del producto restante, ya que todo el requerido en Colombia debe ser importado a un precio elevado.

- 20 ton de NaNO_2 y 20 ton H_2O = 40 ton/día de NaNO_2 en solución al 50%peso.
- 20 ton de NaNO_3 y 20 ton H_2O = 40 ton/día de NaNO_3 en solución al 50%peso.

De acuerdo a que la planta opera solo 341 días al año, ya que los 24 días restantes son de mantenimiento, diariamente sobraría 5ton de cada insumo, lo cual equivale a 1705ton/año, las cuales se justifican a continuación según históricos del DANE.



Como se puede observar en las gráficas de importación de cada insumo para el año 2019 en Colombia se demanda una cantidad de 1,777.84 ton/año de NaNO_3 y 2,132.49 ton/año de NaNO_2 , debido a que en la planta de producción quedan 1,705

ton/año de cada insumo, se concluye que es viable venderlo en Colombia a un precio más económico que el de importación, ya que según los históricos el en 2019 el precio para el NaNO_3 será aproximadamente COP\$3,000/kg y para el NaNO_2 será de aproximadamente COP\$3,600/kg.

ANEXO B. COTIZACIÓN DE PRECIOS NaNO_2 y NaNO_3



Itagüí, enero 19 de 2.018

Señores:
GIMBA-UIS
Jeimy Marcela Ruiz Lizarazo

Asunto: Cotización

A continuación, le relaciono los precios para los productos solicitados por ustedes:

PRODUCTO	PRECIO \$/kg
NITRITO DE SODIO LIQ. 50%	3.250
NITRATO DE SODIO LIQ. 40%	2.650
MEZCLA NITRITO 25% Y NITRATO 25%	3.400

El precio anterior es mas IVA del 19%.

Producto en carrotanque de 11.000 kilos.

Tiempo de entrega: 7 días hábiles

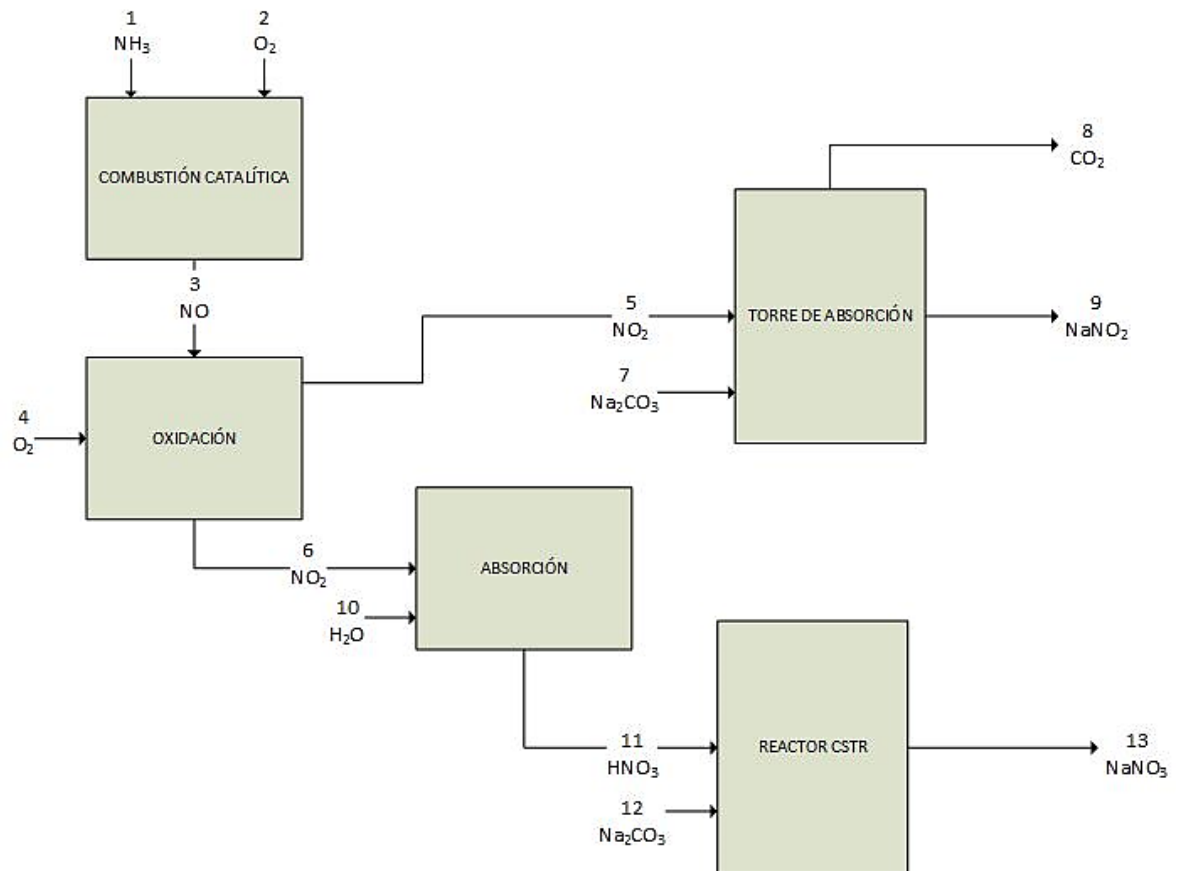
Producto colocado en sus instalaciones de Barrancabermeja- Santander.

Forma de pago contado.

Atentamente,

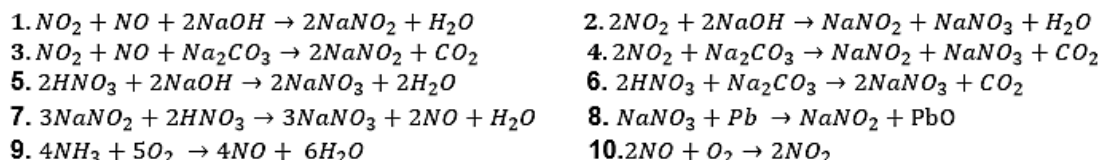
JUAN MANUEL MISAS DELGADO
DIRECTOR TECNICO

ANEXO C. DIAGRAMA BFD



ANEXO D. RUTAS DE SÍNTESIS

Para la producción de nitrito y nitrato de sodio se tienen 8 posibles reacciones, y para la producción de los gases nitrosos se tienen dos reacciones, las cuales se muestran a continuación:



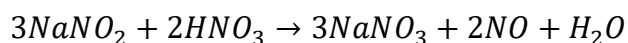
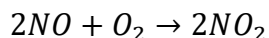
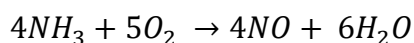
En primer lugar, se descarta la reacción 8 para la producción de nitrito de sodio a partir de nitrato y plomo, debido a que el plomo es tóxico y produce envenenamiento de trabajadores por su uso inadecuado y por una exposición excesiva a este, además de otros efectos en la salud y en el medio ambiente. El mayor peligro proviene de la inhalación de vapor o de polvo, otra razón por la cual esta reacción es descartada es porque el plomo rara vez se encuentra en su estado elemental y así se requiere para esta reacción.

Debido a que se encontró una variedad de reacciones para la obtención de nitrito de sodio o nitrato de sodio, pero no una que produzca ambos productos en una cantidad suficiente como la que se requiere en el proceso se realizan diferentes combinaciones de estas rutas para saber cuál es la más factible. Aparte de la unión de estas dos rutas para la obtención de los dos productos deseados, se deben agregar al proceso las rutas de síntesis para el monóxido y dióxido de nitrógeno debido a que las empresas no lo comercializan.

En total se obtienen 4 rutas de obtención diferentes, en las cuales se tiene en cuenta el valor del ácido nítrico, y se evalúa la compra o el ahorro que se genera al producirlo en el proceso. Además, se evalúa la mejor ruta por medio del potencial económico y con lo anterior se elige la ruta más viable para el proceso.

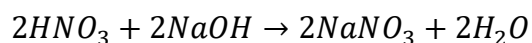
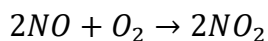
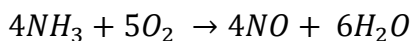
Inicialmente el proceso para las cuatro rutas de obtención es el mismo ya que se requiere la producción de gases nitrosos para obtener los productos deseados. De acuerdo a lo anterior se realiza la oxidación del amoníaco a las condiciones óptimas para la producción de monóxido de nitrógeno, seguidamente se realiza la oxidación del óxido nítrico para la producción de dióxido de nitrógeno y este es absorbido con agua para producir ácido nítrico.

Ruta de obtención 1 Al tener disponible el dióxido de nitrógeno, se hace reaccionar con hidróxido de sodio (NaOH) ya que este es un compuesto absorbente efectivo de los gases nitrosos y así se produce nitrito de sodio y una baja cantidad de nitrato de sodio. Como la cantidad producida de nitrato de sodio es muy baja y se necesita la misma cantidad de nitrato que de nitrito, se reutiliza una cantidad del nitrito de sodio producido y se hace reaccionar con ácido nítrico para así producir la cantidad deseada de nitrato de sodio.



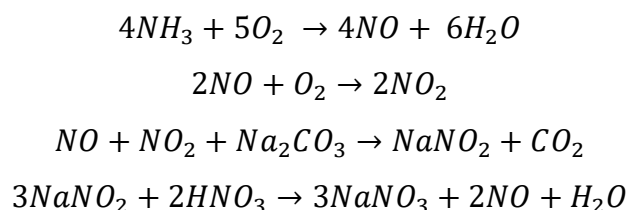
Se mira el potencial económico y se observa que no es factible esta ruta ya que la utilización de nitrito de sodio para fabricar el nitrato genera pérdidas (Anexo I, Digital, Hoja: Ruta síntesis 1).

Ruta de obtención 2 Esta ruta se diferencia de la anterior por la última reacción la cual se refiere a la producción de nitrato de sodio que es producido por neutralización del ácido nítrico con hidróxido de sodio.



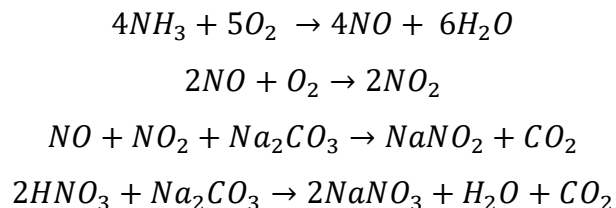
Al calcular el potencial económico de esta ruta (Anexo I, Digital, Hoja: Ruta síntesis 2) vemos que nos da factible y que está cercana a la ruta de obtención 4 lo cual se analiza las posibles adquisiciones de insumos y vemos que es más barato el carbonato de sodio adquirirlo que el hidróxido de sodio lo cual por esta razón se descarta.

Ruta de obtención 3 Esta ruta se diferencia de la primera debido a que se obtiene el nitrito por la absorción de gases nitrosos en carbonato de sodio en vez de hidróxido de sodio.



Al analizar la ruta de obtención 3 (Anexo I, Digital, Hoja: Ruta síntesis 3) se observa que da positiva pero su potencial económico es demasiado pequeño comparado con la ruta 2 y 4 por la cual se descarta ya que se necesita la modificación del precio de venta en el cual si se modifica al actual valor estimado en el estudio (\$2,000) no daría factible.

Ruta de obtención 4 Después de haber obtenido los gases nitrosos estos son absorbidos en carbonato de sodio y de esta manera se produce el nitrito de sodio, por otro lado, el ácido nítrico producido se hace reaccionar con el carbonato para así producir el nitrato deseado.



Con esta ruta de síntesis se observa que da más factible que las demás lo que se demuestra en el potencial económico, que es mucho más alto que las anteriores rutas por lo cual se escoge esta opción. También se analiza la síntesis de ácido nítrico como una etapa intermedia en vez de adquirirlo, lo cual genera más ganancias como también se le modifica el precio de ventas de nuestros productos a un menor costo y vemos que todavía sigue siendo factible esta ruta.

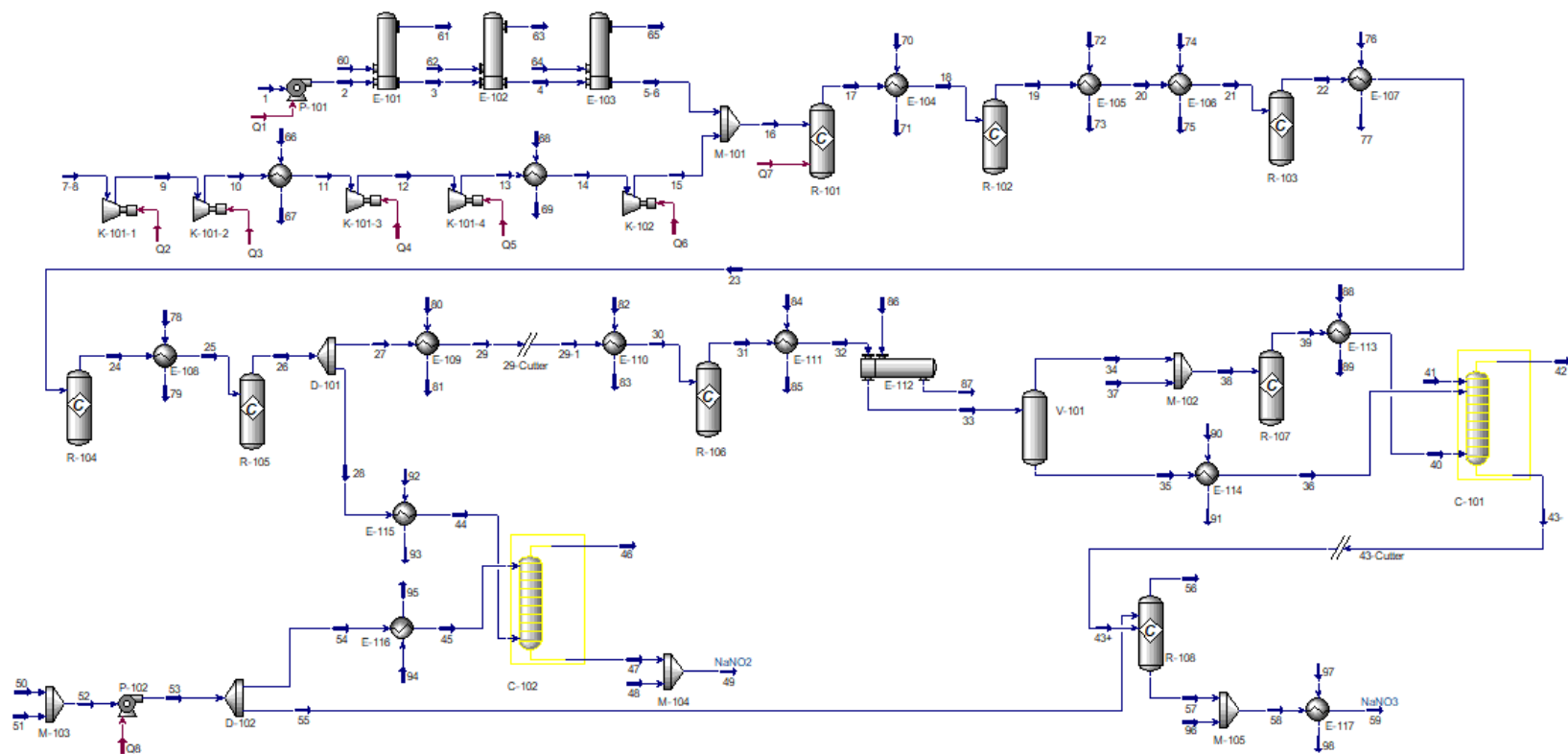
ANEXO E. FUNCIÓN DE CADA EQUIPO

EQUIPO	FUNCIÓN
TK-101	Almacenamiento de amoniaco materia prima que a alta presión se mantiene en forma líquida.
TK-102	Almacenamiento de nitrato de sodio que sale de la corriente 52 en forma líquida, ya que esta diluida en agua.
TK-103	Almacenamiento de Carbonato de sodio materia prima que a temperatura y presión ambiental se mantiene en forma sólida.
TK-104	Almacenamiento de nitrito de sodio que sale de la corriente 52 en forma líquida, ya que esta diluida en agua.
FIL-101	Filtrar el amoniaco para obtener la mayor conversión posible de este en el catalizador y lograr una vida útil más larga de este. El filtro de amoniaco liquido elimina los contaminantes solidos (pequeñas particas de óxido); el 99.9% de las partículas mayores de 3 micrómetros son eliminadas ⁵⁴ .
P-101 y P-102	Aumentar la presión del amoniaco y carbonato de sodio respectivamente, impulsándolos al proceso.
K-101	Entregar y comprimir el aire hasta la presión optima de operación para el reactor catalítico.
E-101 a E-103	Evaporar el amoniaco hasta obtener la temperatura óptima para ingresar al reactor catalítico utilizando agua.
M-101	Mezclar amoniaco y aire previo a la oxidación catalítica.
R-101	Oxidar el amoniaco rápidamente a temperaturas cercanas a los 900°C.
E-104 a E-112	Tren de enfriamiento de los gases producidos en el reactor R-101, con el fin de producir dióxido de nitrógeno.

⁵⁴ GUZMAN, L, *et. al.* Producción de ácido nítrico a partir de amoniaco [PDF]. España, Universidad técnica Federico Santa María. Departamento de ingeniería química y ambiental. 2012. 23P. [Consultado: 7 de junio de 2018]

R-102 a R-105	Reactores adiabáticos los cuales producen dióxido de nitrógeno en presencia de monóxido de nitrógeno con un exceso de oxígeno.
R-106	Producir dióxido de nitrógeno, su dímero y algo de ácido nítrico debido a que la temperatura de entrada de los gases es lo suficientemente baja.
V-101	Separar los gases de los líquidos.
M-102	Mezclar los óxidos separados en V-101 con aire, ya que se necesita un exceso de este para la continuación del proceso.
R-107	Producir dióxido de nitrógeno y tetraóxido de nitrógeno.
E-113 y E-115	Disminuir la temperatura de los gases nitrosos hasta la óptima para ingresar a la torre de absorción.
C-101	Absorber los gases nitrosos en agua para obtener ácido nítrico.
C-102	Absorber los gases nitrosos en carbonato de sodio para obtener nitrito de sodio.
M-103	Mezclar el carbonato de sodio solido con agua.
D-102	Dividir el carbonato de sodio para el proceso de producción de nitrito y nitrato.
E-116	Aumentar la temperatura del carbonato de sodio a la requerida para ingresar a la torre de absorción C-102.
R-108	Producir nitrato de sodio.

ANEXO F. SIMULACIÓN de NaNO_2 y NaNO_3



ANEXO G. COSTOS DE CAPITAL

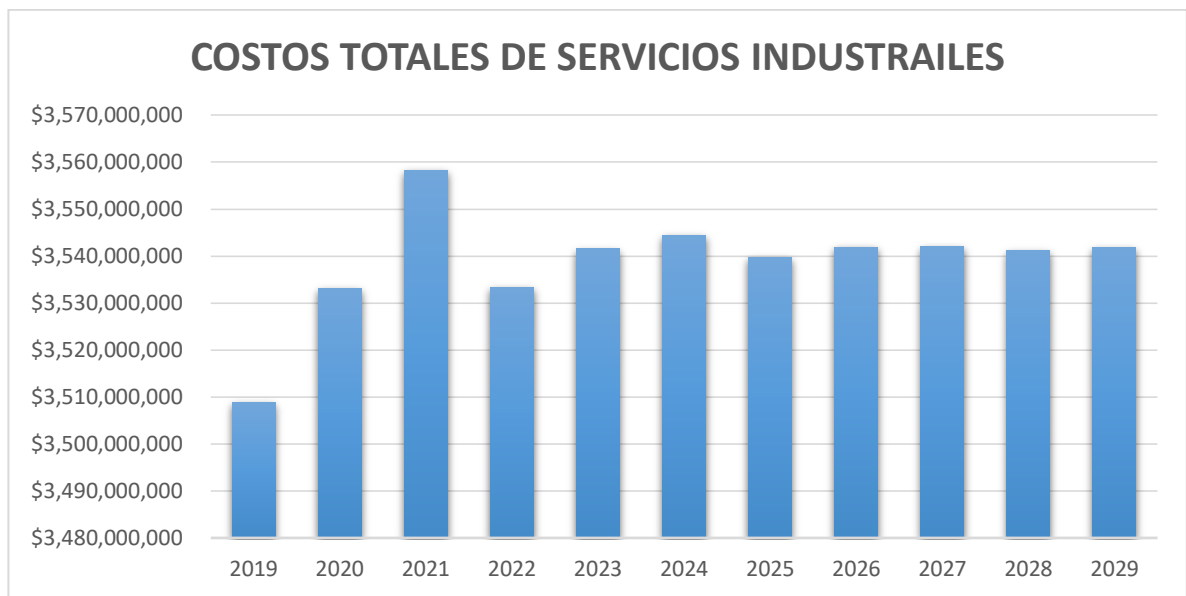
- **Costos de servicios industriales (C_{UT})**

Los servicios industriales requeridos para nuestra planta son: agua de servicio y energía eléctrica.

En la planta se requiere energía eléctrica para la puesta en marcha de los equipos e iluminación en oficinas. La cantidad de energía eléctrica se determinó realizando la sumatoria de kW necesarios para encender cada equipo y estableciendo que los equipos duran encendidos las 24 horas del día durante 341 días anuales. Para calcular el costo anual de energía eléctrica, se realiza el producto entre el costo de energía por kWh y la cantidad necesaria. Para realizar las proyecciones de los precios de energía eléctrica anuales, se utilizaron los datos históricos suministrados por la empresa de servicios ESSA S.A. se utilizó un método de aproximación medias móviles $n=3$ (Anexo I., Digital, Hoja: CUT Luz).

Además la empresa debe contar con el servicio de agua para las instalaciones de la planta, agua en el proceso y como refrigerante. Para calcular la cantidad de agua en la instalación aproximada que se gastaría mensualmente se realiza la suma del consumo de agua por cada corriente que ingresa con este insumo. El agua de proceso necesaria para el funcionamiento de la planta será de $1160.81 \text{ m}^3/\text{mes}$. La proyección de precios $\$/kW$ fue realizada en base a datos suministrados por la empresa de servicios aguas de Barrancabermeja S.A. y se utilizó el método de medias móviles (Anexo I., Digital, Hoja: CUT Agua).

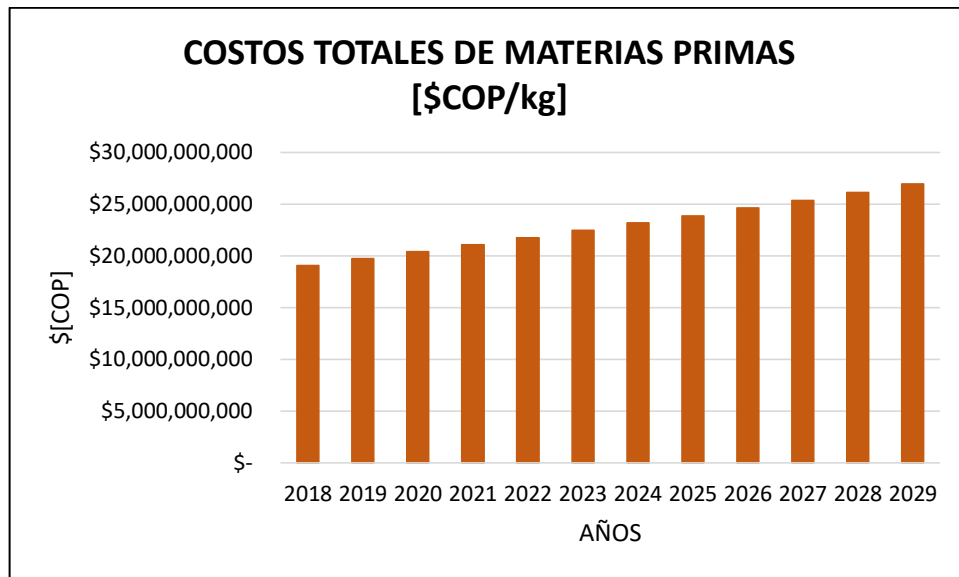
Los costos totales, a lo largo de la duración del proyecto, se encuentran registrados en la siguiente figura:



- **Costos de materias primas (C_{RM}).**

Las materias primas e insumos que se utilizan en la planta son: amoníaco, el catalizador platino/rodio y el carbonato de sodio. Por otro lado se calcula la cantidad de materia prima a utilizar mediante el estudio de la ruta de síntesis y los datos históricos de precios están desde el 2001 hasta el 2017, proporcionados por el DANE. La proyección de los precios de las materias primas e insumos se llevó a cabo mediante la herramienta pronóstico del programa Excel para la proyección, debido a que se presentan fluctuaciones en los precios de los datos históricos. Los costos de materias primas e insumos se determinan mediante el producto entre la cantidad de materia prima e insumos que se requerirán por tonelada y el precio correspondiente de cada uno año a año.

La siguiente figura muestra los costos totales de las materias primas anuales.



- **Costos de mano de obra (COL)**

La operación de nuestra planta se da de forma continua durante 341 días al año. Los días restantes corresponden al mantenimiento. Cada operario trabajará 8 horas al día, 6 jornadas a la semana y tendrá 2 semanas de vacaciones. Por tanto, trabajará 50 semanas al año que equivalen a 300 jornadas por año. Como la planta de producción de nitrito y nitrato de sodio operará 24 horas al día, se requieren 3 jornadas diarias. Cada operario trabajará 2,400 horas en promedio al año.

El costo de mano de obra establecido incluye las prestaciones sociales, que hacen referencia al pago de salud y de pensiones que corresponden a la empresa Cotización a la seguridad social y el auxilio de transporte.

Para nuestra proyección asumimos el ICP como la inflación pues este indicador es considerado el principal instrumento para la cuantificación de la inflación.

La siguiente tabla muestra los costos totales de mano de obra anual:

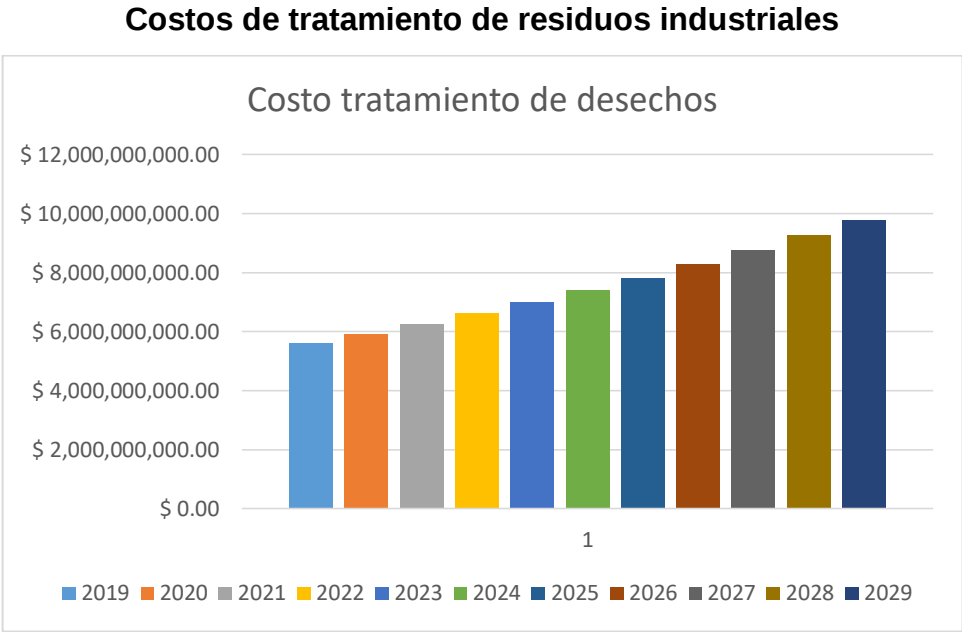
AÑO	COSTO ANUAL [COP\$/AÑO]
2019	\$ 1,849,651,368.37
2020	\$ 1,856,120,938.83
2021	\$ 1,853,995,726.03
2022	\$ 1,853,256,011.07
2023	\$ 1,854,457,558.64
2024	\$ 1,853,903,098.58
2025	\$ 1,853,872,222.76
2026	\$ 1,854,077,626.66
2027	\$ 1,853,950,982.67
2028	\$ 1,853,966,944.03
2029	\$ 1,853,966,944.03

- **Costos de tratamiento de residuos industriales (C_{WT}).**

Siendo conscientes del impacto ambiental de los desechos, en nuestra planta trataremos los gases del proceso, producidos en las columnas de reacción química C-101 y C-102 como también la corriente 56 producida en el reactor R-108 como residuo del proceso. Para tal fin, serán tratadas alrededor de 35,090 toneladas de mezclas de gases por año. La empresa como Sandesol S.A. E.S.P., ofrecen el servicio de tratamiento de desechos en el departamento de Santander. Más adelante se podría adquirir los equipos necesarios para tratar estos gases y darles su debido tratamiento en la planta.

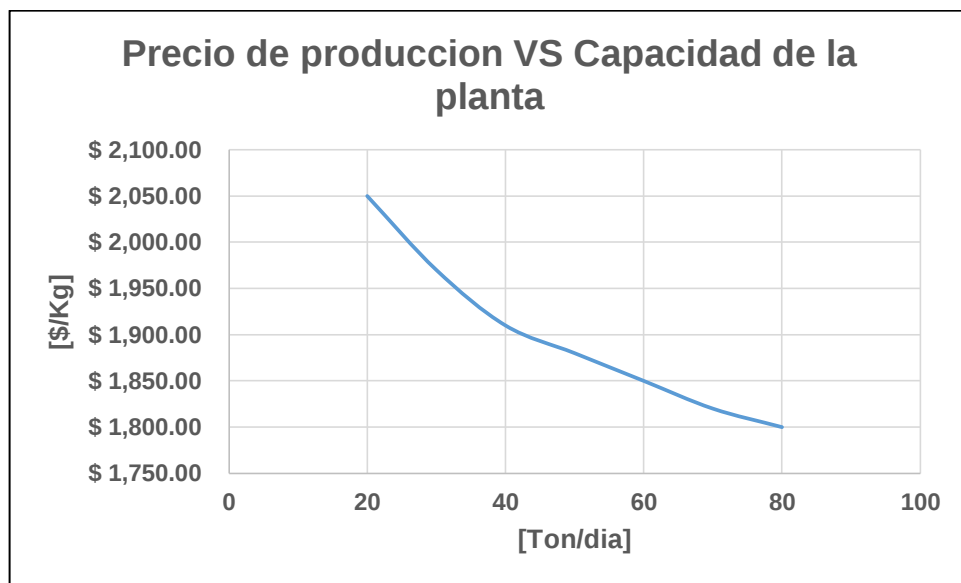
La estimación de costos de esta variable ha sido basada en los costos por tratamiento de desechos no peligrosos suministrados en el libro “*Analysis, Synthesis, and Design of Chemical Processes*” que suministra información del costo por tonelada tratada. Teniendo en cuenta la generación de desechos gaseosos por año, se estimaron los gastos a lo largo del horizonte del proyecto, tomando en consideración las proyecciones de la inflación anual (Anexo I., Digital, Hoja: CWT).

En la siguiente figura se registran los costos por tratamiento de desechos en cada año de ejecución del proyecto.



ANEXO H. CAPACIDAD DE LA PLANTA

En el anterior estudio, también se analiza la fluctuación que hay en el precio de producción de acuerdo a la capacidad a utilizar en la planta (Anexo I. Digital. Hoja: grafica precio vs capacidad de la planta) lo cual se mira desde el 25% hasta el 100% de la capacidad.



Con la anterior grafica podemos conocer el valor exacto necesario al cambiar la capacidad de la planta y poder ver cuán rentable es el proceso. Al estudiar la gráfica vemos que al aumentar su capacidad el precio disminuye considerablemente lo que es más factible al momento de fabricar estos insumos.